

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique

Université Ferhat Abbas Sétif 1

THÈSE

Présentée à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat 3^{ème} Cycle LMD

Option : Optique et Mécanique de Précision

Par:

HAKIMI SOUMIA

THÈME:

***Contribution numérique et analyse comparative du retour
élastique lors de la mise en forme d'un alliage d'aluminium***

Al5086-H111

Soutenue le 02/06/2022, devant le jury composé de :

DJEDDOU Ferhat	Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Président
SOUALEM Azzedine	Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
LOUCIF Kamel	Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur
GHEMARI Zine	Professeur à l'Université de M'SILA	Examineur
KERAGHEL Fatiha	Maître de conférence à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur

Dédicace

*Merci Allah de m'avoir donné la
capacité de finir et de présenter ce travail. La force d'y croire. La
patience d'aller jusqu'au bout du rêve*

Je dédie ce travail :

*Tout d'abord, à la Source inépuisable de tendresse, de patience et de
sacrifice, la source d'amour, et d'espoir, ma très chère mère.*

*À mon très cher père, mes frères et ma
Sœur qui m'ont toujours encouragé à faire ce travail*

*Je voudrais remercier mon fils,
qui est ma source d'inspiration et mon plus
grand soutien.*

À tous ceux qui ont toujours cru en moi...

Remerciements

Il me sera très difficile de remercier tout le monde, car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur le professeur **SOUALEM Azzedine** pour sa grande disponibilité et ses précieux conseils.

Mes remerciements vont au personnel administratif de l'institut d'Optique et de Mécanique de Précision d'avoir facilité toute procédure administrative ainsi qu'aux ingénieurs et techniciens de l'institut qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Je voudrais remercier grandement le personnel du laboratoire de physique et de mécanique des matériaux métalliques et le personnel du laboratoire des matériaux non métalliques. Je suis ravi d'avoir travaillé avec le personnel de l'unité de recherche des matériaux émergents.

Je remercie Mr. **DJEDDOU Ferhat** de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance. J'exprime toute ma gratitude, à Monsieur **LOUCIF Kamel** d'avoir accepté de juger mon travail.

Je remercie également Monsieur, **GHEMARI Zine** pour l'honneur qu'il me fait d'être dans mon jury de thèse.

Je tiens à remercier Madame **KERAGUEL Fatiha** pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse. Elle a toujours fait tout son possible pour m'aider.

Je les remercie ainsi pour leurs remarques et leurs conseils qui ont permis l'amélioration de ce manuscrit.

J'exprime aussi ma reconnaissance à Messieurs Louahdi, Mertani, et Fizi, pour leurs aides précieuses. Mes derniers remerciements vont à mes enseignements, membres de ma famille et mes amis qui ont partagés mes soucis.

Résumé. L'objectif de l'étude décrite dans cette mémoire de thèse est de trouver des solutions aux problèmes rencontrés dans le formage de la tôle tel que le problème du retour élastique. Dans un premier lieu, une étude expérimentale basée sur des analyses théoriques. Dans ce but, un effort important est fait pour ajouter une nouvelle conception de parties pour un dispositif d'étirage-plier de type U et l'adapter à une machine d'essai de traction. Cette conception présente l'avantage de modifier et d'assembler tous les paramètres affectant le retour élastique en même temps et aussi de réaliser plusieurs processus de formage sur le même dispositif. Une prédiction expérimentale et numérique du retour élastique a été effectuée, et aussi l'étude de l'effet de divers paramètres du processus d'étirage-plier et pliage à l'air V, tels que la vitesse du poinçon, l'orientation de la tôle (anisotropie), le temps de maintien et le jeu entre le poinçon et la matrice, etc., sur le comportement du retour élastique lors du traitement thermique de tôles en alliage d'aluminium avec trois directions de laminage différentes (0°, 45°, 90°). La mise au point et l'optimisation de ces procédés passent par des étapes de simulations numériques, d'optimisation par des plans d'expérience (RSM) et d'études sur les bancs d'essais. Un modèle par élément finis (FE) des deux procédés étudiés a été établi en utilisant le logiciel ABAQUS. Cette analyse permet de conclure que le retour élastique est affecté par plusieurs paramètres dans le processus d'étirage-plier et pliage à l'air. Les résultats expérimentaux obtenus ont été comparés aux simulations numériques qui se sont révélées un bon accord.

Mots-clés : Retour élastique, alliage d'aluminium, Abaqus, FEM, RSM.

Abstract. The objective of the study described in this thesis is to find solutions to the problems encountered in sheet metal forming such as the spring back problem. In the first part, an experimental study based on theoretical analysis. For this purpose, a major effort is made to add a new design of parts for a U-type stretch-bend device and adapt it to a tensile testing machine. This design has the advantage of modifying and assembling all the parameters affecting the spring back at the same time and also to perform several forming processes on the same device. Experimental and numerical prediction of spring back was performed, and also the study of the effect of various parameters of the stretch-bending and air-bending process, such as punch speed, sheet orientation (anisotropy), holding time and clearance between punch and die, etc., on the behavior of spring back during the heat treatment of aluminum alloy sheets with three different rolling directions (0°, 45°, 90°). The development and optimization of these processes requires numerical simulations and test bench studies. A finite element (FE) model of the two processes studied was established using the ABAQUS software. This analysis allows to conclude that the spring back is affected by several parameters in the process of stretch-bending and air-bending. The experimental results obtained were compared to the numerical simulations which were found to be in good agreement.

Keywords: Springback, Aluminium alloy, Abaqus, FEM, RSM.

ملخص. الهدف من الدراسة الموصوفة في هذه الأطروحة هو إيجاد حلول للمشاكل التي تصادف في تشكيل الصفائح المعدنية مثل مشكلة الرجوع المرن. أولاً، اجراء دراسة تجريبية على أساس التحليلات النظرية. لهذا الغرض، تم بذل جهد كبير لإضافة تصميم جديد لأجزاء جهاز الشد و الثني وتكليفه مع آلة اختبار الشد. يتمتع هذا التصميم بميزة تعديل وتجميع جميع العوامل التي تؤثر على الرجوع المرن في نفس الوقت وأيضاً تنفيذ العديد من عمليات التشكيل على نفس الجهاز. تم إجراء تنبؤ تجريبي وعددي لهذا الأخير، وكذلك دراسة تأثير العوامل المختلفة لعملية التمدد والانحناء الهوائي، مثل سرعة التشكيل، وتوجيه القطعة (تباين الخواص)، ووقت الاحتفاظ والتخليص على القالب، وما إلى ذلك، على سلوك الرجوع المرن أثناء المعالجة الحرارية لعينات سبائك الألومنيوم بثلاثة اتجاهات مختلفة للدوران (0 درجة، 45 درجة، 90 درجة). يتضمن تطوير هذه العمليات وتحسينها مراحل من المحاكاة من العمليتين المدروستين. من هذا التحليل يمكن استنتاج أن الرجوع المرن يتأثر بعدة عوامل في عملية التمدد والانحناء والانحناء الهوائي. النتائج العملية التي تم الحصول عليها قورنت بالمحاكاة العددية التي اتضح أنها متوافقة جيداً.

الكلمات الرئيسية. الرجوع المرن, سبائك الألومنيوم, Abaqus, FEM, RSM .

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Retour élastique.....	7
1.3 Procédures de caractérisation du retour élastique	15
1.3.1 L'emboutissage	16
1.3.1.1 L'emboutissage (étirage-plier) en U	18
1.3.1.2 Emboutissage S-rails	20
1.3.1.3 Drawbend test.....	22
1.3.1.4 Test de Demeri	25
1.3.2 Le pliage.....	27
1.3.2.1 Pliage en V.....	27
1.3.2.2 Pliage en U	28
1.3.2.3 Pliage en air.....	29
1.3.2.4 Pliage en L	32
1.4 Compensation du retour élastique	33
1.4.1 Les plans d'expériences	37
1.4.1.1 La méthode de surface de réponse (RSM).....	38
1.5 Conclusion	43
Chapitre 2 : Caractérisation et Etude expérimentale.....	44
2.1 Introduction.....	44
2.2 Les alliages d'aluminium	44
2.3 Métal étudié	46
2.4 Propriétés physico-chimique	47
2.4.1 Composition chimique.....	47
2.4.2 Microdureté	47
2.4.3 Observation métallographique	48
2.5 Propriétés mécaniques.....	49
2.5.1 Essai de traction	49
2.5.1.1 Machine utilisée	50
2.6 Description et modification du dispositif d'emboutissage en U.....	55

2.7	Déroulement des procédés de formage étudiés	58
2.7.1	Méthode de mesure du retour élastique	61
2.8	Résultats et discussions.....	62
2.8.1	Evaluation du retour élastique.....	62
2.8.1.1	Cas d'essai d'emboutissage en U	62
2.8.1.1.1	Effet de la profondeur d'étirage et de l'anisotropie.....	62
2.8.1.1.2	Effet de la vitesse du poinçon	64
2.8.1.1.3	Influence de traitement thermique.....	65
2.8.1.1.4	Effet du jeu entre poinçon et matrice	66
2.8.1.1.5	Effet du temps de maintien du poinçon sur le flan	68
2.8.1.1.6	Effet du rayon de matrice et du rayon du poinçon	70
2.8.1.2	Cas d'essai de pliage en air	71
2.8.1.2.1	Effet de l'anisotropie et de l'ouverture de la matrice	71
2.8.1.2.2	Effet de la vitesse du poinçon	71
2.8.1.2.3	Effet du temps de maintien et de traitement thermique	73
2.9	Conclusion	74
Chapitre 3 : Analyse numérique et optimisation		75
3.1	Introduction.....	75
3.2	Simulation des deux procédés de formage et du retour élastique	75
3.3	Résultats et discussions.....	83
3.3.1	Cas d'essai d'emboutissage en U	83
3.3.1.1	Effet de la profondeur d'étirage et de l'anisotropie.....	87
3.3.1.2	Effet de la vitesse du poinçon	88
3.3.1.3	Effet du jeu entre poinçon et matrice	89
3.3.1.4	Effet du temps de maintien du poinçon sur le flan	89
3.3.2	Cas du procédé de pliage à l'air	90
3.3.2.1	Effet de l'anisotropie	90
3.3.2.2	Effet de l'ouverture de la matrice et de la vitesse du poinçon	91
3.3.2.3	Effet du temps de maintien du poinçon sur le flan	92
3.4	Optimisation	92
3.4.1	Optimisation de procédé d'étirage-piage et de retour élastique	93
3.4.1.1	Résultats et discussions	94

3.4.1.1.1	Test de signification du modèle de régression.....	94
3.4.1.1.2	Test de signification des coefficients individuels du modèle.....	95
3.4.1.1.3	Test d'absence d'ajustement.....	95
3.4.2	Optimization de procédé de pliage à l'air et du retour élastique.....	99
3.4.2.1	Résultats et discussions.....	100
3.4.2.1.1	Test de signification du modèle de régression.....	100
3.4.2.1.2	Test de signification des coefficients individuels du modèle et test d'absence d'ajustement.....	100
3.5	Conclusion.....	103
Conclusion générale et perspectives.....		105
Références Bibliographiques.....		107

Liste des figures

Figure1. 1 : Exemple de déformées obtenues après l'étape d'emboutissage (simulation par éléments finis) d'une géométrie en « Oméga »	7
Figure1. 2 : L'effet du rayon de la matrice sur le retour élastique.....	8
Figure1. 3 : Processus de pliage : a) pliage en V, b) pliage rotatif, c) pliage par tombée de bord, d) pliage en air	16
Figure1. 4 : Emboutissage hydromécanique	17
Figure1. 5 : Plan schématique d'un outillage d'emboutissage	18
Figure1. 6 : Le schéma de pliage – étirage en U.....	19
Figure1. 7 : Principe de l'essai étirage-pliage d'une tôle métallique.....	19
Figure1. 8 : Mise en évidence du retour élastique final après enlèvement de l'outillage et libération totale de la pièce ($\Delta h_2 = h_2 - h_1$), et $\Delta \theta$	20
Figure1. 9 : Géométrie expérimentale du rail après avoir été retiré des outils de formage: (a) DC06; (b) DP600; deux trous sont découpés sur le haut du rail, comme points de référence pour fixer la pièce pendant la mesure	21
Figure1. 10 : Géométries de la forme du rail formées à différentes températures de formage	22
Figure1. 11 : Essai de pliage/dépliage par enroulement d'une tôle sur un outil circulaire. D'après Carden et al.....	23
Figure1. 12 : principe de test de Hino et al.	24
Figure1. 14 : simulation numérique de l'essai de Demri et retour élastique en trois opérations	26
Figure1. 13 : Godet embouti avant et après découpe de l'anneau, puis retour élastique après ouverture de l'anneau.....	26
Figure1. 15 : Modélisation par éléments finis du procédé de pliage en V.....	28
Figure1. 16 : méthode de mesure du retour élastique.....	29
Figure1. 17: Schéma de principe de processus de pliage à l'air, Rp: rayon du poinçon; Rd: rayon de la matrice; Wd: ouverture de la matrice; t: épaisseur de la tôle; θ_i : angle de pliage (pendant le chargement); θ_f : angle de pliage (après le déchargement); $\Delta \theta$: angle de retour élastique (après le déchargement).....	30
Figure1. 18 : Illustration de différentes étapes de procédé de pliage par tombée de bord	32
Figure1. 19 : Facteurs de retour élastique dans le processus de pliage en V : WS, PB et SB avec étirage latéral basé sur AISI304	34
Figure1. 20 : (a) Organigramme de la méthode DA (b) Organigramme de l'algorithme du descripteur de force.....	36
Figure1. 21 : a) Plan composite centré pour 3 facteurs et b) Plan de Box-Behnken pour 3 facteurs [113].	39
Figure 2. 1: Limite d'élasticité après recuit de plusieurs alliages aluminium-magnésium.....	45
Figure 2. 2: Bandes de Luders dans une tôle d'alliage d'aluminium riche en magnésium.....	46
Figure 2. 3: Appareil d'essai de dureté Qness 402MVD,.....	48
Figure 2. 4: Métallographie de l'alliage d'aluminium étudié pour a) un grossissement de 50, b) et un grossissement de 100 X,	49
Figure 2. 5: Machine universelle d'essai mécanique de type MTS de capacité 100KN,	50
Figure 2. 6: Éprouvette normalisée d'essai de traction,	51
Figure 2. 7: Une éprouvette sollicitée à un essai de traction,	52
Figure 2. 8: Courbes force-déplacement pour différentes températures (20°C, 100°C, 200°C) et dans différentes directions par rapport au sens de laminage (0°,45°,90°),	53
Figure 2. 9 : Dispositif utilisé pour le déroulement des essais avec le comparateur de déplacement,.....	56
Figure 2. 10 : Les parties de la matrice conçue,	56
Figure 2. 11 : Conception du poinçon,	58
Figure 2. 12 : Installation du flan sur le banc d'essai (a) étirage-pliage, (b) pliage en air,.....	59
Figure 2. 13 : Étapes de réalisation de procédé d'emboutissage en U, a) application de force de serrage, b) mise en forme de la pièce,	61
Figure 2. 14 : Eprouvettes après l'enlèvement d'outillage,	62
Figure 2. 15 : Variation du retour élastique primaire en fonction de profondeur d'étirage dans différentes directions de laminage (0°, 45°, 90°),	63
Figure 2. 16 : Variation du retour élastique primaire en fonction de profondeur d'étirage pour différentes vitesses du poinçon dans différentes direction de laminage,.....	63
Figure 2. 17 : Évaluation du retour élastique en fonction de vitesse du poinçon dans les trois directions de laminage (0°,45°, 90°),	64
Figure 2. 18 : Résultats expérimentaux du retour élastique en fonction de la vitesse du poinçon pour différentes directions de laminage et différentes températures de recuit,	65
Figure 2. 19 : Variation du retour élastique final pour différentes température de recuit et différentes directions de laminage,	66

Figure 2. 20 : Influence du jeu entre poinçon et matrice sur le retour élastique final pour différentes directions par rapport au sens de laminage,.....	66
Figure 2. 21 : Retour élastique final en fonction du jeu pour différentes directions de laminage et différentes températures de recuit,	67
Figure 2. 22 : Évaluation du retour élastique primaire avec la variation du jeu entre poinçon et matrice pour différentes profondeur d'étirage dans différentes directions de laminage,.....	68
Figure 2. 23 : Retour élastique final en fonction du temps de maintien pour différentes directions de laminage,.....	69
Figure 2. 24 : Variation du retour élastique final avec le temps de maintien pour les trois directions de laminage (0°,45°,90°) et différentes températures de recuit,.....	69
Figure 2. 25 : Influence du rayon de la matrice sur le retour élastique pour différentes direction de laminage,.....	70
Figure 2. 26 : Effet du rayon du poinçon sur le retour élastique final pour différentes directions de laminage et différents rayons de matrice,	71
Figure 2. 27 : Résultats du retour élastique en fonction d'ouverture de la matrice pour différentes directions de laminage,..	71
Figure 2. 28 : Variation d'angle de retour élastique avec l'ouverture de la matrice dans différentes orientations et différentes vitesses de déformation,	72
Figure 2. 29 : Angle de retour élastique en fonction de vitesse de déformation dans trois directions de laminage (0°,45°,90°) pour différentes ouverture de matrice,.....	73
Figure 2. 30 : Variation de l'angle du retour élastique en fonction du temps de maintien pour différentes directions de laminage.	73
Figure 3. 1 : Maillage du flan avec des éléments CPE4R,.....	76
Figure 3. 2 : Le modèle 2D en déformation plane de procédé d'étirage-plierage,	77
Figure 3. 3 : Etapes du procédé d'étirage-plierage,.....	78
Figure 3. 4 : La pièce déformée avant et après le phénomène du retour élastique,	79
Figure 3. 5 : Localisation des contraintes maximales de déformation aux rayons des outils,	79
Figure 3. 6 : Cas d'une distribution des déformations plastiques équivalentes dans l'épaisseur,	80
Figure 3. 7 : Modèle 2D à déformation planes du procédé de pliage à l'air en V,.....	82
Figure 3. 8 : Mise en œuvre numérique du procédé de pliage à l'air en V,	83
Figure 3. 9 : Géométrie de la déformée avant et après retour élastique,	83
Figure 3. 10 : La courbe temps-déplacement (U2) numérique pour mesurer le retour élastique,.....	84
Figure 3. 11 : La géométrie de la pièce déformée après retour élastique avec un amincissement qui dû aux efforts d'étirage pour une grande profondeur d'étirage,.....	85
Figure 3. 12 : L'énergie cinétique (a), et l'énergie interne (b) pour la simulation de procédé d'étirage-plierage,.....	86
Figure 3. 13 : Courbe force-déplacement numérique pour un procédé d'étirage-plierage (90°, p=10 mm, jeu=16mm),.....	87
Figure 3. 14 : Résultats numérique de l'effet de la profondeur d'étirage et de l'anisotropie initiale sur le retour élastique, ...	88
Figure 3. 15 : Résultats numériques du retour élastique en fonction de la vitesse du poinçon pour différentes températures de recuit,	88
Figure 3. 16 : Résultats numériques du retour élastique en fonction du jeu entre poinçon et matrice pour différentes températures de recuit,.....	89
Figure 3. 17 : Résultats numériques de l'influence de temps de maintien sur le retour élastique pour différentes directions de laminage et températures de recuit,.....	90
Figure 3. 18 : Influence de l'anisotropie du matériau sur le retour élastique pour différentes ouvertures de la matrice,.....	91
Figure 3. 19 : Variation d'angle de retour élastique avec l'ouverture de la matrice dans différentes orientations et différentes vitesses de déformation,	92
Figure 3. 20 : Effet du temps de maintien sur l'angle du retour élastique $\Delta\theta$ pour différentes directions de laminage,	92
Figure 3. 21 : Tracés de probabilité normale des résidus et des tracés des résidus en fonction de la réponse prédite pour le cas d'étirage-plierage,.....	96
Figure 3. 22 : Réponse de surface de l'angle du retour élastique quand les paramètres de procédé sont aux valeurs minimales et la direction de laminage à 0°,45°, 90° respectivement,.....	96
Figure 3. 23 : Réponse de surface de l'angle du retour élastique quand les paramètres de procédé sont aux valeurs maximales et la direction de laminage à 0°,45°,90° respectivement,.....	97
Figure 3. 24 : Résultats numériques du retour élastique optimisés graphiquement (étirage-plierage),	98
Figure 3. 25 : Résultats d'optimisation numérique du retour élastique pour le procédé d'étirage-plierage,	99
Figure 3. 26 : Tracés de probabilité normale des résidus et des tracés des résidus en fonction de la réponse prédite pour le cas de pliage à l'air,	101
Figure 3. 27 : Surface de réponse en fonction de vitesse de deformation(B), et d'ouverture de la matrice (A) quand le temps de maintien vaut 0 s, dans les direction 0°, 45°, et 90° respectivement,	101

Figure 3. 28 : Surface de réponse en fonction de vitesse de deformation (B), et d'ouverture de la matrice (A) quand le temps de maintien vaut 300 s, dans les directions 0°, 45°, et 90° respectivement, 102
Figure 3. 29 : Résultats numériques du retour élastique optimisés graphiquement dans le cas de pliage à l'air,..... 102
Figure 3. 30 : Résultats d'optimisation numérique du retour élastique pour le procédé de pliage à l'air, 103

Liste des tableaux

Tableau 2. 1: Composition chimique du matériau d'essai (en % en poids),.....	47
Tableau 2. 2: Résultats d'essai de dureté,	48
Tableau 2. 3: Résultats d'essai de traction,.....	54
Tableau 2. 4: Coefficients de Hill,.....	55
Tableau 2. 5 : Propriétés de la vis de serrage,.....	59
Tableau 3. 1 : Conditions numérique des deux procédés,	81
Tableau 3. 2 : Les facteurs choisis pour construire le plan d'expérience,.....	93
Tableau 3. 3 : Test de signification du modèle de regression,	95
Tableau 3. 4 : Les facteurs choisis pour construire le plan d'expérience,.....	100
Tableau 3. 5 : Test de signification du modèle de regression,	100

Introduction générale

La production de tôles, obtenues par laminage, représente une part importante de la production industrielle de métaux. Ces tôles sont largement utilisées dans les industries mécaniques, telles que l'automobile, l'aéronautique, etc. L'une des principales caractéristiques qui rendent les produits en tôle attrayants est qu'ils présentent une bonne résistance mécanique et un excellent rapport résistance/poids.

Les procédés de formage des tôles sont exceptionnels en ce sens que l'expertise joue un rôle essentiel tant dans la conception que dans la production des produits. Des développements significatifs dans les techniques de formage de ces tôles ont également été réalisés au cours des dernières années. Le formage des tôles repose sur l'existence d'un très grand nombre de procédés de formage qui sont assez distincts d'un point de vue technique, mais qui partagent des principes de base qui permettent de les analyser comme un tout dans l'industrie. Le pliage, l'étirage, l'emboutissage et d'autres techniques et procédés de base pour créer des composants en tôle n'en sont que quelques exemples [1].

L'emboutissage reste l'un des procédés les plus populaires. Ce procédé présente des avantages distincts par rapport à d'autres types de procédés, car il permet de produire des pièces à des cadences extrêmement élevées, des pièces aux formes géométriques complexes, etc. En outre, son importance économique est incontestable. Le procédé de pliage en air est extrêmement adaptable, puisqu'il est possible de produire différents angles avec le même jeu d'outils en ajustant le décalage entre la matrice et le poinçon. Le pliage en air est donc un procédé très apprécié car d'une part il est indépendant du type de matériau à plier et d'autre part le nombre de changements d'outils est limité par l'angle à plier. Parmi les nombreux procédés de formage de la tôle, cette étude se concentre sur ces deux procédés de formage.

Donc, la demande croissante de produits précis constitue un défi supplémentaire. En raison du phénomène de retour élastique, le plus grand enjeu est d'obtenir une bonne précision géométrique de la pièce finale.

Après le retrait de la charge, le retour élastique est courant dans le pliage de la tôle, car le matériau tente de retrouver sa forme initiale. Le pliage est un procédé de formage dans lequel une tôle est pliée sous la force d'un poinçon avec une matrice de forme prédéterminée. Le retour élastique dans le pliage peut être défini comme le rapport entre l'angle de pliage produit et l'angle de pliage souhaité. Étant donné l'importance et la complexité du retour élastique, plusieurs études ont été menées pour analyser ce phénomène de manière analytique, expérimentale et numérique pour une variété de formes, de matériaux et de paramètres de processus. Il est nécessaire de connaître en détail et de s'appuyer sur les définitions,

les formulations analytiques et les observations expérimentales existant dans la littérature pour pouvoir reconnaître les paramètres importants impliqués dans la valeur du retour élastique au cours du processus afin de pouvoir la considérer correctement [2-3].

Les alliages d'aluminium font partie des matériaux disponibles sous forme de tôle. Ils sont de plus en plus utilisés dans l'industrie automobile à cause de leurs excellentes propriétés mécaniques. En raison de la rareté des études expérimentales et numériques, ainsi que de la mauvaise prédiction du retour élastique de ces alliages, la mise en forme de ce matériau dans le besoin de secteur automobile est un sujet très important pour les chercheurs.

Actuellement, la simulation par la méthode des éléments finis devient rapidement un outil indispensable pour la prédiction des problèmes indésirables qui peuvent survenir lors de la mise en forme des tôles métalliques. Une exigence fondamentale de toute simulation complète des processus de formage de la tôle est la capacité de déterminer la géométrie finale d'une pièce en tôle ainsi que le retour élastique. De même, les outils de simulation doivent réduire la répétition des essais et des erreurs qui sont inhérents à ces processus.

Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est d'analyser expérimentalement et numériquement deux processus de mise en forme tels que l'étrépage-plier (emboutissage en U) et le pliage en air, en relation avec la géométrie finale de la pièce obtenue, et de quantifier la valeur du retour élastique que la pièce subit pendant le processus, afin d'établir quels paramètres d'exécution sont importants dans la réalisation de ces deux procédés dans le but de minimiser au maximum la quantité du retour élastique. L'expérimentation nécessite une définition claire des variables à contrôler, en les quantifiant au moyen de techniques de mesure connues ou développées spécifiquement pour ce travail. Après l'expérimentation en laboratoire, une analyse complète des données obtenues doit être effectuée et les données doivent être correctement interprétées. Plus précisément, cette étude concentre sur la simulation numérique et l'optimisation de quelques de ces deux procédés de formage tels que l'étrépage-plier et le pliage en air avec l'étape du retour élastique. Dans le but de la prédiction du retour élastique, différents essais expérimentaux ont été réalisés et des simulations éléments finis ont été élaborées au moyen du logiciel numérique Abaqus, et aussi une optimisation par les plans d'expérience qui se base sur la méthode de surface de réponse (RSM).

Plan de thèse

Cette thèse est divisée en trois chapitres, qui sont développés comme suit:

Le premier chapitre concerne une synthèse bibliographique sur le grand problème rencontré lors de la mise en forme des tôles métallique, c'est le retour élastique. Un état de l'art est fait sur les principales études menées sur le retour élastique. Il permet de mettre en évidence les différentes procédures pour caractériser ce phénomène, et aussi, il présente l'influence de plusieurs paramètres de procédés et du matériau sur ce dernier. De plus, il met l'accent sur une partie qui intéresse à la compensation du retour élastique, en s'appuyant sur des méthodes de modification des outillages, et des méthodes des plans d'expérience pour optimiser les différents procédés de formage et le retour élastique.

Le deuxième chapitre est consacré aux études expérimentales qui se compose de deux parties : la première partie est dédiée à la caractérisation mécanique, physico-chimique, et métallographique de l'alliage d'aluminium (5086-H111). La caractérisation mécanique consiste à étudier le comportement mécanique à température ambiante et à différentes températures de traitement thermique du matériau étudié à partir d'essai de traction simple pour différentes orientations de prélèvement des éprouvettes par rapport au sens de laminage (0° , 45° , 90°). Des essais de dureté sont réalisés dans le but d'évaluer l'influence de traitement thermique sur la résistance du matériau. Pour la deuxième caractérisation, une détermination de la composition chimique du matériau d'étude est faite par l'utilisation de la technique de fluorescence des rayons X, ainsi une observation métallographique sont employées pour mettre la lumière sur les différentes phases de composition chimique de ce matériau.

La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à la réalisation expérimentale des deux procédés de mise en forme étudiés, l'étirage-plier et le pliage en air. Les différents paramètres de procédé (la profondeur d'étirage, l'anisotropie initiale, la géométrie d'outillage, le jeu entre poinçon et matrice, le temps de maintien de la charge du poinçon sur le flan, la vitesse de déformation et la température, etc.) qui influent la géométrie finale de la pièce déformée et le retour élastique sont analysés en détail dans cette partie.

Dans le dernier chapitre, une prédiction du retour élastique a été réalisée par la simulation des deux opérations de formage étudiées avec la phase du retour élastique. Afin de déterminer la quantité de retour élastique, plusieurs tests numériques ont été effectués en fonction de quelques paramètres d'influence comme décrit auparavant. La validation des résultats numériques obtenus sur la prédiction du retour élastique a été faite par comparaison aux valeurs expérimentales. Ces valeurs sont obtenues par l'adaptation d'un dispositif qui est modifié et optimisé sur une machine de traction qui permet de faire varier les différents paramètres liés directement à l'estimation du retour élastique. Ensuite, une optimisation de ces paramètres pour la minimisation ou l'annulation de ce défaut a été réalisée par l'application de la méthode de surface de réponse (RSM).

Enfin, la thèse est achevée par une conclusion générale, suivie par des perspectives pour des futurs travaux.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

1.1 Introduction

La mise en forme par déformation plastique remonte à l'ère néolithique, lorsque l'homme est apparu. Cependant, le processus de formage est généralement caractérisé par une productivité élevée, un faible coût de production par pièce, une faible consommation de matériaux et une qualité de produit spécifiquement conçue pour cette fonction. La précision, le contrôle et la sécurité des processus sont des priorités de la technologie moderne de formage. L'objectif de ces procédés est de fabriquer ou de produire des composants avec des tolérances extrêmement serrées, ainsi que des composants avec des géométries complexes et des tolérances proches de la forme finale. La géométrie et les propriétés mécaniques du produit doivent être soumises à une procédure contrôlée de haute qualité, et la consommation de matériaux et d'énergie doit être soigneusement réduite.

Si nous nous concentrons sur les procédés de la mise en forme des tôles, nous pouvons constater que, ces dernières années, ce type de procédé a pris une grande importance dans le monde industriel. La tôle est largement utilisée comme matériau de base dans les produits industriels et de consommation, car elle est facilement malléable et peut être transformée en formes complexes.

Lorsque l'on examine les différentes techniques de formage de la tôle, on constate l'importance qu'elles ont prise dans le secteur industriel ces dernières années. Comme la tôle est facilement malléable et peut être façonnée en formes complexes, elle est fréquemment utilisée comme matériau de base dans les articles industriels. Les composants en tôle sont présents dans de nombreuses industries, notamment l'aéronautique, l'électronique, les machines-outils, la réfrigération et la climatisation. Ces pièces sont cruciales dans l'industrie de production car, en plus de servir l'objectif fonctionnel ou structurel pour lequel elles ont été produites, elles sont également très attrayantes. Il convient également de mentionner leur importance dans le développement des transports (aéronautique, chemins de fer, véhicules de transport routier et navires), car l'efficacité de tous ces modes de transport dépend principalement de la réduction du poids [2].

En raison de la mondialisation du marché, de la brièveté des cycles de vie des produits, des exigences de qualité élevées et des courts délais d'exécution, le secteur de la tôlerie est actuellement soumis à de fortes pressions. Les fabricants de composants en tôle doivent disposer d'une flexibilité de production adéquate pour créer rapidement une variété de produits en tôle de qualité acceptable afin d'être compétitifs sur ce marché. Les fabricants sont contraints de réduire les délais de production et de développement en raison de la compétitivité de la production industrielle moderne. En outre, étant donné

la tendance susmentionnée à la réduction du poids (dans le cas des automobiles, pour réduire la consommation de carburant), cette nécessité pousse l'industrie automobile à reconsidérer les procédures de conception et de fabrication conventionnelles.

Les matériaux légers de haute résistance sont les uns des principaux moyens de réduire le poids du véhicule afin de diminuer la consommation de carburant et d'améliorer les performances, la maniabilité et le confort. En raison de sa légèreté, sa très haute résistance mécanique, et sa résistance à la corrosion, l'alliage d'aluminium a plusieurs utilisations dans différents domaines et a une importance considérable dans de nombreuses industries telles que l'ingénierie mécanique, l'automobile et l'aéronautique.

Le secteur de la tôlerie utilise actuellement un large éventail de méthodes de production, car les composants produits par ce type de formage peuvent varier en taille, en forme et en complexité. Les opérations mécaniques telles que le poinçonnage, le cisaillement, le grignotage et le pliage profond étaient souvent utilisées dans le passé. Les circonstances existantes dans chaque processus (principalement les caractéristiques de la machine) exigeaient une taille de lot plus importante et une diversité de produits plus réduite. Le marché a évolué, tout comme les équipements, qui sont devenus plus adaptables, plus efficaces et plus avancés sur le plan technologique. L'avènement de nouvelles techniques de fabrication, telles que la découpe au laser, la découpe au jet d'eau et autres, a par contre eu un impact puisque ces procédés de fabrication sont également appropriés pour la fabrication de produits en tôle aux formes compliquées et irrégulières. Les procédures de finition telles que l'ébavurage des bords et le rognage de la tôle laissée par les processus intermédiaires font également partie des opérations de mise en forme de la tôle.

La grande tendance actuelle est axée sur l'intégration de nombreux types de technologies pour répondre aux deux objectifs de réduction des coûts et d'amélioration de la qualité (information, informatique, simulation et optimisation, planification, connaissance, etc.). Cette méthodologie doit être utilisée en conjonction avec une approche multidisciplinaire comprenant la science et la technologie des matériaux, la technologie de l'outillage, l'ingénierie de la fabrication, ainsi que la conception et la planification des processus. Elle doit également supposer une pensée innovante et une volonté d'expérimentation. Les processus de conception actuels sont basés sur des simulations numériques utilisant des programmes commerciaux d'éléments finis tels que : Abaqus, LsDYNA, ansys, pamstamp, autoform, stampack et autres, qui ont été largement utilisés dans différents secteurs de l'industrie du formage, en particulier le formage de la tôle. Par conséquent, la simulation de la mise en forme des tôles est devenue un outil important pour évaluer et optimiser les opérations de formage [1-3].

1.2 Retour élastique

Bien que les délais de développement et de fabrication aient été réduits, les normes de qualité ont été maintenues, voir améliorées. Les tolérances trop serrées en sont un exemple. Les déformations indésirables, l'imprécision des angles de pliage, et de la géométrie, l'amincissement des parois, l'aplatissement, les plis et les fractures, ainsi que d'autres défauts et défaillances sont courants dans les pièces en tôle.

Cependant, l'un des principaux problèmes du formage des tôles métalliques est le phénomène du retour élastique (Figure 1.1). Une approche simple de la définition du retour élastique est le changement dimensionnel qui se produit dans la forme de la pièce traitée après le retrait de l'outil ou du poinçon. Lorsque la pièce se sépare de l'outil, les contraintes résiduelles dans la pièce sont libérées et affectent sérieusement la précision dimensionnelle. Ce retour élastique entraîne des déviations par rapport à la forme finale souhaitée, de sorte que la forme de la pièce après le retour élastique est hors tolérance et ne convient plus à l'application pour laquelle elle a été conçue.

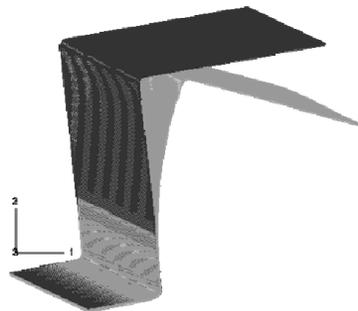


Figure 1. 1 : Exemple de déformées obtenues après l'étape d'emboutissage (simulation par éléments finis) d'une géométrie en « Oméga » [1],

L'apparition du retour élastique dans le processus de mise en forme des tôles métalliques notamment dans le procédé d'emboutissage et de pliage affecte de manière significative la précision des pièces déformées. La prédiction précise du retour élastique est l'une des problèmes les plus importants dans ces procédés de mise en forme. Beaucoup de recherches ont été faites sur ce sujet au cours des dernières années [2-7].

Divers travaux (Pourboghrat et Chu, 1995 [8] ; Li et al., 2002 [9] ; Geng et Wagoner, 2002 [10], etc.) montrent que le phénomène de retour élastique est également sensible à une gamme de paramètres de matériaux tels que la composition chimique, taille des grains, la texture et l'épaisseur de la tôle, et de

paramètres de processus comme l'effort de serrage, la vitesse de mise en forme, la nature du contact entre les outils et la tôle (avec ou sans frottement), ainsi que des paramètres géométriques, tels que les rayons de courbure des outils et la course du poinçon, et ainsi des paramètres numériques (la nature, le nombre et la taille de maillage, le nombre de points d'intégration, le schéma d'intégration, etc.).

Cho et al. [11] furent parmi les premiers à étudier l'effet de certains paramètres tels que les rayons du poinçon et de matrice, le jeu entre poinçon et matrice et le coefficient de frottement sur le retour élastique dans le processus de pliage en U par l'utilisation de la méthode des éléments finis (FEM). Dans les expériences de pliage en U réalisées par Samuel [12], le retour élastique augmente avec l'augmentation du rayon du poinçon et la diminution du rayon de la matrice. Ceci est en accord avec les travaux réalisés par Yoshida et al.[13]. La figure 1.2 montre l'influence du rayon de la matrice sur le retour élastique [14].

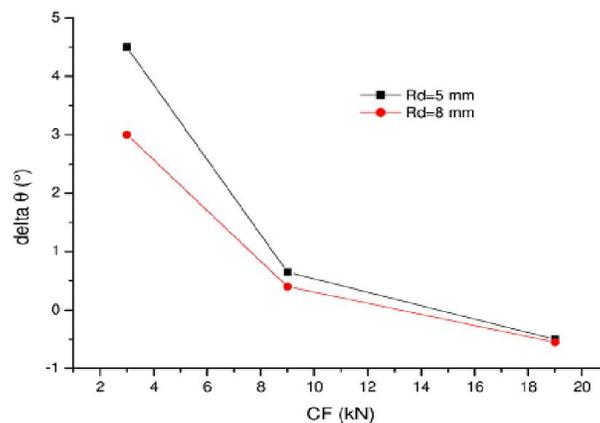


Figure1. 2 : L'effet du rayon de la matrice sur le retour élastique [14],

Garcia-Romeu et al. [15] ont fait une prédiction du retour élastique pour des pièces en tôle d'aluminium et d'acier inoxydable pliées en air (V) par l'utilisation du réseau de neurones. Cette étude a permis d'observer que la quantité du retour élastique dépend du rayon de pliage et des propriétés mécaniques des matériaux mise en forme. Donc, Cette tendance a également été démontrée expérimentalement dans le processus de pliage à l'air réalisé par Verma et al. [16] ou ils ont mené une étude analytique sur le pliage simple d'un acier à haute résistance et ont constaté que l'épaisseur de la tôle a un impact important sur le retour élastique. Une augmentation de l'épaisseur de la tôle entraîne une réduction du retour élastique.

Samuel [12] a également étudié l'effet de frottement sur le retour élastique. Il a observé que le retour élastique diminuait avec l'augmentation du coefficient de frottement. Aussi, Li et al. [9] ont réalisé

une simulation d'étirage-plier et ont donné les mêmes résultats concernant le coefficient de frottement. Selon Carden et al. [17] le frottement a une influence presque négligeable sur la quantité de retour élastique des trois matériaux différents étudiés (acier doux, acier à haute résistance et alliage d'aluminium).

De nombreux chercheurs ont signalé que l'anisotropie basée sur la texture et l'anisotropie induite par la déformation (effet Bauschinger) affectent le retour élastique [18] [19], ils ont étudié l'effet de l'anisotropie sur le retour élastique pour toutes les directions de laminage et ils ont trouvé que la direction de laminage (la texture) a aussi une grande influence. Verma et al. [16] ont évalué l'effet de l'anisotropie sur la quantité de retour élastique. Une simulation numérique a été réalisée avec le critère de plasticité de Hill-48 et un écrouissage isotrope et il a été démontré que le retour élastique augmentait avec l'anisotropie.

Selon les travaux de Mori et al. [20] le comportement du retour élastique des tôles d'acier à très haute résistance lors du pliage a été étudié dans des conditions contrôlées à l'aide d'une servopresse CNC. Bien que les tôles d'acier à très haute résistance soient intéressantes pour réduire le poids des voitures, le retour élastique des tôles d'acier à très haute résistance lors du formage est très important en raison de leur résistance élevée. Les effets du matériau, de l'épaisseur, de la vitesse de mise en forme et du temps de maintien sur la quantité de retour élastique dans le pliage en V ont été examinés. Le retour élastique de la tôle d'acier à très haute résistance lors du pliage en V était beaucoup plus important que celui de la tôle d'acier doux. Les effets de la vitesse de mise en forme et du temps de maintien étaient faibles. La quantité de retour élastique pour les tôles d'acier était presque proportionnelle au rapport entre la résistance à la traction et le module d'élasticité. Ceci a également été validé dans les expériences réalisées par Panthi et al. [21] ou ils ont montré les influences de différents paramètres sur le retour élastique dans un processus de pliage de tôle. Il a été démontré que le retour élastique augmentait avec l'augmentation de la limite d'élasticité et la diminution du module d'élasticité.

Les études expérimentales de Wagoner et al. [22] ont montré que le retour élastique dépend de nombreuses variables, telles que: le module d'élasticité, le comportement du matériau, l'épaisseur, le facteur de durcissement, la limite d'élasticité et les paramètres du processus de mise en forme. En général, le module d'élasticité du matériau diminue lorsque la déformation augmente. À cet égard, différents auteurs ont montré que le module d'élasticité a une forte influence sur le comportement de retour élastique, en particulier lorsque la tôle d'acier est soumise à de grandes déformations pendant le formage. La quantité de retour élastique pendant le déchargement dépend du module de Young du matériau, par exemple, dans l'analyse du formage de la tôle, il est courant de supposer que le module élastique reste

constant ; cependant, des recherches expérimentales ont révélé que les constantes élastiques d'un matériau peuvent changer pendant la déformation plastique [22].

Fei et al. [23] ont étudié expérimentalement et numériquement le comportement du retour élastique dans le procédé de pliage à l'air en V, pour l'acier TRIP laminé à froid. L'effet d'épaisseur et du module d'Young sur le retour élastique a été présenté dans cette étude ; et le procédé de pliage en air (V) est simulé par la méthode des éléments finis implicite dans le code Abaqus/standard. Les résultats montrent que le retour élastique est lié forcément à l'épaisseur de la tôle, et la variation de module d'Young avec la déformation plastique donne une bonne corrélation entre l'analyse numérique de simulation de retour élastique et les résultats expérimentaux.

Le comportement de récupération inélastique de l'acier TRIP et son effet sur le retour élastique ont été étudiés par Hai Yan Yu [24]. Pour simuler le retour élastique dans le procédé de formage en U, une expression empirique décrivant la relation entre le module d'élasticité avec la déformation plastique a été proposée. Ensuite, elle a été mise en œuvre dans le logiciel LS-DYNA. La comparaison montre que la simulation du retour élastique avec un module d'élasticité variant est plus précis que celui d'un module d'élasticité constant. Donc, l'effet de la récupération inélastique sur le retour élastique doit être pris en considération afin d'obtenir une simulation plus précise. Le comportement de récupération inélastique des aciers TRIP pendant le déchargement a été étudié par des essais de traction uniaxiale.

Tekaslan et al. [25] ont étudié le retour élastique dans le procédé de pliage. Pour étudier le retour élastique, 15 différentes matrices ont été préparées, plus de 150 échantillons, dont chacun a été plié au moins 10 fois, et les angles obtenus ont mesurés avec le profilomètre. Les résultats acquis ont été évalués statistiquement dans un support informatique et convertis en graphiques. Ils montrent que le retour élastique diminue proportionnellement avec le temps de maintien de la charge du poinçon sur la tôle métallique. Néanmoins, il a été observé qu'il s'est produit des différences importantes à des positions où le poinçon se trouve complètement à l'intérieur de la matrice. Donc, on sait que le retour élastique dépend des paramètres du matériau et du procédé.

L'influence du comportement de déformation à faible contrainte sur le rayon de courbure de la paroi latérale et le retour élastique dans les aciers à haute résistance (AHSS) a été évaluée à l'aide d'un essai de pliage [26]. Cette influence a été examinée en traitant thermiquement deux aciers pour induire un allongement à la limite élastique, tout en maintenant une résistance à la traction relativement constante et une épaisseur de tôle constante. Il est démontré que, les connaissances actuelles limitent la prédiction de

ces deux variables en pliage en utilisant uniquement l'épaisseur initiale de la tôle et la résistance à la traction, le comportement d'élasticité et d'érouissage peut affecter les résultats.

M.Firat [27] a utilisé une méthode des éléments finis pour la simulation des procédés de mise en forme des tôles. Un modèle d'érouissage cinématique est décrit dans le but d'améliorer la déformation des tôles métalliques. L'analyse par des éléments finis de forme en U (Numisheet 93) est réalisée en utilisant l'analyse éléments finis implicite basée sur le modèle d'érouissage cinématique. Une comparaison de la géométrie après le retour élastique, prédit avec le modèle actuel, elle indique une amélioration significative.

Dans les travaux de Dongjuan et al. [28] une équation contrainte-déformation a été proposée, selon la loi de comportement non-linéaire de Lemeitre et Chaboche et le critère de plasticité de Barlat 89. Prenant une référence l'expérience de Benchmark Numsheet 93, l'effet des lois de comportement et des critères de plasticités sur le retour élastique a été étudié. Les résultats montrent que les critères de plasticités de Barlat89 et de Hill48 expliquent mieux le comportement du matériau que le critère de plasticité de Von-Mises. Plusieurs modèles d'érouissage sont évalués en ordre pour déterminer leurs influences sur la prédiction numérique du phénomène de retour élastique. Les résultats du retour élastique montrent qu'il y a une sensibilité à la modélisation d'érouissage [29].

Jiang et al. [30] ont proposé une méthode d'optimisation pour obtenir une force de serrage variable optimale dans le formage en U, avec un coefficient de frottement incertain. Ils ont utilisé une méthode des éléments finis pour simuler le processus de formage. Les résultats indiquent que la méthode présentée peut trouver la force de serrage variable juste pour obtenir à la fois un petit retour élastique sous le coefficient de frottement incertain.

Yanagimoto et al. [31] ont étudié le phénomène du retour élastique dans des procédés de formage à chaud. Des essais, charge-décharge de traction des tôles d'acier à haute résistance dans une plage de température élevée sont effectués en utilisant une machine d'essai de fatigue. À partir des courbes de contrainte-déformation obtenues par les essais, on constate que la diminution brusque du retour élastique des tôles formées à environ 750 K dans des essais isothermes de pliage en V est causée principalement par fluage à haute température transitoire de déformation. En outre, à partir des résultats obtenus par le test isothermes de pliage en V, la déformation pliage-dépliage observée à des températures supérieures à 750 K, à la suite de fluage à haute température, a été trouvé pour avoir un effet secondaire sur le phénomène du retour élastique.

Panthi et al. [21] ont fait une analyse par éléments finis du procédé de pliage des tôles métallique pour la prédiction du retour élastique, et ils ont étudié l'effet des paramètres géométriques (l'épaisseur de la tôle, rayon de courbure de la matrice, ...), des propriétés de matériau (module de Young, contrainte de déformation, ...), et de frottement sur le retour élastique. Ils ont trouvé que le retour élastique est très dépendant de paramètres géométriques et de propriétés de matériau dans des conditions minimales de charge, alors qu'il diminue avec l'augmentation de profondeur. Il est augmenté avec l'augmentation de contrainte de déformation, et il est diminué quand le module de Young augmente. Ainsi qu'il est augmenté avec l'augmentation d'angle de pliage. Tandis que le frottement a une influence négligeable sur le retour élastique.

Vasudevan et al. [32] ont étudié l'influence des paramètres du processus tels que l'épaisseur du revêtement, l'orientation de la tôle, le rayon du poinçon, le rayon de la matrice, l'ouverture de la matrice, la vitesse du poinçon et le déplacement du poinçon sur le retour élastique pendant le pliage en air d'une tôle d'acier électro-galvanisée. Ils ont constaté que le retour élastique augmente avec l'augmentation de tous ces paramètres.

Une prédiction numérique du retour élastique des aciers à haute résistance a été proposée par Vorkov et al. [33] pour voir l'influence des paramètres numériques (nombre de points d'intégration sur l'épaisseur pour le modèle de coque et le nombre d'éléments pour le modèle solide) sur le comportement de retour élastique, les résultats ont été validés expérimentalement en surveillant le processus de pliage à l'aide d'un système de caméra qui est aligné avec la ligne de pliage. La coque et les modèles solides utilisés donnent des résultats avec la précision requise.

De plus, Buang et al. [34] ont mené des expériences dans le processus de pliage à l'air en V de la tôle d'acier inoxydable pour étudier l'effet des rayons de la matrice et du poinçon sur le retour élastique. Ils concluent que le retour élastique diminue lorsque les rayons de la matrice et du poinçon diminuent. Krinninger et al. [35] ont présenté des investigations expérimentales sur le processus de pliage en air de deux matériaux en acier, pour étudier les paramètres importants affectant le retour élastique. Ils ont constaté que les grands rayons de pliage en combinaison avec les grands angles de pliage provoquent un retour élastique énorme par rapport aux petits angles et rayons de pliage, et l'influence de la vitesse du poinçon ne doit pas être négligée dans le processus de conception des outils de pliage, sinon, la précision dimensionnelle requise ne peut pas être réalisée. Aussi, Karaağaç [36] en utilisant le processus de flexion pour le pliage en V des matériaux en tôle AL1050-0 et AL5754-0 est étudié expérimentalement les effets de la pression de formage, l'angle de la matrice et le temps de maintien sur le comportement de retour

élastique, il a été déterminé que l'angle de la matrice et le temps de maintien influencent considérablement le retour élastique.

Une prédiction expérimentale du retour élastique de l'alliage aluminium-magnésium 5083-H111 à température froide et chaude a été proposée par Ozturk et al. [37] pour voir l'influence de la température sur le comportement du retour élastique, les résultats ont montré que le retour élastique diminue avec l'augmentation de la température. De même, Sarikaya [38] analyse l'effet du traitement thermique sur le retour élastique dans le processus de pliage en V de l'aluminium, les deux méthodes expérimentales et numériques sont utilisées. Il est constaté que la quantité de retour élastique dépend du mode de traitement thermique. Verma [39] a étudié l'effet des paramètres du processus de formage à chaud sur le retour élastique de trois alliages d'aluminium. Les résultats ont révélé que le retour élastique diminuait lorsque la température était augmentée de la température ambiante à 250 °C.

Dans le but d'étudier le comportement du retour élastique dans les micro-pièces en tôle, Wan-Adlan Wan Nawang et al. [40] ont réalisé une étude concernant l'influence de la direction de laminage du matériau sur le retour élastique dans le cas de pièces pliées en forme de W. Des micro-pièces de pliage ont été formées en utilisant des bandes d'acier inoxydable recuit 316 L d'une épaisseur de 50 μm , 75 μm et 100 μm respectivement. Les comportements de traction et de flexion des pièces ont été observés au cours de l'expérience en tenant compte de l'effet de la direction de laminage et des erreurs liées à l'effet de taille. Les résultats ont révélé que divers paramètres influencent le retour élastique, tels que l'épaisseur de la tôle, la force appliquée, la direction de laminage du matériau et le temps de maintien pendant la déformation de la tôle. L'ampleur du retour élastique a également été observée aléatoire entre les pièces fabriquées avec le même matériau.

Pour évaluer l'effet du retour élastique, Gite et al. [41] ont présenté une analyse par éléments finis suivie d'une validation expérimentale. Divers paramètres tels que le rayon de la matrice, le rayon du poinçon, la profondeur de la déformation, sont considérés pour évaluer l'effet de retour élastique. Slota et al. [42] ont montré une prédiction expérimentale et numérique du retour élastique dans le processus de pliage en V d'une tôle anisotrope. Des études expérimentales et numériques des effets de paramètres importants, y compris l'épaisseur de la tôle, l'anisotropie de la tôle et le rayon du poinçon, sur le retour élastique dans les processus de pliage en U de tôles en trois matériaux différents ont été menées par Shah et al. [43].

Younis et al. [44] ont effectué une analyse numérique pour trouver les paramètres optimaux qui réduisent le retour élastique dans le pliage en U. Les résultats obtenus ont montré que la vitesse du

poinçon, la direction de laminage et le temps de maintien ont un impact plus important sur le retour élastique. De plus, Abed [45] a appliqué la méthode Taguchi pour trouver les paramètres de pliage optimaux (vitesse du poinçon, temps de maintien et l'orientation du matériau) pour obtenir le retour élastique le plus faible sur un alliage aluminium-silicium (Al-Si). Les résultats montrent que le facteur significatif est l'orientation du métal, suivi de la vitesse du poinçon et du temps de maintien. Aussi, Abed [46] a étudié l'effet du temps de maintien sur le phénomène de retour élastique dans un processus de pliage de matrices en V.

Ahirwar et al. [47] ont examiné l'effet de différents jeux entre le poinçon et la matrice sur le retour élastique d'un matériau en tôle d'acier avec différentes épaisseurs et une force variable du serre-flan. Ils observent que le retour élastique augmente lorsque le jeu entre le poinçon et la matrice augmente. Lu et al. [48] ont mené des études expérimentales et numériques pour étudier l'effet de la pression de compression et du rayon du poinçon sur le retour élastique pour un alliage d'aluminium. Il est montré que le retour élastique diminue lorsque le rapport entre la pression moyenne et la résistance à la traction augmente, et lorsque le rapport est petit; le retour élastique augmente légèrement quand le rayon du poinçon augmente de 8 mm à 16 mm.

Pour déterminer les paramètres optimaux qui réduisent le retour élastique, Choudhury et Ghomi [49] ont étudié l'effet de différents paramètres de processus tels que l'angle de pliage, l'épaisseur de la tôle, le type de matériau, la texture du matériau, la vitesse du poinçon, le temps de maintien du poinçon, la largeur de la tôle, le rayon du poinçon, la lubrification, le formage à chaud et le pliage répété, sur le retour élastique d'une tôle d'aluminium lors d'une opération de pliage en V. Le temps de maintien du poinçon, le type de matériau et la lubrification se sont avérés être les facteurs les plus significatifs affectant le retour élastique.

L'effet du rayon de poinçon et de l'épaisseur de la tôle sur le retour élastique dans le procédé de pliage en V a été réalisé par Kartik et al. [50]. Ils ont fait une simulation numérique de ce procédé en se basant sur la méthode des éléments finis pour estimer la quantité de retour élastique et pour analyser l'effet de ces paramètres de procédé. Les résultats obtenus montrent qu'il y a une réduction de retour élastique quand le rayon de poinçon diminue et l'épaisseur de la tôle augmente.

Gil et al. [4] ont étudié l'influence de la pression qui dépend de coefficient de frottement sur la prédiction numérique de retour élastique dans le procédé d'emboutissage, d'un acier doux DX54D, et un acier à haute résistance HSLA380 et DP780. Les résultats montrent une importante différence entre la pression définie qui dépend de coefficient de frottement et le coefficient de frottement constant.

La prédiction exacte et le contrôle du retour élastique sont essentiels pour la conception d'outils pour la mise en forme des tôles. Wenjuan et al. [51] ont proposé une technique basée sur le réseau neurones artificiels et un algorithme génétique pour résoudre le problème du retour élastique. Les résultats montrent que la prédiction plus précise de retour élastique peut être obtenue avec le modèle GA-ANN.

Les effets des paramètres géométriques et des caractéristiques d'érouissage du matériau sur la quantité du retour élastique dans le processus de pliage des tôles ont été présentés par Kazan et al. [52]. Aussi, le modèle de prédiction du retour élastique est développé en utilisant les réseaux neurones, plusieurs simulations numériques en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) ont été effectuées pour obtenir les données data du réseau neurones. Les résultats montrent que la cohérence entre le simulateur EF et les résultats du modèle de réseau est obtenue par erreur relative inférieure à 0,8 % et 9 %, respectivement. On considère qu'un modèle des réseaux neurones bien formé fournit des résultats rapides et cohérents, cela en fait un outil facile à utiliser dans l'étude préliminaire de telles procédures des problèmes d'ingénierie. Cette approche d'étude peut être prise en compte comme alternative, pratique et rapide pour évaluer les paramètres de procédure.

1.3 Procédures de caractérisation du retour élastique

La formabilité fait référence à la capacité des matériaux à se déformer à travers différents processus de mise en forme (laminage, étirage, pliage, etc.). Ces processus de fabrication se basent sur la déformation plastique pour former ou modifier la forme des pièces métalliques. La formabilité ne peut être définie en termes d'une seule propriété du matériau, car elle dépend du processus de formage et de l'épaisseur de la tôle. En outre, plus la capacité de formage est élevée, plus la limite d'élasticité est faible et plus la capacité du matériau à résister à des conditions de déformation plastique sans fracture est élevée. Le durcissement par déformation est un avantage tant qu'il n'est pas excessif, car il évite les déformations localisées.

Ces dernières années, plusieurs techniques et procédés qui sont développés pour étudier et caractériser les effets du retour élastique dans les tôles métalliques, dans le but d'atteindre la forme désirée de produit. En général, parmi les procédés et les tests expérimentaux, les plus utilisés et les plus connus comme méthodes attractives et intéressantes dans le domaine de mise en forme, sont le procédé d'emboutissage (l'emboutissage en U ou le procédé d'étirage-plier dans un autre terme, etc.), et le procédé de pliage (plier en V, pliage rotatif, ou pliage à tombée de bord, pliage à l'air comme présentés sur la figure 1.3 respectivement). Ces méthodes sont intéressantes, car les niveaux de retour élastique sont importants et peuvent être facilement mesurés. Afin de prédire la sensibilité du retour élastique, des

paramètres de base tels que le rapport entre le rayon de l'outil et l'épaisseur du matériau (R/t), les propriétés mécaniques du matériau et les paramètres de contact ont généralement été étudiés. Le facteur commun et important entre la plupart de ces méthodes et procédés de mise en forme est que le dispositif de mise en forme est simple et n'est pas coûteux, il est constitué en général d'une matrice ayant la forme finale requise, un poinçon qui dirige et pousse la tôle pour prendre la forme de la matrice et un serre-flan qui effectue le serrage de l'éprouvette pendant le procédé de formage.

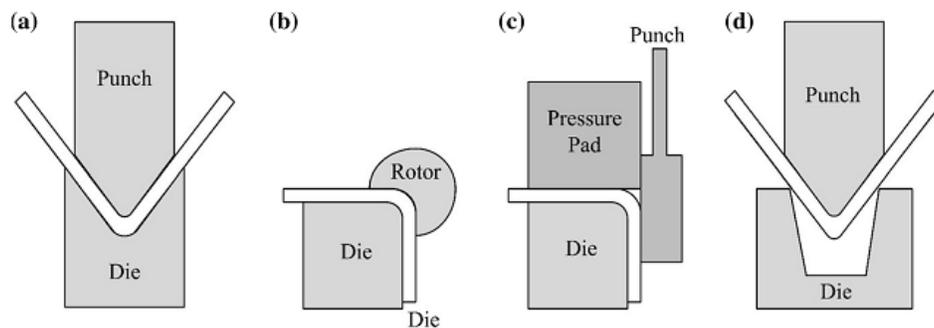


Figure 1. 3 : Processus de pliage : a) pliage en V, b) pliage rotatif, c) pliage par tombée de bord, d) pliage en air [53],

1.3.1 L'emboutissage

L'emboutissage est une technique de mise en forme souvent employée dans l'industrie automobile pour créer des carrosseries et des éléments de structure (traverses, longerons, etc.). Il s'agit de créer des tôles minces aux formes complexes par déformation plastique, à chaud ou à froid. Le retour élastique et les autres défauts liés à la géométrie des composants sont fréquents dans cette méthode. Cela est dû à la déformation élastique du matériau après le processus d'emboutissage. Il s'agit de la libération de l'énergie élastique qui a été accumulée pendant le processus de chargement, ce qui entraîne une modification de la forme de la pièce emboutie.

Le mouvement d'un poinçon enfoncé dans une matrice est utilisé pour façonner la tôle dans ce procédé. Un serre-flan maintient la tôle contre la matrice (figure 1.4). L'emboutissage se fait généralement à température ambiante avec une presse mécanique ou hydraulique. Le type de presse disponible dans l'atelier (force de serrage, taille), la forme de la pièce, le matériau (acier standard, acier à haute résistance, aluminium, etc.), le nombre total d'opérations nécessaires pour obtenir la pièce finale, etc. influencent le choix du processus.

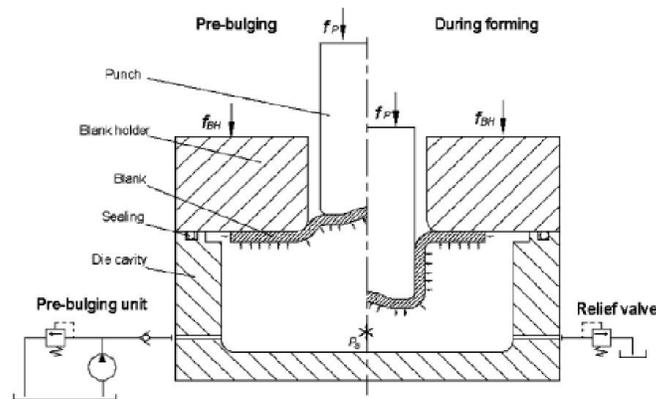


Figure1. 4 : Emboutissage hydromécanique [54],

De nombreux matériaux, notamment l'acier doux, extra-doux et inoxydable, l'aluminium et les alliages d'aluminium, le cuivre et les alliages de cuivre, ainsi que d'autres métaux ductiles, sont formés à l'aide de cette méthode. L'emboutissage permet de créer des pièces de formes et de tailles diverses, allant des plus simples, de forme cylindrique peu profonde, à celles aux formes asymétriques compliquées.

Les tôles minces, souvent appelées flans, sont des tôles dont l'épaisseur est inférieure à 3 mm. Ce processus de mise en forme est réalisé sur une presse à l'aide d'un outillage (figure 1.5) dont la configuration influe sur l'impact sur le flan. Cette configuration a deux perspectives. Le modèle le plus basique, qui se compose principalement d'une matrice et d'un poinçon. Par contre, l'autre modèle contient un serre-flan en plus du modèle simple. Donc, l'outillage utilisé pour l'emboutissage est composé d'un poinçon glisse plus ou moins rapidement le long de l'axe vertical, déformant la tôle, et une matrice qui est l'équipement qui soutient la tôle et lui donne sa forme extérieure définitive avec le retour élastique. Un serre-flan, son rôle est de maintenir le flan en place tout au long du processus d'emboutissage afin de garantir un écoulement régulier du métal et d'éviter le risque de plis ou d'autres défauts d'emboutissage, et autres éléments qui définissent le type de presse.

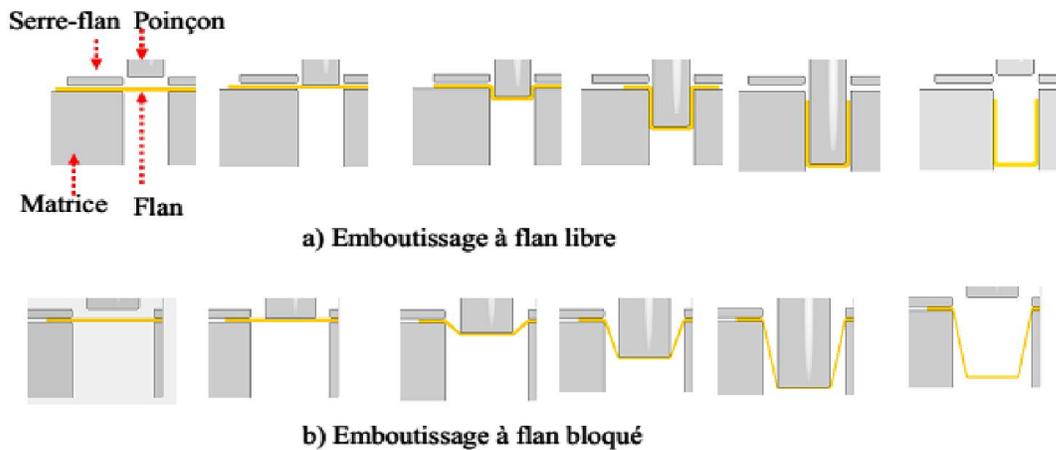


Figure1. 5 : Plan schématique d'un outillage d'emboutissage [55],

Afin d'éviter que la tôle ne soit écrasée par le poinçon dans la matrice, il doit y avoir un espace fonctionnel entre ces deux parties [56].

Le type et la forme des outils, la lubrification et les propriétés structurales de la tôle sont autant d'éléments interconnectés qui affectent l'efficacité d'un emboutissage si la section utilisable du composant ne présente pas de défauts visibles en volume ou en surface.

1.3.1.1 L'emboutissage (étirage-plier) en U

L'essai d'emboutissage en U (U bending test) ou l'essai dit « oméga » est l'un des principaux tests rencontrés pour étudier expérimentalement le retour élastique (figure 1.6). Il est présenté comme un problème de Benchmark à la conférence de Numisheet 93. Cet essai est considéré parmi les essais les plus intéressants dès que les conditions de formage, pendant le formage, l'emboutie subie plusieurs modes de déformation (étirage, pliage et dépliage) au niveau du rayon de l'outil, qui engendre plus de contrainte donc une augmentation de la quantité du retour élastique, et ceci explique le courbement des parois latérales de l'emboutie. C'est pour cette raison l'emboutissage en U sera un outil de vérification significatif du retour élastique, et il y a plusieurs travaux qui ont confirmé l'utilisation de ce test et ils ont adopté cet essai expérimental dans leurs études pour la prédiction et la quantification du retour élastique [57] [14]. Donc l'analyse de ce mode d'emboutissage nous permet de remarquer que, la pièce est maintenue en traction pendant le pliage. Le moment de flexion nécessaire pour déformer plastiquement la tôle diminuera à mesure que la traction combinée sur la tôle augmentera, en raison de la flexion des fibres les plus externes et de la traction appliquée. Par conséquent, le retour élastique, qui résulte des contraintes non-uniformes dues à la flexion, diminuera également. Cette technique est utilisée pour limiter le retour élastique lors du formage par étirage de carrosseries de grande profondeur dans les automobiles.

L'essai d'étirage-plier consiste en deux actionneurs orientés à 90° l'un par rapport à l'autre, provoquant un contact direct du matériau avec le poinçon (rouleau) qui est l'outil avec lequel le processus de pliage est effectué ; dans ce cas, un actionneur fournit la force de retenue permanente, tandis que l'actionneur arrière applique une vitesse de déplacement constante à la pièce en la faisant s'étirer sur le rayon du poinçon en la soumettant à une charge de traction, à une flexion et à une inflexion.

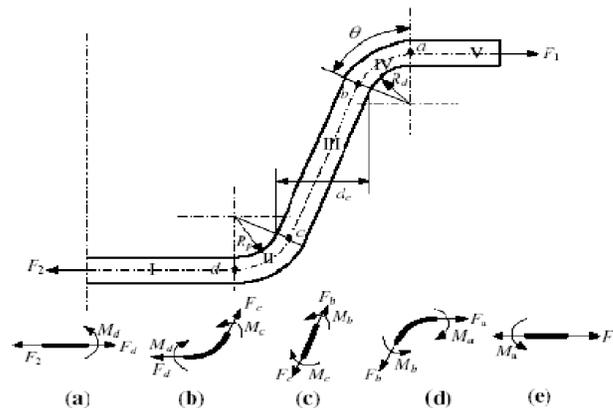


Figure1. 6 : Le schéma de pliage – étirage en U [28],

L'essai d'étirage-plier est utilisé pour étudier comment le retour élastique est réduit et contrôlé lorsqu'un matériau est sollicité [14] [58]. Le matériau est serré par un serre-flan et déformé par le déplacement d'un poinçon (semi-cylindrique ou cylindrique) sur une distance spécifiée, comme le montre la figure 1.7.

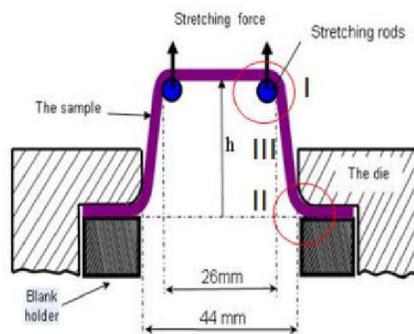


Figure1. 7 : Principe de l'essai étirage-plier d'une tôle métallique [14],

Le mot « blankholder » ou anneau d'arrêt « drawbend » sont utilisés pour restreindre l'écoulement de matériau, ce qui peut être considéré comme un mécanisme de contrôle local, limitant le flux de matériau à une force de poinçonnement relativement faible. Les différences de profondeur d'étirage et de changement d'angle sont calculées en permanence entre le début et la fin lors du chargement et du

déchargement. Enfin, le retour élastique est caractérisé sous les deux paramètres mesurés des différences Δh et $\Delta\theta$ après la fin de l'essai (Figure 1.8).

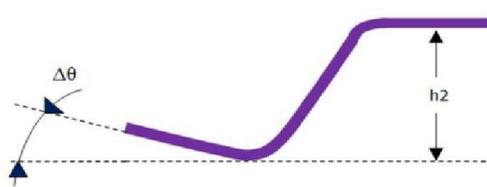


Figure1. 8 : Mise en évidence du retour élastique final après enlèvement de l'outillage et libération totale de la pièce ($\Delta h_2 = h - h_2$), et $\Delta\theta$ [14],

1.3.1.2 Emboutissage S-rails

Dans le but de se rapprocher des conditions industrielles et d'augmenter la déformation plastique de la pièce déformée, l'essai d'emboutissage en S-rails (Numisheet 93) a été étudié en particulier par Lee et al. [59] et Oliveira et al. [60], ce protocole expérimental nous a permis d'étudier le retour élastique sur des pièces ayant des dimensions plus grandes celles dans l'industrie.

Neto et al. [61] ont présenté une étude qui traite l'analyse expérimentale et numérique d'un composant en rail ayant une grande tendance au développement des plissements et de retour élastique (Figure 1.9). Ils ont utilisé deux matériaux différents, un acier doux ((DC06) et un acier à double phase (DP600). Le comportement au frottement entre chaque tôle métallique et les outils de formage est évalué par le test de la matrice plate, permettant la détermination d'un coefficient de frottement en fonction de la pression normale. L'influence des conditions aux limites appliquées sur les résultats numériques est évaluée au moyen de deux modèles numériques distincts (une géométrie complète du flan et 1/4 du flan avec conditions de symétrie). Les résultats montrent que le comportement de plissement est fortement affecté par le matériau du flan, ainsi que par les conditions de symétrie définies dans le modèle numérique. En effet, compte tenu du modèle complet du flan, les résultats numériques sont en meilleur accord avec les résultats expérimentaux. Cependant, le temps de calcul de la simulation numérique en tenant compte du flan complet est considérablement plus élevé que l'utilisation de 1/4 du flan.

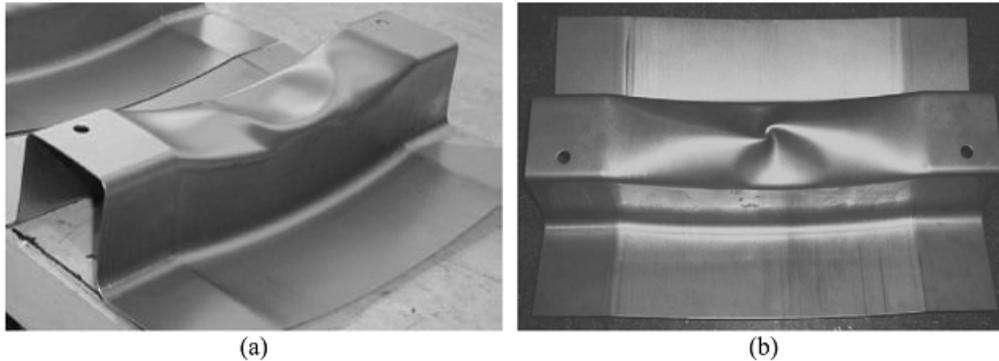


Figure1. 9 : Géométrie expérimentale du rail après avoir été retiré des outils de formage: (a) DC06; (b) DP600; deux trous sont découpés sur le haut du rail, comme points de référence pour fixer la pièce pendant la mesure [61],

Dans un autre travail, Noder et al. [62] ont fait des essais de formage à chaud non isotherme sur des éprouvettes en forme de rail de la série AA7xxx à deux températures initiales différentes du flan (187 °C et 253 °C) avec un outillage à température ambiante, dans le but de déterminer l'effet de l'exposition à la chaleur sur la résistance de la pièce formée. Des simulations d'éléments finis thermo-mécaniques non linéaires sont réalisées, du processus de formation non isotherme. Les résultats obtenus montrent que la combinaison de la température (233°C) et de l'exposition à la chaleur (300s) n'est pas appropriée pour l'alliage étudié en termes de résistance de la pièce formée. Des recherches sur des méthodes de chauffage alternatives permettant de réduire l'exposition à la chaleur sont prévues.

Yanagimoto et al. [63] ont réalisé un formage à chaud isotherme d'une géométrie en forme de rail (Figure 1.10) avec du AA6061-T4. Les tests ont été effectués à une gamme de température de 20 °C et 250 °C et il a été montré que le retour élastique diminuait considérablement avec l'augmentation de la température jusqu'à 60 %. De même, une flexion isotherme a été réalisée sur le même matériau, ce qui a donné des résultats similaires.

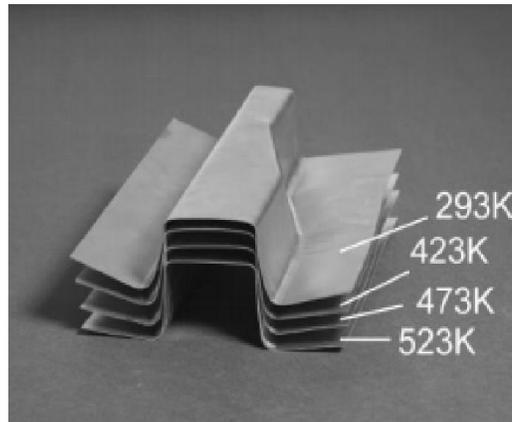


Figure1. 10 : Géométries de la forme du rail formées à différentes températures de formage [63],

1.3.1.3 Drawbend test

De nouveaux essais de mise en forme, tels que l'essai de pliage par traction ou drawbend test, sont en cours de développement pour décrire le retour élastique après pliage et laminage autour d'un rayon de matrice. Le test développé par Carden et al [17] est l'un d'entre eux. Ils proposent une expérience qui consiste à rouler une feuille de métal sur un outil circulaire et à effectuer un test de pliage/dépliage. L'essai pliage /dépliage est représenté schématiquement sur la figure (1.11). Pour trois matériaux distincts, ils ont étudié l'influence du rapport entre le rayon de l'outil et l'épaisseur de la tôle (R/e), ainsi que l'effet de frottement sur le retour élastique (un acier doux, un acier à haute résistance et un alliage d'aluminium). Ils ont découvert que lorsque le rapport (R/e) augmente, la quantité de retour élastique diminue, et que le frottement a un effet négligeable sur la quantité de retour élastique.

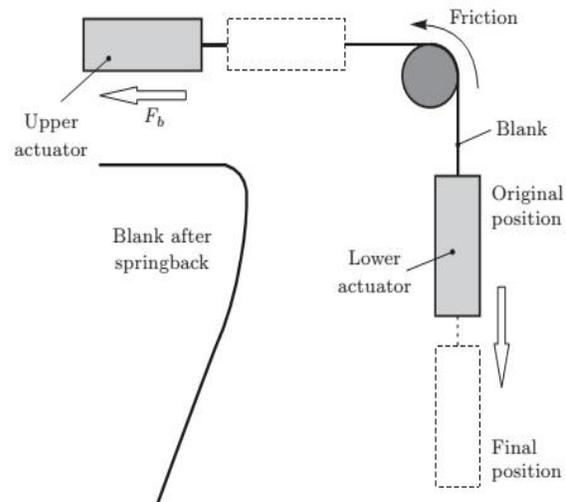
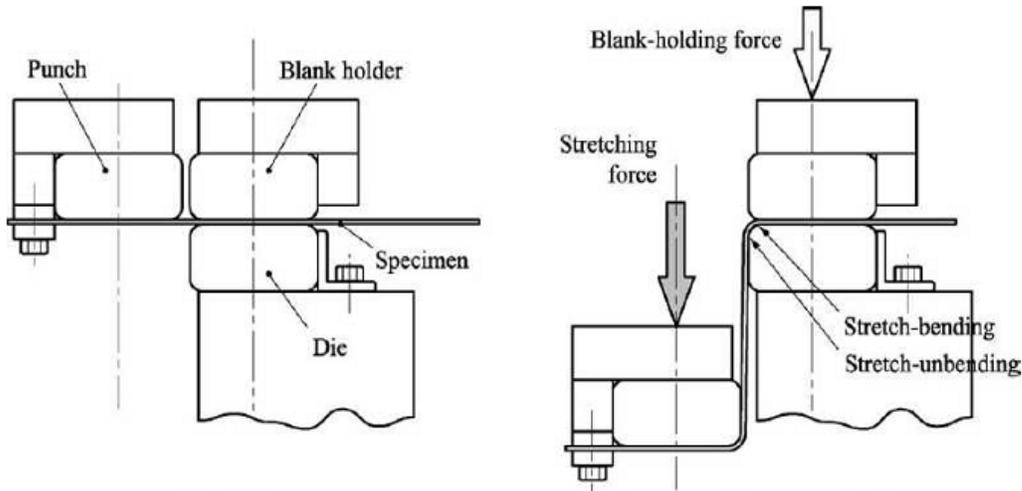
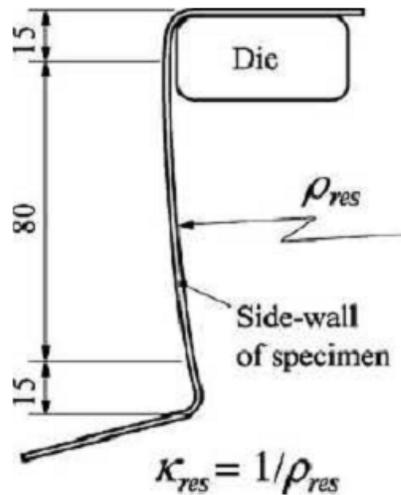


Figure1. 11 : Essai de pliage/dépliage par enroulement d'une tôle sur un outil circulaire. D'après Carden et al. [17],

Hino et al. [64] ont étudié un matériau bi-couche initialement isotrope, composé d'une couche d'aluminium A1100 et d'une couche d'acier SUS430 après la mise en forme par un essai de pliage/dépliage (figure 1.12). Les résultats obtenus montrent que la position relative des deux matériaux a une grande influence sur le retour élastique, lorsque l'épaisseur du matériau le plus dur (SUS430) est faible. Ainsi que l'effet de l'effort de serrage sur le retour élastique, affecté par cette position.



(a) L'éprouvette fixée au poinçon par l'une des ses extrémités subit un étirement et un phénomène de pliage/dépliage au niveau de la matrice.



(b) Mesure du retour élastique après libération de l'extrémité fixe.

Figure1. 12 : principe de test de Hino et al. [64],

Dans une autre étude Wang et al. [65] ont proposé un test très intéressant qui est similaire à celui de Carden et al. [17], le matériau testé est un alliage d'aluminium Al 6022-T4. Il montre l'apparition d'une courbure lors du dépliage de la tôle. Cette courbure persiste après le retour élastique si la tension dans l'éprouvette, induite par l'effort résistant, dépasse une valeur critique proche de la limite élastique. De plus, le retour élastique diminue quand l'effort résistant augmente dans l'éprouvette, tandis que la courbure anticlastique évolue à l'inverse. Ils concluent finalement que le processus de retour élastique se

rapproche d'un cas de contrainte plane plutôt que d'un cas de déformation plane, en raison de la courbure anticlastique permanente.

De plus, Nguyen et al. [66] ont étudié numériquement l'influence de différents paramètres sur le retour élastique lors d'un procédé de mise en forme (drawbending test, Numisheet 2011), tels que l'épaisseur de la tôle, les propriétés du matériau, la force de serrage, le coefficient de frottement, et la géométrie des outils. L'analyse de cette sensibilité montre que les facteurs importants influents le retour élastique sont l'épaisseur de la tôle et les propriétés du matériau, suivi par la force de serrage, conditions de frottement, et la géométrie des outils. Les résultats de la simulation numérique ont montré que le modèle de comportement du matériau est l'un des paramètres significatifs pour la prédiction du retour élastique dans la simulation numérique.

1.3.1.4 Test de Demeri

Dans le but d'estimer le retour élastique, il y a un protocole expérimental proposé par Demri [67] dit l'essai « d'ouverture d'anneau » ou « split-ring test », qui consiste à l'emboutissage d'un godet complet, puis le découper pour obtenir un anneau, cet anneau par la suite découpé verticalement, qui provoque le retour élastique qui est d'origine de la libération des contraintes résiduelles, donc l'ouverture de l'anneau.

Ily a plusieurs chercheurs qui se sont appuyés sur ce test dans leurs travaux pour étudier le retour élastique. Greze et al. [68] ont étudié le comportement de retour élastique de l'AA5754-O à des températures élevées en effectuant un essai de Demri. L'essai de Demri comme nous l'avons mentionné précédemment consiste à emboutir un godet cylindrique et à découper un anneau à une hauteur de 15 mm du fond du godet. L'anneau est ensuite ouvert par découpe et l'ouverture de l'anneau est mesurée pour quantifier le retour élastique, comme le montre la figure 1.13. Les opérations d'emboutissage ont été effectuées de manière isotherme. Il a été déterminé que le gradient de contrainte dans les parois de l'embouti diminuait avec l'augmentation de la température. Une réduction du retour élastique de 67 % a été observée lorsque la température de formage est passée de 25 °C à 200 °C. Des simulations numériques ont été réalisées en utilisant un modèle de matériau élastique-viscoélastique avec le critère de plasticité de von Mises. Les simulations ont été capables de prédire les courbes force-déplacement avec précision, mais le retour élastique a été sur-prédict de manière significative (Figure 1.14).

Laurent et al. [69] ont réalisé une étude similaire dans laquelle les godets ont été formés de manière non isotherme et des essais d'anneau ouverte ou de Demri ont été effectués sur la tôle AA5754-O. Pendant l'expérience de formage, la température du poinçon a été maintenue constante à la température ambiante et le reste de l'outillage a été chauffé à 100, 150 et 200°C. L'effet de la température était relativement faible pour 100 et 150°C, mais une réduction significative (20, 45%) a été observée à 200°C. Un modèle d'écoulement isotrope de matériau de Hockett-Sherby [70] et une loi de puissance de taux de déformation a été utilisé pour simuler les essais à anneau ouvert qui ont produit des prédictions assez bonnes.



Figure1. 13 : Godet embouti avant et après découpe de l'anneau, puis retour élastique après ouverture de l'anneau [71],

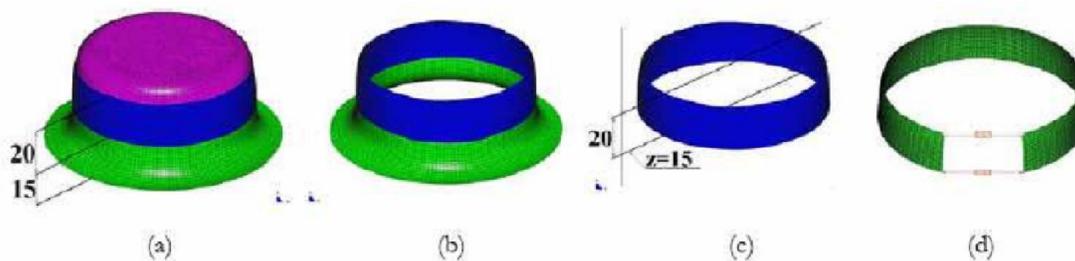


Figure1. 14 : simulation numérique de l'essai de Demri et retour élastique en trois opérations [72],

1.3.2 Le pliage

L'un des procédés les plus utilisés dans le monde industriel est le pliage de la tôle. C'est la méthode de mise en forme la plus utilisée. Bien que ce procédé soit utilisé dans l'industrie depuis longtemps, il existe peu d'études à son sujet dans la littérature. Le nombre d'articles de fond est limité, la majorité des autres étant de caractère pratique. Ils abordent cette opération de mise en forme comme une séquence fondamentale de fabrication plutôt que comme un processus industriel posant un défi scientifique. La tôle est également courbée au cours du processus de pliage. Sur une tôle maintenue par une matrice, une pièce pliée est créée par l'action verticale d'un poinçon rectiligne. La détermination de la géométrie ultime d'un composant plié est inextricablement liée aux phénomènes de retour élastique.

Le retour élastique, comme indiqué dans la section précédente, est un phénomène courant dans les opérations de pliage qui a un impact significatif sur la forme finale de la pièce. Pour être en mesure de détecter les principaux paramètres impliqués dans la valeur du retour élastique au cours du processus et de le considérer de manière appropriée, il est nécessaire de connaître en profondeur et de s'appuyer sur les définitions, les formulations analytiques et les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature.

1.3.2.1 Pliage en V

Le pliage en V est l'un des procédés les plus couramment utilisés pour étudier le retour élastique, et il y a nombreux chercheurs qui ont adopté ce protocole pour étudier le retour élastique.

Fang et al. [73] ont mené une étude sur l'affectation du retour élastique dans le procédé de micro pliage en V. Un modèle élément fini de ce procédé a été effectué par l'utilisation du logiciel commercial Abaqus/standard. La simulation numérique a été faite dans le but d'étudier l'effet de la taille des grains sur l'angle du retour élastique lors du procédé de micro pliage en V. Les résultats montrent qu'il y a une hétérogénéité de déformation lors de ce procédé, et aussi que le retour élastique augmente avec la taille des grains.

Pour voir l'effet de plusieurs paramètres (rayon de pliage, température de solidification, le rapport d'épaisseur...) sur le comportement du retour élastique de l'alliage d'aluminium 6061-T6 avec une épaisseur non uniforme dans un procédé de pliage en V, Adnan et al. [74] ont discuté l'application de la méthode de Taguchi et ils ont trouvé que le rayon de pliage et l'épaisseur de la tôle sont les paramètres les plus significatifs.

Venkatachalam et al. [75] ont étudié numériquement l'influence de la présence des trous dans la tôle, leurs tailles, leurs formes, et leurs arrangements sur l'angle du retour élastique d'une tôle d'aluminium pur dans le procédé de pliage en V (Figure 1.15). La modélisation de la mise en forme par

pliage en V a été faite par l'utilisation de la méthode des éléments finis. Ils ont montré que l'augmentation de la taille des trous provoque une diminution de l'angle du retour élastique. De plus, la forme circulaire des trous donne un retour élastique moins que la forme carré, et aussi le retour élastique de l'arrangement triangulaire de ces trous est petit par rapport à leurs arrangements carrés.

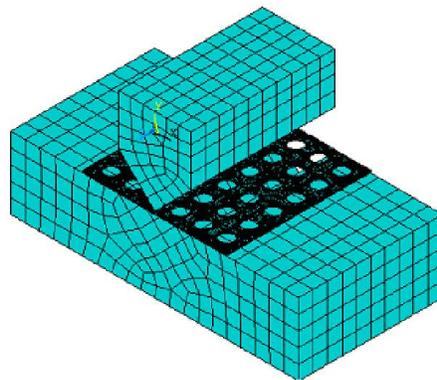


Figure1. 15 : Modélisation par éléments finis du procédé de pliage en V [75],

Pour étudier l'influence de l'anisotropie, la force de serrage et le recuit sur la valeur du retour élastique Erdin et al. [76] ont mené une étude sur la mise en forme par pliage en V d'un alliage d'aluminium 1050-H14 recuit à 120 °C pendant 20 minutes, différentes forces de serrage sont appliquées. Les résultats obtenus montrent que le recuit diminue la valeur du retour élastique dans toutes les directions d'anisotropie de la tôle d'alliage d'aluminium, et l'application d'une force de serrage a un effet significatif sur le retour élastique.

1.3.2.2 Pliage en U

Un autre essai de pliage très fréquemment utilisé pour mettre en évidence le retour élastique est l'essai de pliage en U. le principe de mesure du retour élastique dans ce cas est illustré dans la figure (1.16). Il se basé sur le mesurage de la variation de l'angle formée par les deux extrémités AB et CD du U, avant et après le retraitement des outils.

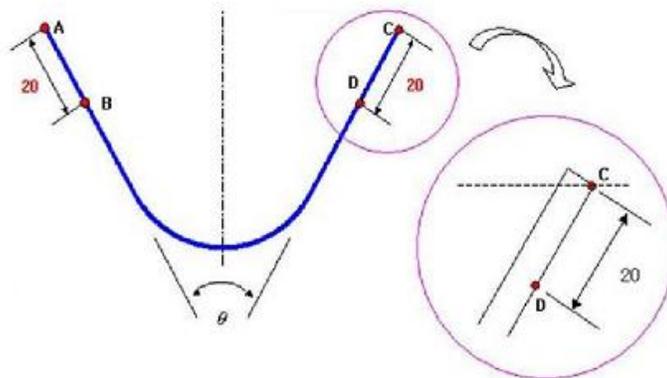


Figure1. 16 : méthode de mesure du retour élastique [77],

Ce test a fait l'objet de nombreuses études à la fois expérimentales et numériques, a été réalisé par Zhou [78] qui a présenté une étude de prédiction numérique validée expérimentalement du comportement du retour élastique des tôles en AA5754 et AA5182 après leur mise en forme en U, plusieurs géométries des outils et dimensions du flan ont été considérées pour les deux types de matériaux, avec différentes épaisseurs. Les effets d'un certain nombre de paramètres de processus et de matériaux sur le retour élastique ont été simulés par un code FEM explicite (LS-DYNA) pour modéliser l'étape de formage, et un code implicite (LS-NIKE 3D) pour la simulation du retour élastique après formage. Les résultats numériques ont démontré un bon accord avec l'expérimental.

Aussi, une analyse numérique par l'utilisation d'un code éléments finis (ABAQUS) de l'influence de force de serrage sur le retour élastique de deux matériaux AA5754 et un acier DP est étudiée par Kadkhodayan et al. [79]. Ils ont été trouvés que l'augmentation de force de serrage ne cause pas toujours la réduction du retour élastique, et il a été constaté qu'il augmente pour les moyennes valeurs de force de serrage, où l'étirage et le pliage ont des effets égaux sur le flan.

1.3.2.3 Pliage en air

Pour permettre la fabrication rentable de petits lots, de nouvelles techniques sont nécessaires pour réduire le nombre de changements d'installation. Un procédé de pliage en air est un excellent moyen de fournir la flexibilité nécessaire à la production dans de telles conditions. Ce procédé permet la fabrication d'une grande variété d'angles de pliage avec un seul outillage [53].

La principale caractéristique du pliage en air est que seule une petite quantité d'informations sur la forme finale de la pièce pliée est incluse dans la géométrie du poinçon et de la matrice. En fait, la principale tâche des outils est de transmettre la force fournie par la presse. Certaines caractéristiques de l'outil qui ont une influence significative sont le rayon du poinçon et la largeur de l'ouverture de la matrice. En fait, la principale tâche de l'outil est de transmettre la force fournie par le coulisseau de la

presse et non de définir la géométrie finale. Dans le cas du pliage en air, les caractéristiques du matériau et le déplacement du poinçon déterminent l'angle du produit avant et après le retour élastique ainsi que son rayon de courbure. Le décalage du poinçon est calculé comme la distance entre la position où le poinçon touche la tôle plate et la fin du processus de pliage. En résumé, les avantages les plus importants du pliage en air sont la variété des angles qui peuvent être obtenus avec un nombre minimal de poinçons et de matrices, et l'exigence d'une petite capacité. Ceci, associé à un bon contrôle de la géométrie finale obtenue et à la compensation du retour élastique, fait du pliage en air un procédé peu coûteux et flexible.

Dans le cas du pliage en air (Figure 1. 17), comme indiqué ci-dessous, une tôle est pliée dans une presse au moyen d'un poinçon et d'une matrice. Cependant, le poinçon ne descend pas entièrement, mais descend généralement jusqu'à une position pré-calculée (pénétration du poinçon). Il est ainsi possible de produire des formes ayant des angles différents avec un seul jeu d'outils.

Par conséquent, les aspects géométriques jouent un rôle important dans le pliage en air. L'impact de l'outillage sur le processus de pliage en air est moindre que dans le cas du pliage profond, où la géométrie de l'outil peut avoir un effet considérable. En général, la géométrie de l'outillage est définie par trois paramètres : la largeur de la matrice (w_d), le rayon de la matrice (r_d) et le rayon du poinçon (r_p). Les paramètres géométriques ont aussi une influence considérable sur ce genre de procédé. Le paramètre le plus important est l'épaisseur de la tôle ou du flan, bien que la largeur du flan soit également prise en compte.

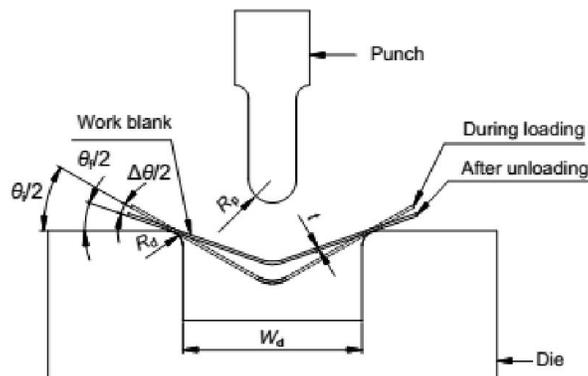


Figure1. 17: Schéma de principe de processus de pliage à l'air, R_p : rayon du poinçon; R_d : rayon de la matrice; W_d : ouverture de la matrice; t : épaisseur de la tôle; θ_i : angle de pliage (pendant le chargement); θ_f : angle de pliage (après le déchargement); $\Delta\theta$: angle de retour élastique (après le déchargement) [32],

Dans les processus de pliages industriels, les défaillances ou les ruptures en cours de processus ne se produisent que dans les tôles à haute résistance et moins ductiles. Le problème majeur réside dans le contrôle de la forme de la pièce pliée. L'angle auquel la plaque est pliée dans la machine, comme mentionné ci-dessus, est déterminé par la matrice et les ajustements qui peuvent être faits à l'outillage. Mais toutes les pièces montrent un certain retour élastique après le déchargement et cela dépend de la forme de la matrice, du frottement et de la résistance du matériau [80]. Ensuite, pour modéliser le processus ou l'opération de pliage, il est nécessaire de connaître le processus et que le plus grand nombre possible de variables soient clairement identifiées [53] [81].

Plusieurs auteurs ont adopté cet essai expérimental dans leurs études. Par l'utilisation de la technique de pliage en air, Özdemir [82] a examiné la quantité du retour élastique d'une tôle métallique AISI304, avec différentes épaisseurs (2 mm, 3 mm, 4 mm, and 5 mm) et différents rayons du poinçon (R2 mm, R4 mm, R6 mm, and R8 mm). Donc, le retour élastique diminue quand l'épaisseur de la tôle métallique augmente, et sa valeur augmente avec l'augmentation du rayon du poinçon. Le modèle mathématique a été obtenu par l'analyse de la relation entre les paramètres de pliage et les résultats de l'essai.

La prédiction du retour élastique est un grand problème dans la mise en forme des tôles métalliques, pour cela, Trzepieciniski et al. [83] ont proposé une étude numérique qui utilise la méthode des éléments finis sous le programme ABAQUS/Standard, validée expérimentalement, sur le retour élastique d'une tôle d'acier qui prend en considération leur anisotropie après leur mise en forme par pliage en air. Les résultats ont indiqué que l'anisotropie du matériau a une grande influence sur le retour élastique, et les éprouvettes coupées dans la direction transverse (90°) ont un grand retour élastique par rapport aux éprouvettes coupées à la direction de laminage (0°).

Gupta et al. [84] ont mené une étude sur le retour élastique dans le procédé de pliage en air. Ils ont analysé l'effet du rayon de poinçon et de la matrice sur le retour élastique d'une tôle en acier galvanisé et non galvanisé CR4. Différentes épaisseurs, course de poinçon, rayon de matrice et de poinçon sont utilisés, et avec une vitesse de poinçon constante, et même orientation de laminage de la tôle. Ils ont remarqué que le retour élastique augmente avec l'augmentation du rayon du poinçon et du rayon de matrice, dans les deux tôles d'acier galvanisé et non galvanisé. Aussi, Gupta [85] a fait une étude sur le même procédé et le même matériau, pour mettre en évidence l'effet des paramètres des outils comme la géométrie de la matrice et du poinçon, l'orientation de la tôle métallique et la vitesse du poinçon sur la force de pliage. D'après les résultats obtenus, il est conclu que la largeur de la matrice est la principale source de réduction de la force de pliage.

Une analyse expérimentale a été faite par Kumar et al. [86] qui présente l'effet de changement du rayon du poinçon et des différentes températures de traitement thermique sur le retour élastique d'une tôle en alliage d'aluminium 6063, pendant la mise en forme par le procédé de pliage en air. Les résultats montrent que le retour élastique augmente avec l'augmentation du rayon du poinçon, et diminue quand la température augmente.

Par l'utilisation de l'approche de Taguchi, Maske et al. [87] ont effectué une étude du retour élastique d'une tôle d'aluminium après leur mise en forme par pliage pour voir l'influence de différents paramètres de procédé comme l'orientation, la température, la force sur ce dernier. Aussi, Abu Khadra et al. [88] ont mené une étude qui résume leurs travaux sur la prédiction du retour élastique par l'utilisation de la méthode des éléments finis et une méthodologie de la surface de réponse dans le procédé de mise en forme par pliage en air d'une tôle métallique. Par la comparaison entre les deux méthodes, ils ont trouvé que la prédiction du retour élastique par l'approche FEM est plus précise que la méthodologie de la surface de réponse.

1.3.2.4 Pliage en L

La déformation de la tôle au-delà de sa limite d'élasticité pour conserver la forme imposée par la matrice de pliage est connue sous le nom de pliage en L ou pliage en tombé de bord. La forme souhaitée est de pouvoir être développée. C'est-à-dire que nous pouvons obtenir presque la forme initiale de l'ébauche en "dépliant" le composant. Ceci est réalisé en ignorant les élongations des rayons de courbure. Dans cet exemple, le composant est fixé à une extrémité, comme indiqué sur la figure (1.18).

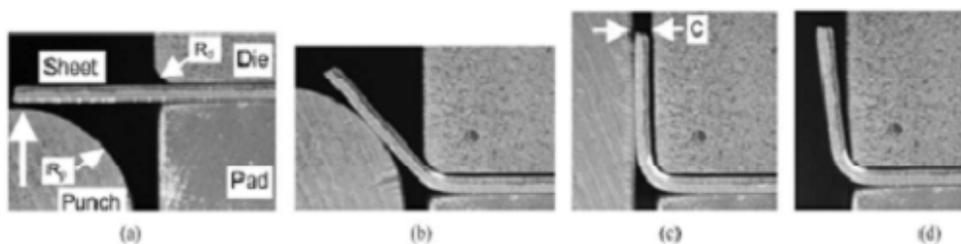


Figure1. 18 : Illustration de différentes étapes de procédé de pliage par tombée de bord [81],

En ce qui concerne l'essai de pliage en L, plusieurs études, à la fois expérimentales et numériques, ont été réalisées. Chen et al. [89] ont examiné l'effet des paramètres de procédé dans le processus de pliage en L expérimentalement et par l'analyse éléments finis, d'un alliage d'aluminium AA5052-H34, et ils ont proposé une approche de pliage inverse pour la réduction de retour élastique. Bien que l'approche de pliage inverse puisse réduire efficacement le retour élastique, elle peut provoquer

une surface irrégulière dans la zone du coin de la matrice. Par conséquent, l'utilisation de l'approche de pliage inverse doit être prudente si une qualité de surface élevée est requise. Elle fournit à l'ingénieur de conception de la matrice une nouvelle idée pour réduire le retour élastique qui se produit dans le pliage en L des tôles, en plus, et avec l'analyse de la mécanique de déformation du retour élastique effectuée dans la présente étude fournit également aux chercheurs une meilleure compréhension de la formation du retour élastique. Cette tendance a également été démontrée expérimentalement dans le processus de pliage en L réalisé par Salvi et al. [90] où ils ont analysé le retour élastique qui se produit dans le processus de pliage en L d'un alliage d'aluminium. La comparaison est faite en faisant varier divers paramètres comme l'épaisseur du matériau, la vitesse de déformation et le temps pendant lequel le poinçon reste en contact avec l'échantillon (temps de maintien) après le pliage. Divers outils de contrôle de la qualité tels que l'analyse Taguchi, l'ANOVA sont appliqués pour trouver le paramètre le plus significatif affectant le retour élastique obtenu dans le processus de pliage en L. La technique de pliage inversé est utile pour minimiser le retour élastique obtenu dans le pliage en L.

1.4 Compensation du retour élastique

Dans plusieurs processus d'assemblage, tels que les opérations de soudage et de brasage etc. Le retour élastique entrave la précision dimensionnelle requise. À cause du module d'élasticité des alliages d'aluminium qui est un tiers de celui de l'acier, le retour élastique de ces derniers est plus grand que pour les alliages d'acier de résistance similaire. En général, il y a deux méthodes pour minimiser ou pour réduire le retour élastique, la première repose sur l'augmentation de la tension de la tôle pour réduire le moment de flexion interne et la deuxième qui se base sur la compensation de celui-ci en surspécifiant l'angle de flexion [91].

De nombreuses études ont été menées sur le sujet de la prédiction et de la réduction du retour élastique. Les études existantes se concentrent sur la réduction du retour élastique par l'ajustement des facteurs critiques du processus tels que : la force de serrage, la vitesse du poinçon, l'épaisseur de la tôle, le rayon de la matrice, la lubrification, la température de formage, etc. Donc, le problème de retour élastique est inévitable dans les processus de mise en forme, qui dicte la forme et la précision dimensionnelle du produit. Aussi, ce problème peut être résolu en ajustant la géométrie de la matrice ou par un contrôle actif du processus. Cependant, lorsque la conception de la matrice ou de l'outil est modifiée afin de réduire le retour élastique, il est alors plus difficile d'obtenir la forme du produit qui était initialement souhaitée. Une première étude réalisée par Baba et al. [92] a examiné l'effet du temps et de l'ampleur de l'étirement dans le formage par étirage d'une tôle métallique. Les résultats obtenus ont montré une réduction du retour élastique avec l'augmentation de la force de traction et le retour élastique était minimisé lorsque la

tôle était étirée après le pliage. Dans le même contexte, Schilp et al. [93] ont proposé une technique dans laquelle en utilisant l'étirage et le pliage simultanés, de manière à établir une méthode pour appliquer le formage plastique pendant le processus principal, sans modifier la conception de l'outil. Les procédés de pliage par oscillation et de pliage en V sont utilisés comme processus de base dans ce travail. Cette étude se concentre sur trois points principaux : la méthode d'étirage, la direction de l'étirage et la longueur de l'étirage. Les effets de l'étirage sur le retour élastique sont étudiés en comparant les quatre procédés : processus de pliage sans étirement (WS), processus de pré-étirage et de pliage (PB), pré-étirage plus étirage et pliage simultanés (PSB), et étirage, et pliage simultanés (SB). Les résultats de la simulation par éléments finis sont ensuite vérifiés par l'expérimentation. Ils ont trouvé que la plus grande réduction du retour élastique est observée lorsque l'étirage et le pliage sont appliqués simultanément à la tôle. Lorsque R/t augmente et que l'angle de pliage devient plus petit, le procédé SB produit beaucoup moins de retour élastique que les autres procédés (Figure 1.19). En utilisant ce procédé, le retour élastique a été réduit avec succès, ce qui confirme l'efficacité du procédé SB.

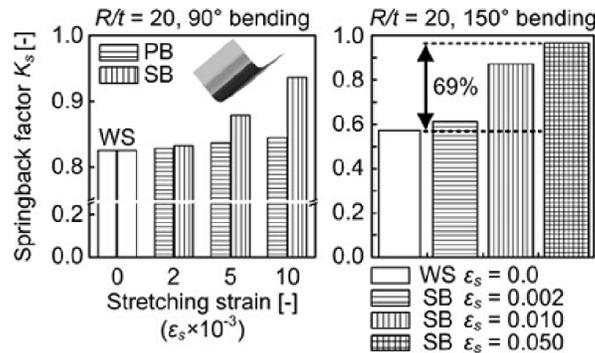


Figure1. 19 : Facteurs de retour élastique dans le processus de pliage en V : WS, PB et SB avec étirage latéral basé sur AISI304 [93],

Une méthode de compensation du retour élastique a été donnée par Karafillis et al. [94] où ils ont utilisé l'analyse par éléments finis pour obtenir la distribution de la traction dans la pièce entièrement chargée qui est la force motrice du retour élastique. Ensuite, la même distribution de traction a été utilisée pour effectuer une simulation élastique inverse sur la pièce non déformée afin de calculer de manière itérative la forme optimale de la matrice. Cette méthode a été appelée "algorithme du descripteur de force" ou "springforward". Les résultats ont montré que l'algorithme était très efficace et qu'il était très précis par rapport aux procédures expérimentales classiques de conception d'outils par essais et erreurs.

De même, Gan et al. [95] ont développé une nouvelle méthode de conception de matrice appelée "méthode d'ajustement de déplacement (DA)" qui est basée sur une méthode itérative d'éléments finis. Le

concept de cette méthode consiste à déplacer les nœuds de la surface de la matrice dans la direction opposée du retour élastique, comme le montre la figure 1.20 (a). La méthode DA a été testée dans le cadre de différentes simulations de formage en 2D et 3D et les résultats ont été comparés à l'algorithme du descripteur de force. Dans l'ensemble, la méthode DA convergeait plus rapidement et était plus précise, mais elle présentait parfois des oscillations dans la solution itérative. En outre, la méthode DA a convergé pour les pièces non symétriques, ce qui n'était pas le cas de l'algorithme du descripteur de force. Il a été confirmé expérimentalement que la méthode DA est une méthode efficace pour concevoir des formes de matrices sans les méthodes traditionnelles d'essais et d'erreurs. Il existe également des méthodes DA plus avancées, telles que la méthode d'"ajustement du déplacement progressif" développée par Weiher et al. [96] et la méthode de "surpliage contrôlé par la surface" développée par Lingbeek et al. [97]. De plus, sur la base de la méthode itérative à point fixe et de la méthode d'ajustement du déplacement (DA), Zhiyuan Zhang et al. [98] ont proposé une méthode de compensation itérative, qui présente un taux de convergence plus élevé, un nombre d'itérations plus faible et une plus grande précision par rapport à la méthode DA avec un seul paramètre de contrôle. En outre, comme la méthode DA, la méthode proposée ne dépend pas des propriétés du matériau ou du modèle mécanique, mais la différence est qu'elle peut rapidement et efficacement trouver le paramètre d'itération, déterminé si le paramètre est convergent ou non, et n'a pas de facteur de compensation. Selon l'écart des paramètres itératifs entre la valeur après le pliage par étirage et la valeur cible, la méthode de compensation itérative peut être utilisée pour calculer l'ampleur de la compensation et la direction de la compensation du paramètre itératif. Pour les processus de pliage par étirage avec des formes de matrice à courbure invariable et variable, la convergence des paramètres de contrôle est vérifiée mathématiquement avec le théorème de convergence de la méthode, et des expériences sont menées pour vérifier la méthode de compensation itérative. Les résultats expérimentaux montrent que les produits cibles peuvent être obtenus avec un petit nombre d'itérations sans connaître les propriétés spécifiques du matériau.

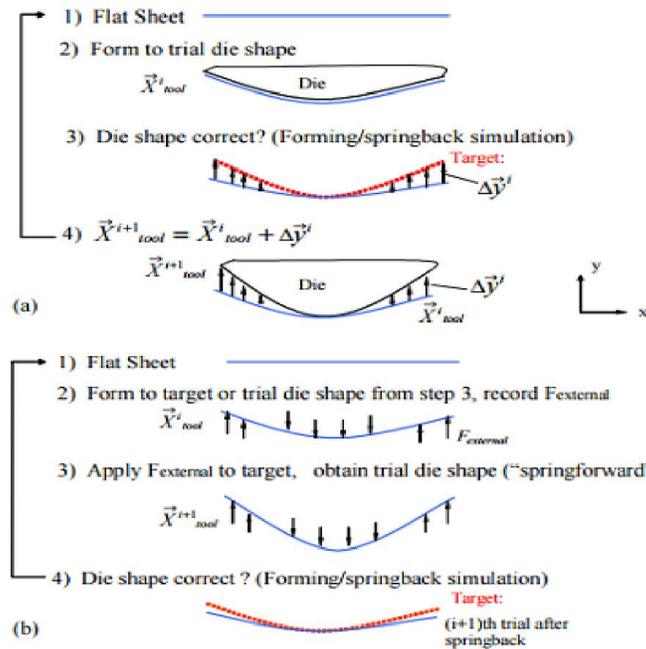


Figure1. 20 : (a) Organigramme de la méthode DA (b) Organigramme de l'algorithme du descripteur de force [99],

Pour atteindre les objectifs ci-dessus, diverses méthodes ont été proposées sur la base de la simulation par éléments finis. La méthode de compensation globale (CC) [100], la méthode hybride alternative (HM) [101], la méthode de compensation accélérée (AC) [102], la méthode E-DA (Enhanced Displacement Adjustment) [95], la méthode de compensation des éléments en tôle (SEC), la méthode d'ajustement des déplacements progressifs (SDA) et la méthode de surpliage contrôlé par la surface (SCO) [103], etc. Bien que ces stratégies de conception de matrices nécessitent des optimisations moins rigoureuses de l'outillage basées sur l'expérience et les essais et erreurs, elles sont toujours longues et coûteuses. Le formage à chaud est une méthode alternative pour réduire le retour élastique et fait l'objet de plusieurs études [104-109].

Donc, presque toutes les méthodes ont été citées précédemment nécessitent d'apporter des modifications aux géométries des outils ou à toute variable du processus. Ces modifications, qualifiées de compensation du retour élastique, comprennent plusieurs stratégies susceptibles de réduire les écarts de forme entre la géométrie cible et le résultat réel de l'opération de formage. Cependant, le nombre et la complexité de ce jeu de paramètres rendent cette tâche très matérielle et longue. Une solution peut être obtenue en utilisant des approches d'optimisation numérique. À cette fin, le paragraphe suivant explique bien cette idée.

1.4.1 Les plans d'expériences

Afin de compenser le retour élastique et d'améliorer la précision de la forme des pièces embouties, diverses méthodes d'optimisation peuvent être appliquées pour définir les variables de sortie souhaitées en développant des modèles mathématiques pour spécifier la relation entre les paramètres d'entrée et les variables de sortie. L'une des méthodes d'optimisation est le plan d'expérience (DoE). Pour s'assurer qu'une expérience est menée efficacement, il est généralement recommandé de recourir à un plan d'expérience statistique permettant d'enregistrer les données appropriées et de les analyser statistiquement afin de tirer des conclusions valables.

La méthode des plans d'expériences est une technique statistique qui fournit un moyen systématique de sélectionner les valeurs des paramètres à utiliser dans la réalisation d'expériences réelles ou de simulation éléments finis (FE). Elle fournit des outils statistiques permettant d'analyser les résultats expérimentaux et de déterminer en conséquence les paramètres qui ont le plus d'effet sur la sortie du processus. Ces résultats peuvent fournir une bonne base pour améliorer le rendement du processus en contrôlant les paramètres les plus efficaces.

Cette méthode joue un rôle important dans les sciences, l'ingénierie et l'industrie. Elle consiste à appliquer des traitements à des unités expérimentales, puis à mesurer une ou plusieurs réponses. Elle fait partie de la méthode scientifique. Elle nécessite l'observation et la collecte d'informations sur le fonctionnement d'un processus ou d'un système. Dans une expérience, certaines entrées « x » se transforment en une sortie qui a une ou plusieurs variables de réponse observables « y ». Par conséquent, des résultats et des conclusions utiles peuvent être tirés de l'expérience. Afin d'obtenir une conclusion objective, un expérimentateur doit planifier et concevoir l'expérience, puis analyser les résultats.

Les méthodes traditionnelles d'optimisation sont des techniques "un facteur à la fois". Malheureusement, cette approche échoue souvent à identifier les variables qui donnent lieu à la réponse optimale, car les effets des interactions entre les facteurs ne sont pas pris en compte dans ces procédures [110]. Une stratégie alternative est l'optimisation statistique, qui permet un criblage rapide d'un certain nombre de facteurs et d'interactions de facteurs, et reflète le rôle de chaque composant.

Il existe de nombreux types d'expériences utilisées dans des situations et des problèmes du monde réel. Lorsque les traitements proviennent d'une gamme continue de valeurs, la relation réelle entre y et x ne peut pas être connue. L'approximation de la fonction de réponse $y = f(x_1, x_2, \dots, x_q) + \varepsilon$ est appelée méthodologie de surface de réponse [111]. En tant que sujet important dans la conception statistique des expériences, la méthodologie de surface de réponse (RSM) est un ensemble de techniques mathématiques

et statistiques utiles pour la modélisation et l'analyse de problèmes dans lesquels une réponse d'intérêt est influencée par plusieurs variables et l'objectif est d'optimiser cette réponse [112]. C'est une collection de techniques mathématiques et statistiques pour construire des modèles empiriques, est de plus en plus reconnue comme une approche puissante pour optimiser les conditions de production de produits industriels importants.

1.4.1.1 La méthode de surface de réponse (RSM)

La méthodologie de surface de réponse (RSM) consiste en un groupe de techniques empiriques consacrées à l'évaluation des relations existant entre un ensemble de facteurs expérimentaux contrôlés et les réponses mesurées, selon un ou plusieurs critères sélectionnés [112].

Le RSM fournit une relation approximative entre une réponse réelle y et p variables de conception, qui est basée sur les données observées du processus ou du système. La réponse est généralement obtenue à partir d'expériences réelles ou de simulations informatiques. Dans ce cas, la réponse réelle y est la même que la réponse attendue. Nous supposons que la réponse y , peut être écrite comme suit:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p), \quad (1.1)$$

Où les variables x_1, x_2, \dots, x_p sont exprimées en unités de mesure naturelles, appelées "variables naturelles".

Les plans de surface de réponse standard, tels que le plan composite central, le plan de Box-Behnken et leurs variantes (comme le cube à faces centrées) (Figure 1.21), sont largement utilisés, car il s'agit de plans assez généraux et flexibles. Si la région expérimentale est un cube ou une sphère, un plan de surface de réponse standard sera généralement applicable au problème. Cependant, il arrive qu'un expérimentateur se trouve dans une situation où un plan de surface de réponse standard ne peut pas être utilisé. Où un plan de surface de réponse standard n'est pas forcément le choix le plus évident. Les plans optimaux sont une alternative à considérer dans ces cas [112].

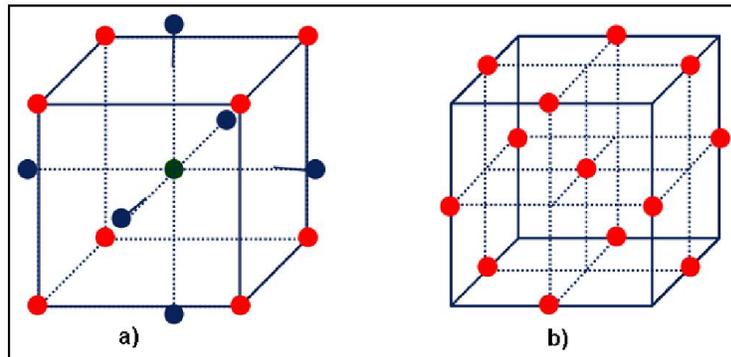


Figure1. 21 : a) Plan composite centré pour 3 facteurs et b) Plan de Box-Behnken pour 3 facteurs [113].

Ces dernières années, le plan d'expériences ou notamment la RSM a été utile pour modéliser divers paramètres de prédiction influençant le retour élastique dans le processus de formage de la tôle. Naceur et al. [114] ont traité l'optimisation des paramètres d'emboutissage afin de compenser les effets du retour élastique après le formage. Une méthode de surface de réponse (RSM) basée sur une approximation diffuse est utilisée. Le problème de "pliage en U" dans la conférence Numisheet a été utilisé pour valider la méthode, et de bons résultats d'élimination du retour élastique ont été obtenus. Les résultats finaux sont validés à l'aide de codes commerciaux. Bahloul et al. [115] ont effectué une optimisation en utilisant les plans d'expériences d'un procédé de pliage en tombée de bord. Il a étudié l'influence de deux facteurs, qui sont le rayon de la matrice et le jeu entre le poinçon et la tôle, sur le retour élastique et la force maximale de pliage. Ils ont trouvé que les plans d'expériences sont efficaces pour optimiser un effort de pliage ou le retour élastique. À la base de l'étude précédente, un travail complémentaire a été fait par ce dernier et ses collègues [116], en concentrant sur la comparaison entre trois méthodes d'optimisation pour la minimisation de la force de pliage maximale et du retour élastique dans le processus de pliage en tombée de bord obtenu par une approche expérimentale. Ces procédures d'optimisation basées sur la méthode de la surface de réponse sont proposées et utilisées pour trouver des solutions optimales. Le rayon de la matrice et le jeu entre le poinçon et la tôle sont optimisés afin de réduire la force de pliage maximale et le retour élastique. De bons résultats sont obtenus avec les trois procédures d'optimisation. La capacité de chaque technique à trouver la solution optimale est évaluée, et les résultats montrent un bon accord entre ces trois méthodes.

Dans les travaux de Lepadatu et al. [117], une méthode d'optimisation des processus de fabrication qui combine la méthode de surface de réponse, la méthode de calcul d'intervalle et la tolérance mécanique a été proposée. Cette nouvelle méthode permet d'obtenir une nouvelle méthodologie de surface de réponse appelée surface de réponse d'intervalle utilisée dans l'optimisation du processus. En

utilisant cette méthode, plus de pièces complètes sont produites et acceptées dans l'optimisation du processus de fabrication.

Le retour élastique dans le processus de pliage en air est influencé par un certain nombre de paramètres géométriques du matériau. Pour cela, Abu Qudeiri et al. [118] ont utilisé un méta-modèle de surface de réponse pour prédire le retour élastique, donc, une fonction multidimensionnelle doit être approximée. Un algorithme non linéaire vérifié d'éléments finis (FE) est développé pour générer les données d'entraînement. Ensuite, les données d'entraînement générées seront utilisées pour entraîner le modèle de surface de réponse (RSM). L'algorithme (FE) est développé sur la base de la formulation lagrangienne actualisée. Pour sélectionner les données de formation pour le RSM, des conceptions D-optimales générées par ordinateur sont utilisées. Les résultats obtenus montrent que le méta-modèle de surface de réponse quadratique complète donne la meilleure précision pour le retour élastique par rapport à la prédiction de la méthode des éléments finis.

Une analyse statistique et une optimisation des facteurs efficaces sur le phénomène du retour élastique sont réalisées dans le processus de formage incrémental en un seul point assisté par vibration ultrasonique (UVaSPIF) sur la base des principes DOE (Design of Experiments). À cette fin, la RSM (Response Surface Methodology) est choisie comme technique de conception des expériences. Les facteurs contrôlables tels que la taille du pas vertical, l'épaisseur de la tôle, le diamètre de l'outil, l'angle d'inclinaison de la paroi et la vitesse d'avance sont spécifiés comme variables d'entrée du processus. Les résultats obtenus par ANOVA (analyse de la variance) et l'analyse de régression des données expérimentales, confirment l'exactitude du modèle mathématique. En outre, il est démontré que les termes linéaires, quadratiques et interactionnels des variables sont efficaces sur le phénomène de retour élastique. Pour optimiser le phénomène de retour élastique, les meilleures conditions de l'expérience sont déterminées en utilisant la méthode de désirabilité, et l'optimisation statistique est ensuite vérifiée en effectuant le test de confirmation [119].

Selon Ferreira et al. [120] une solution pour la compensation du retour élastique peut être obtenue en utilisant des approches d'optimisation numérique. Cette étude présente une analyse et une comparaison entre plusieurs stratégies numériques pour la compensation du retour élastique, y compris: (i) une approche statistique basée sur un plan d'expérience factoriel (DoE) et une analyse statistique utilisant l'ANOVA (analyse de la variance), (ii) des méthodologies de surface de réponse qui sont une collection de techniques statistiques basées sur un bon ajustement des données expérimentales par des fonctions polynomiales, et une approche d'optimisation utilisant (iii) une méthode basée sur le gradient des moindres carrés. Ainsi, toutes ces stratégies sont appliquées à la compensation du retour élastique d'un

rail en forme de U, un repère bien connu qui présente de grand retour élastique après le retrait de l'outil. Les résultats obtenus sont conformes à ceux de la littérature. De plus, on peut conclure que le modèle de second ordre du RSM fournit de meilleurs résultats, en effet, il fournit une valeur plus faible de la fonction de coût. Pour mieux compenser l'effet de retour élastique, un ensemble de force de serrage élevée du flan avec un rayon de matrice faible doit être considéré.

Buang et al. [121] ont présenté le développement d'un modèle prédictif pour le retour élastique dans le processus de formage en U sur une tôle d'acier DP590 en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). L'approche du plan d'expérience (DoE) a été utilisée pour étudier les effets de quatre facteurs, à savoir la force du serre-flan, le jeu, la course du poinçon et la direction du laminage, qui ont été utilisés comme paramètres d'entrée en utilisant des valeurs à deux niveaux en appliquant un plan factoriel complet (2^4). L'analyse statistique de la variante (ANOVA) a montré que la force du serre-flan, le jeu et la course du poinçon ont un effet significatif sur le retour élastique, tandis que le facteur de la direction du laminage n'est pas significatif. Les paramètres significatifs sont optimisés afin de réduire le comportement de retour élastique en utilisant la conception composite centrale (CCD) dans RSM et les paramètres optimaux ont été déterminés. Un modèle de régression pour le retour élastique a été développé. L'effet des paramètres individuels et leur réponse ont également été évalués. Les résultats obtenus à partir du modèle optimal sont en accord avec les valeurs expérimentales.

Rafizadeh et al. [122] ont proposé une étude dans l'objectif de prédire l'influence des paramètres d'outillage tels que le rayon de la matrice et du poinçon, la force du serre-flan et le coefficient de frottement entre la matrice et les surfaces du flan dans un processus d'emboutissage profond sur la hauteur des plis dans l'aluminium AA5754 en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM) et un réseau neuronal artificiel (ANN). La méthode des éléments finis 3D (FEM), c'est-à-dire le logiciel Abaqus, est utilisé pour modéliser le processus d'emboutissage profond. Afin d'étudier la précision de ce modèle, les résultats sont comparés aux résultats expérimentaux. Les données dérivées de la FEM sont utilisées pour modéliser le RSM et former un ANN. Enfin, les sorties du RSM et du ANN sont comparées afin de sélectionner le meilleur modèle. Les résultats des deux méthodes sont prometteurs et l'on constate que les résultats ANN sont plus précis que les résultats RSM.

Dans le but d'évaluer l'effet des principaux paramètres du processus sur le niveau de retour élastique Alghtani et al. [123] ont mené un travail en étudiant le procédé d'emboutissage en U. Un banc d'essai fiable pour ce type d'opération a été créé et un modèle d'éléments finis 3D a été développé pour simuler le processus. Les simulations pour quatre matériaux différents ont été validées. Un accord acceptable entre les simulations et les résultats expérimentaux. Cependant, l'acier galvanisé à haute

résistance présente des résultats divergents. Une étude paramétrique a été menée pour évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur l'ampleur du retour élastique. Enfin, une méthode d'optimisation (plan d'expériences) a été développée pour trouver la combinaison optimale de paramètres pour réduire le niveau du retour élastique et a été utilisée avec succès pour optimiser les paramètres du processus pour les différents matériaux étudiés.

Dans l'étude de Ramadass et al. [124], le comportement du retour élastique des tôles de Ti-Grade 2 est étudié par la méthode des éléments finis et par l'expérimentation. Les paramètres du processus considérés sont le rayon du poinçon, l'ouverture de la matrice et l'épaisseur de la tôle. Sur la base du tableau orthogonal de Taguchi (L9), la simulation et les expériences ont été menées. Les valeurs de retour élastique simulées se sont avérées en bon accord avec les valeurs expérimentales. Le rapport signal/bruit (S/N) est utilisé pour déterminer la combinaison optimale de paramètres qui minimise le retour élastique. L'analyse de la variance est utilisée pour étudier l'influence des paramètres du processus sur le retour élastique.

Venkateshwar Reddy et al. [125] ont fait une analyse de l'importance des paramètres de formage sur les réponses : la force du poinçon et le retour élastique dans le pliage en U de l'acier inoxydable 304. La longueur du flan, la vitesse du poinçon et le lubrifiant à trois niveaux chacun ont été considérés dans ce travail comme des paramètres de formage. Les effets des différents paramètres du processus sur le pliage en U ont été étudiés en réalisant des expériences sur l'acier inoxydable 304. Les expériences ont été menées selon le tableau orthogonal L9 de Taguchi. Les conditions optimales ont été déterminées en fonction de leur effet sur la force du poinçon et le retour élastique de la tôle. Les paramètres de signification ont été définis à l'aide de la méthode ANOVA. L'analyse statistique montre que la longueur du flan est le paramètre qui influence le plus la force du poinçon et le retour élastique. Les résultats obtenus pour la force du poinçon et le retour élastique sont comparés aux travaux de la littérature et un bon accord entre les résultats est observé.

Dans l'étude de Özdemir et al. [126], le comportement de retour élastique a été étudié en appliquant un processus de pliage en V en air dans un matériau en tôle DP600. L'effet des différentes épaisseurs et des rayons des poinçons sur les valeurs de retour élastique a été étudié. En outre, les données expérimentales ont été analysées avec la méthode de surface de réponse (RSM) et la technique de Taguchi. À la suite de l'étude expérimentale, la relation entre les paramètres a été examinée et la méthode la plus efficace a été choisie.

1.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, une synthèse bibliographique a été exposée, qui consiste à mettre la lumière sur un grand problème rencontré lors de la mise en forme des tôles métalliques, qui est le retour élastique, en se basant sur deux procédés essentiels de mise en forme, le procédé d'emboutissage et le pliage. Les défauts géométriques des pièces en tôle dus au retour élastique sont l'une des principales sources de manque de précision dimensionnelle. Par conséquent, lors de la conception d'un processus pour obtenir une pièce, il est obligatoire de prendre en compte son comportement de retour élastique. Cette partie se focalise sur une brève illustration de notion du phénomène du retour élastique, et elle se rapporte à plusieurs travaux de littérature qui ont traité différents processus utilisés pour mettre en évidence l'importance de caractérisation de ce phénomène ou plutôt la prédiction expérimentale et numérique de ce dernier à partir des différentes procédures, et elle a touché les principaux paramètres influent le retour élastique. Aussi, nous avons présenté les robustes techniques les plus proposées et les plus basées dans les travaux antérieurs faits pour réduire ou compenser le retour élastique. Les deux méthodes approuvées sont les modifications des géométries des outils ou des paramètres de processus, et les approches numériques d'optimisation telles que les plans d'expérience notamment la méthodologie de surface de réponse.

Chapitre 2 : Caractérisation et Etude expérimentale

2.1 Introduction

Actuellement, dans l'industrie en général, et selon le domaine et les besoins des marchés, on trouve différentes modes des pièces. Ces pièces sont réalisées avec différents types de procédés de fabrication conventionnelles ou non, et demandent un outillage précis pour effectuer la forme désirés. Donc, dans le domaine de la mise en forme des tôles métalliques, il y a beaucoup des techniques qui permettent de transformer un métal, livré en feuilles ou en bobines, en pièces de formes simples ou complexes utilisées dans l'automobiles, les appareils électroménagers, l'emballage et les machines en général. Selon les caractéristiques de pièces formées dès que la forme, le matériau, et l'utilisation de ces pièces, on peut trouver différents procédés de formage qui nécessite un outillage spécifique. La bonne conception de cet outillage joue un grand rôle dans la facilité de fabrication de ces produits et assure en même temps leurs qualités. De plus, on peut constater que le problème majeur est la conception de ces outils qu'il faut effectuer avec une grande précision, formes simple, et peut coûteuse, ce qui pose un grand obstacle pour les concepteurs. Outre la forme des outils, qui dépend de la complexité de la pièce à obtenir, de nombreux paramètres conditionnent la réussite de l'opération de mise en forme, tels que les paramètres de procédé (vitesse de formage, dimensions d'outillage ou lubrification...) et les paramètres du matériau comme les propriétés de la tôle utilisée et leur formabilité. La possibilité de concevoir et de produire des outils après avoir déterminé la quantité de retour élastique est permise par la prédétermination de cette quantité.

Dans cette partie, on met en évidence les différentes étapes pour réaliser expérimentalement le procédé d'emboutissage en U et le pliage en air V, dans le but de voir et de quantifier le retour élastique à la fin de mise en forme par ces procédés. Également, nous avons fait plusieurs essais pour permettre de comprendre la relation et l'influence de plusieurs paramètres de procédé tels que : la profondeur d'étirage, la vitesse de poinçon, jeu entre poinçon et matrice, le temps de maintien du poinçon sur le flan, rayon de la matrice et rayon de poinçon, traitement thermique, et un des paramètres de matériau : l'anisotropie, sur le retour élastique.

2.2 Les alliages d'aluminium

L'aluminium est un métal brillant, blanc-argent, qui possède de nombreux attributs exceptionnels qui le conduisent à une large gamme d'applications, caractérisé par sa bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation, sa faible densité, ses conductivités électrique et thermique élevées, ductilité élevée et résistance raisonnablement élevée, et son coût relativement faible [127]. C'est un matériau élémentaire ayant le numéro atomique 13 et un poids atomique de 26, 98. Dans sa forme pure, l'aluminium n'a pas une très grande résistance, avec une limite élastique d'environ 28 MPa. Toutefois, lorsqu'elle est alliée et

durcie par écrouissage ou par précipitation, la limite d'élasticité peut être de 621 MPa ou plus [128]. Une variété d'éléments est utilisée dans l'alliage de l'aluminium, sont le cuivre, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Les alliages contenant du cuivre, du magnésium+silicium et du zinc peuvent être durcis par précipitation jusqu'à des niveaux de résistance assez élevés, tandis que ceux contenant du manganèse ou du magnésium sont durcis principalement par écrouissage [129].

L'Association d'Aluminium [130] a un système de numérotation pour les produits ouvrés en aluminium qui consiste en un numéro à 4 chiffres suivi d'une lettre, puis de chiffres supplémentaires. Les quatre premiers chiffres renvoient à la composition chimique de l'alliage, et la lettre et le chiffre suivant indiquent le revenu. Les propriétés sont définies par l'alliage et son revenu. Ce système de désignation est maintenant accepté à l'échelle internationale et a largement remplacé les anciens systèmes de numérotation qui variaient d'un pays à l'autre [130].

Les alliages qui ont 5 comme premier chiffre de leur désignation d'alliage (c.-à-d. la série 5xxx) ont du magnésium comme élément principal d'alliage. La série 5xxx n'est pas thermo-traitable, mais obtient un renforcement supplémentaire en travaillant la trempe. Les alliages avec un 6 comme premier chiffre, la série 6xxx, ont du magnésium et du silicium comme principaux éléments d'alliage. Ils forment du siliciure de magnésium, ce qui rend les alliages traitables à la chaleur. Les trois autres chiffres représentent la composition spécifique de l'alliage.

L'ajout de 2 à 5 % de magnésium (alliages 5xxx) permet d'obtenir un meilleur renforcement de la solution solide (voir figure 2.1).

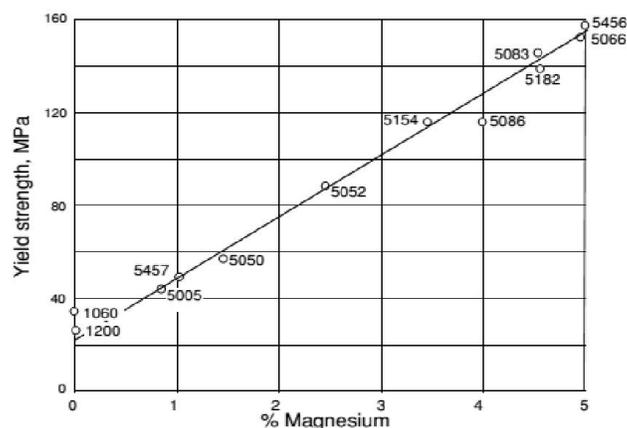


Figure 2. 1: Limite d'élasticité après recuit de plusieurs alliages aluminium-magnésium [131],

Le grain fin 5083 est superplastique, et il est utilisé dans les pièces difficiles à former pour les automobiles et les motocyclettes (comme les réservoirs d'essence). Les autres applications des alliages

5xxx incluent les canoës et les bateaux. Dans les pièces fortement sollicitées, la teneur en magnésium est maintenue en dessous de 3,5 % pour éviter la fissuration par corrosion sous contrainte. Les alliages d'aluminium contenant du magnésium peuvent avoir une sensibilité négative à la vitesse de déformation. Le résultat peut être des lignes de Luders dans des pièces formées. La figure (2.2) montre un exemple de lignes Luders sur une tôle d'aluminium-magnésium [131].

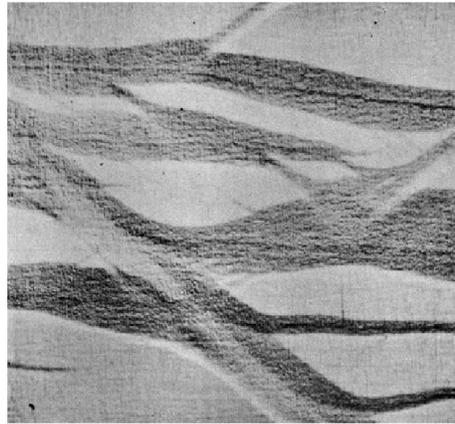


Figure 2. 2: Bandes de Luders dans une tôle d'alliage d'aluminium riche en magnésium [131],

2.3 Métal étudié

A cause de faible densité, de très haute résistance et de résistance à la corrosion de l'alliage d'aluminium, ce dernier a plusieurs utilisations dans différents domaines et a une importance considérable dans de nombreuses industries telles que l'ingénierie mécanique, l'automobile et l'aéronautique. Ce dernier a été choisi comme matériau d'étude. L'alliage d'aluminium utilisé est produit sous forme de tôles par laminage. L'épaisseur des tôles en fin de laminage est de 0,8 mm. Cet alliage est un alliage Al-Mg (moins de 4% de magnésium). La majeure partie du magnésium se retrouve en solution solide et le reste sous forme de composé Mg_2Al_3 . Bien que ces alliages ne soient pas durcis structurellement, une exposition prolongée à la température ambiante ou à une température légèrement supérieure induit une précipitation de Mg_2Al_3 aux joints de grains, ce qui diminue la résistance à la corrosion. Après l'érouissage, ces alliages sont traités par un procédé de recuit de stabilisation, qui supprime l'instabilité métallurgique. L'état H111 est une condition qui résulte d'un durcissement léger après recuit qui fournit un durcissement suffisant pour que les caractéristiques du métal ne soient plus celles de l'état recuit mais n'atteignent pas tout à fait le niveau de l'état H11.

2.4 Propriétés physico-chimique

2.4.1 Composition chimique

Cette étude a utilisé une tôle en alliage d'aluminium de la série 5**** (AL5086-H111) d'une épaisseur de 0,8 mm. La texture cristallographique d'une tôle permet d'analyser son comportement lors de la mise en forme ainsi que d'identifier les phases actuelles. Un test d'analyse chimique a été effectué pour déterminer la composition chimique du matériau étudié en utilisant la technique de spectrométrie par fluorescence X dans un équipement Rigaku ZSX Primus IV, qui permet la détermination quantitative rapide des éléments atomiques dans une variété d'échantillons avec les normes minimales. La composition chimique de cet alliage d'aluminium est indiquée dans le tableau 2.1.

Tableau 2. 1: Composition chimique du matériau d'essai (en % en poids),

Si	Fe	Cu	Mn	S	Ca	Mg	Al
0.534	0.386	0.0228	0.172	0.0749	0.0868	3.72	95.0

2.4.2 Microdureté

La dureté est décrite comme la résistance d'un corps à être pénétré par un autre corps plus dur. Des tests préliminaires peuvent être effectués pour identifier le type et la forme des pénétrations à employer afin de définir les circonstances de cette pénétration. La microdureté est mesurée à l'aide de différentes techniques. La technique Vickers a été choisie.

Il s'agit d'enfoncer un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale, à base carrée, avec un angle de 136° au sommet entre deux côtés opposés, dans le métal testé sous l'influence d'une force connue. L'indentation carrée du pénétrateur est mesurée diagonalement. Lorsque la force est modifiée, un pénétrateur pyramidal (ainsi qu'un pénétrateur conique) produit des indentations géométriquement équivalentes, donnant des indices de dureté identiques. En sélectionnant une force qui produit une indentation dont la diagonale d est inférieure aux deux tiers de l'épaisseur.

Des essais de dureté Vickers ont été réalisés pour déterminer s'il y avait effectivement une recristallisation et des effets négatifs sur la résistance du matériau. Les échantillons ont été traités à des températures allant de 20 à 200°C. Un appareil d'essai de dureté Qness 402MVD a été utilisé (figure 2.3). Il est doté d'un microscope intégré qui permet aux utilisateurs de visualiser l'empreinte du diamant et de mesurer les diagonales. Les empreintes ont été réalisées sur l'épaisseur du matériau avec 100 gf et la force a été appliquée pendant 15 secondes.



Figure 2. 3: Appareil d'essai de dureté Qness 402MVD,

Les résultats sont résumés dans le tableau 2.2. Chaque échantillon a été indenté cinq fois. Les résultats des tests montrent qu'il n'y a pas un changement significatif de la dureté avec l'augmentation des températures de recuit.

Tableau 2. 2: Résultats d'essai de dureté,

Température de recuit (°C)	20	100	200
HV	63.3	65.1	60.7

2.4.3 Observation métallographique

À partir d'une tôle d'alliage d'aluminium à une température ambiante, nous avons réalisé des petits échantillons (1mm^2) pour servir à une étude métallographique. Cette étude nous permet d'observer la microstructure de notre alliage. La préparation métallographique des échantillons consiste à les polir mécaniquement avec des papiers abrasifs en carbure de silicium. L'opération consiste à minimiser au maximum et graduellement la rugosité des échantillons en utilisant successivement le papier 500, 800, 1200, 2400 et 4000 en présence de l'eau. L'opération finale de polissage est fait sur un tissu de peaux de chamois en présence de la solution diamantée 9, 3, et $1\mu\text{m}$, ces étapes de polissage permettent l'obtention des échantillons très lisses et brillants destinés à l'attaque chimique et par la suite à l'observation métallographique.

Pour mettre en évidence les phases présentes, il faut ensuite réaliser une attaque chimique avec un réactif. Pour notre alliage d'aluminium, nous avons utilisé le réactif Keller constitué de 2.5 ml d'acide nitrique, 1.5 ml d'acide chlorhydrique, 1 ml d'acide fluorhydrique et 95 ml d'eau. Tous les échantillons polis sont attaqués par ce réactif pour une durée qui varie entre 3 s et 30 min suivies d'un rinçage à l'eau permettent de révéler les phases existées.

Pour faire l'étude métallographique des échantillons, nous avons utilisé dans ce travail un microscope métallographique à grand champ du type Zeiss relié à un système d'acquisition numérique. La microstructure d'alliage cité ci-dessus à l'état brut de coulée pour un grossissement de 50 et 100 est présentée sur la figure 2.4. Les zones noires sont des zones de solution solide du Mg dans Al qui forment au niveau des joints de grains.

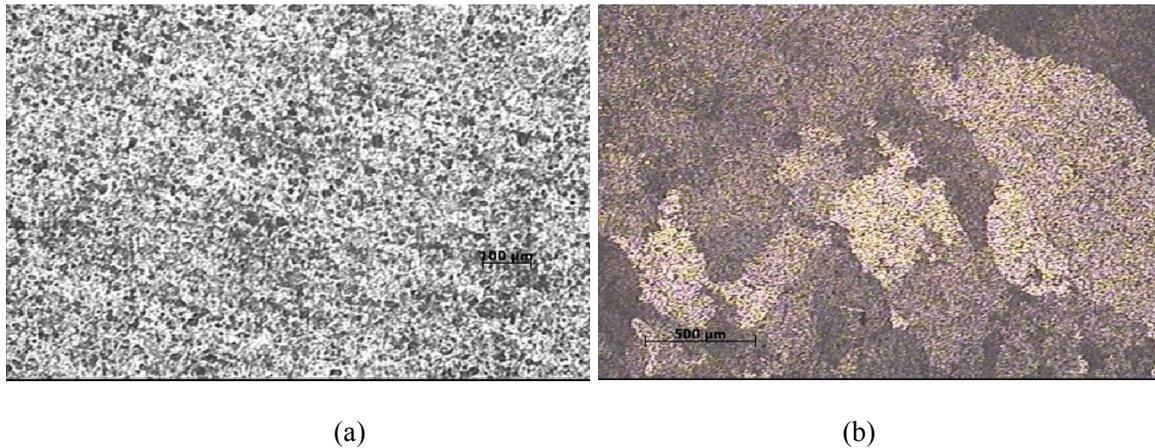


Figure 2. 4: Métallographie de l'alliage d'aluminium étudié pour a) un grossissement de 50, b) et un grossissement de 100 X,

2.5 Propriétés mécaniques

2.5.1 Essai de traction

De nombreux essais traditionnels sont utilisés pour examiner et décrire le comportement d'un métal, notamment l'essai de traction, la compression, la flexion et le cisaillement simple, la résilience et la fatigue.

En raison de sa commodité et de sa simplicité d'exécution, l'essai de traction Uniaxial est considéré comme le plus fréquent et le plus utilisé dans les secteurs de l'industrie et de la recherche. Ainsi, il y a nombreuses informations qui peuvent être tirées de cet essai mécanique telles que le module d'Young, le

coefficient de poisson, la limite élastique, la résistance à la rupture, l'allongement, le coefficient de striction, les coefficients d'anisotropie, et à la vitesse de déformation, la courbe d'écroutissage, etc.

2.5.1.1 Machine utilisée

Des essais de traction ont été réalisés pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux (Tableau 2.3 et Tableau 2.4) qui ont été préparés selon la norme ISO 6892-1:2009(E). Les échantillons (tôles) sont découpés dans trois directions différentes (0° , 45° , 90°) par rapport à la direction du laminage. Ils ont été produits par découpage de fil (électroérosion). Une machine d'essai de type MTS model 45 a été utilisée qui permet de mesurer et de contrôler les caractéristiques mécaniques : la résistance à la rupture, sa réponse à une sollicitation statique ou dynamique, ses caractéristiques d'élasticité, ou encore ses limites en compression et flexion, comme le montre la figure 2.5. Elle sert à déterminer la résistance mécanique pour les divers modes de chargement (traction, compression...). Elle est composée essentiellement d'un bâti rigide et deux traverses, l'une est fixe qui est la traverse inférieure, et l'autre est mobile, c'est la traverse supérieure. Un système d'entraînement de la traverse mobile, un capteur pour la mesure des efforts (cellule de charge), et un extensomètre MTS de base 12.5 mm et d'allongement maximal égal à 5 mm est utilisé. Cette machine a une capacité de charge de 100 kN. La vitesse de la tête transversale peut varier de 0,0005 à 180 mm/min. Un ordinateur dédié, installé avec un logiciel d'essai spécialisé, contrôle les fonctions de la machine et saisit les données requises.



Figure 2. 5: Machine universelle d'essai mécanique de type MTS de capacité 100KN,

Les essais de traction sont effectués à température ambiante et à différentes températures de traitement thermique de recuit. Ce traitement permet d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau et de relâcher les contraintes résiduelles, il est réalisé entre 20°C et 200°C pendant 1 heure afin de montrer

l'influence de ce traitement thermique sur le retour élastique. Afin de caractériser le comportement anisotrope de la tôle en alliage d'aluminium, des essais de traction uniaxial ont été réalisés sur des échantillons avec et sans traitement thermique de recuit dans la direction du laminage (0°), dans la direction transversale (90°) et à 45° de la direction du laminage. Pour chaque direction, 3 essais au minimum sont effectués pour vérifier la bonne reproductibilité des résultats.

Les éprouvettes doivent être préparées de manière à ne pas altérer les propriétés de l'échantillon. Toutes les zones qui ont été durcies par cisaillement ou pressage doivent être enlevées par usinage. La préparation de ces éprouvettes par poinçonnage peut entraîner des modifications importantes des propriétés du matériau, en particulier de la limite d'élasticité. Les matériaux qui présentent un haut degré de durcissement doivent généralement être préparés par fraisage, meulage, etc. Ces éprouvettes sont principalement préparées à partir de feuilles ou de bandes. Dans notre cas, et par la mise en œuvre de la norme ISO 6892-1:2009(E), les éprouvettes utilisées sont découpées suivant un gabarit par électroérosion au fil à des angles différents par rapport au sens de laminage (0° , 45° et 90°) dont les dimensions sont données dans la figure (2.6). Cette éprouvette normalisée de longueur initiale de la zone utile L_0 et de section initiale $S_0 = b_0 \cdot a_0$ avec b_0 la largeur initiale et a_0 l'épaisseur initiale. Pour que les déformations soient les plus homogènes possibles, l'éprouvette est composée d'une zone utile où se concentrent les déformations pendant l'essai et de deux têtes séparées de la zone utile par des congés de raccordement. En général, l'éprouvette a des extrémités saisies qui sont plus larges que la longueur parallèle. La longueur parallèle, L_c , doit être reliée aux extrémités au moyen de courbes de transition d'un rayon d'au moins 20 mm. La largeur de ces extrémités doit être $\geq 1,2 b_0$, où b_0 est la largeur originale [132].

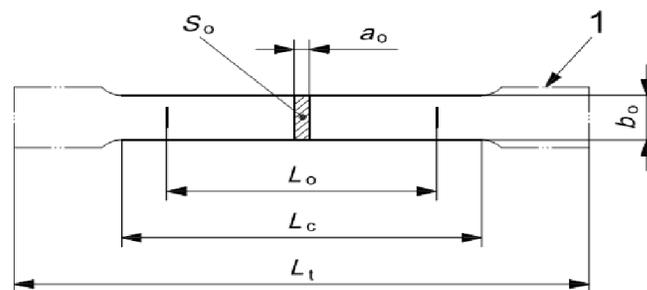


Figure 2. 6: Éprouvette normalisée d'essai de traction,

Où :

a_0 : épaisseur originale d'une éprouvette plate ou épaisseur de la paroi d'un tube,

b_0 : largeur originale de la longueur parallèle d'une éprouvette plate,

L_c : longueur parallèle,

L_0 : longueur originale du gabarit,

L_t : longueur totale de l'éprouvette,

S_0 : surface de la section transversale d'origine de la longueur parallèle,

l : extrémités saisies.

Pour la mise en œuvre de l'essai de traction, une éprouvette, découpée dans la tôle à mise en forme (figure 2.6), est installée entre le mors fixe et le mors mobile de la machine d'essai. Des mors plat sont utilisés pour maintenir cette éprouvette. Le déplacement de la traverse impose une élongation contrôlée de l'éprouvette. L'effort nécessaire à ce déplacement est mesuré par l'intermédiaire d'un extensomètre MTS monté en série entre le bâti et un des mors (figure 2.7).



Figure 2. 7: Une éprouvette sollicitée à un essai de traction,

Les propriétés mécaniques de notre alliage ont été déterminées par des essais de traction dans différentes directions par rapport au sens de laminage à température ambiante et à différentes températures de traitement thermique comme été mentionné auparavant. Dans le but de déterminer l'évolution de contrainte en fonction de la déformation, l'éprouvette sélectionnée est soumise à une déformation à vitesse constante. Les résultats correspondant à 0° , 45° et 90° de la direction de laminage pour différentes températures sont présentés dans le tableau 2.4. Les courbes force-déplacement liées aux paramètres sont définies selon la représentation schématique de la figure 2.8.

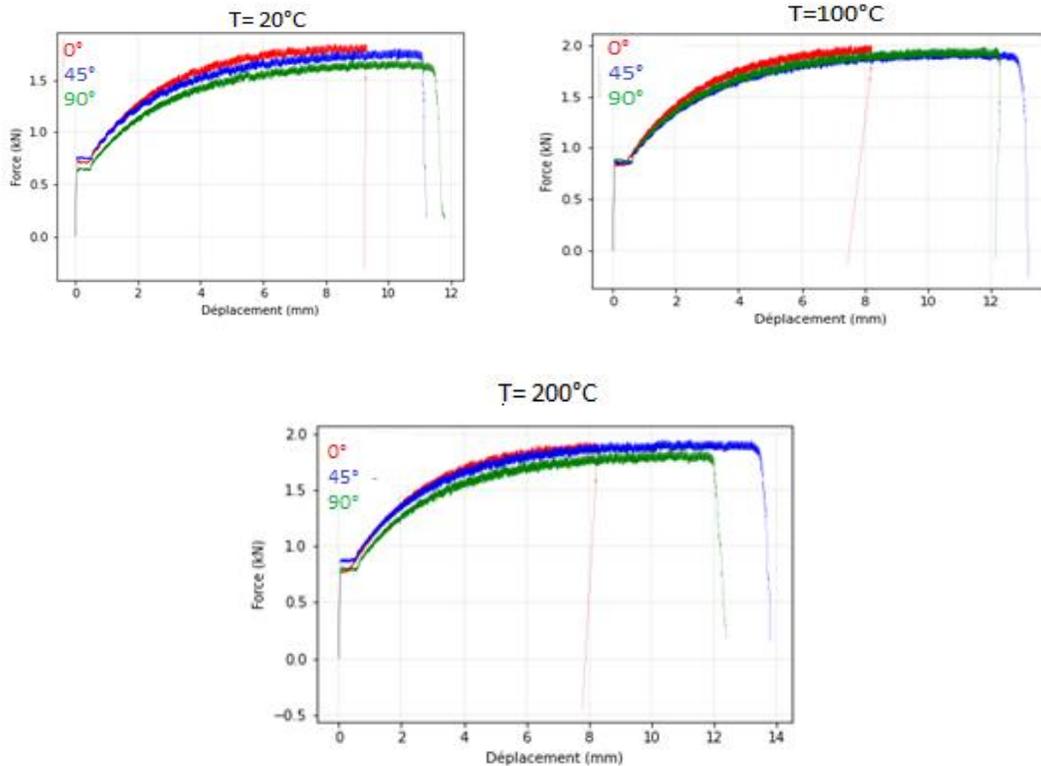


Figure 2. 8: Courbes force-déplacement pour différentes températures (20°C, 100°C, 200°C) et dans différentes directions par rapport au sens de laminage (0°,45°,90°),

Des grandeurs essentielles qui peuvent être déterminés à partir de l’essai de traction, comme la déformation nominale qui a été calculée à partir du déplacement de l’extensomètre, elle a été définie comme étant le rapport entre la variation de longueur (ΔL) de l’éprouvette et sa dimension initiale (L_0) :

$$\epsilon_n = (L - L_0)/L_0 = \Delta L/L_0 \tag{2.1}$$

Avec L_0 la longueur initiael de l’éprouvette, et L la longueur finale après déformation,

La contrainte nominale ou conventionnelle de la déformation définie par le rapport de la force F appliquée sur l’éprouvette pour provoquer la déformation et la section initiale de l’échantillon S_0 , elle est donnée par :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \tag{2.2}$$

La déformation vraie (ϵ_v) ou la déformation logarithmique est donnée par la relation suivante:

$$\epsilon_v = \ln (1+ \Delta L/L_0) \tag{2.3}$$

Avec \ln le logarithme népérien, ΔL la variation de la longueur et L_0 la longueur initiale.

La contrainte vraie peut être calculée à partir de l'équation suivante:

$$\sigma_v = F/S \quad (2.4)$$

Où: $S = S_0 / (1 + (\Delta L/L_0))$

L'anisotropie du matériau est définie comme étant la variation des propriétés de ce dernier dans diverses directions par rapport au sens de laminage. Elle a été appelée aussi coefficient de Lankford. Lors des essais de traction, ce coefficient est mis en évidence, il est donné par le rapport entre la déformation transverse et la déformation dans l'épaisseur de l'éprouvette :

$$r_\alpha = \varepsilon_t / \varepsilon_e \quad (2.5)$$

où α est l'angle par rapport à la direction de laminage et ε la déformation plastique.

le coefficient moyen d'anisotropie est calculé par l'équation suivante :

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.6)$$

Où r_0 , r_{45} , r_{90} sont les coefficients d'anisotropie, suivant les trois directions de laminage 0° , 45° 90° .

Les coefficients d'anisotropie trouvés suivant les trois directions de laminage avec et sans température de recuit sont résumées dans le tableau 2.3.

Tableau 2. 3: Résultats d'essai de traction,

Condition du test	Rm MPa	Rp0.2 (MPa)	% Allongement	r
0° – 20°C	136.8	260.8	21.9	0.71
45° – 20°C	135.4	262.4	25.7	0.99
90° – 20°C	138	275.4	20.2	0.69
0° – 100°C	146.4	250.2	27.8	0.60
45° – 100°C	134.7	244.8	29.4	0.87
90° – 100°C	139.6	242.3	21.8	0.62
0° – 200°C	117.2	149.3	36.75	0.58
45° – 200°C	113.6	138.6	39.5	0.82
90° – 200°C	112.8	139.0	34.7	0.60

Pour la modélisation du comportement du matériau, il est important de choisir le critère de plasticité approprié. Donc, les critères les plus utilisés sont : le critère isotrope de Von Mises et le critère de Hill 48. Le premier est utilisé pour les matériaux isotropes, tandis que le deuxième est le plus utilisé dans le cas des tôles laminés à froid ayant des propriétés anisotropes. Le logiciel ou le code de simulation numérique éléments finis utilisé dans cette étude (Abaqus) a l'avantage de la présence de ce critère anisotrope été déjà intégré dans celui-ci. Pour cela, et aussi la simplicité d'identification des paramètres caractéristiques de la loi rend ce critère de plasticité anisotrope de Hill 48 le plus approprié pour notre cas.

Dans le cas de contraintes planes, le critère de Hill s'écrit :

$$2f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_{xx}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + (F + H)\sigma_{yy}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = 1. \quad (2.7)$$

Où :

F, G, H et N sont les coefficients de Hill dépendent de la limite d'élasticité et du coefficient d'anisotropie. x, y, et z représentent les axes de symétrie orthotrope.

Par l'utilisation des coefficients d'anisotropie, les coefficients de Hill peuvent être calculés par les relations suivantes :

$$F = \frac{r_0}{r_0(1+r_0)} ; G = \frac{1}{(1+r_0)} ; H = \frac{r_0}{(1+r_0)} ; N = \frac{(r_0+r_0)(2r_0+1)}{2r_0(1+r_0)} \quad (2.8)$$

Les valeurs expérimentales des paramètres de Hill48 obtenues d'après nos essais sont résumées dans le Tableau 2.4.

Tableau 2. 4: Coefficients de Hill,

Température (C°)	F	G	H	N
20	0.602	0.585	0.415	1.77
100	0.605	0.625	0.375	1.685
200	0.612	0.633	0.367	1.643

2.6 Description et modification du dispositif d'emboutissage en U

Dans le cadre de ce travail, à partir d'un dispositif d'étirage-plier déjà fabriqué dans notre laboratoire LPMMM [133], une modification a été faite d'une façon à permettre facilement de régler et d'assembler en même temps tous les paramètres du procédé et du matériau et aussi de réaliser différents procédés de formage sur le même dispositif. Pour cela beaucoup d'efforts déployés par nous, pour arriver

à ce but. Comme le montre la figure 2.9, le nouveau dispositif est constitué tout simplement d'une matrice, d'un poinçon et d'un serre-flan. Un comparateur de déplacement de type Alpa avec une précision de $\pm 0.01\text{mm}$ fixé par des vis au dispositif permet de détecter le moindre déplacement causé par la descente du poinçon (profondeur d'étrépage) et du retour élastique après dégagement de l'outil.



Figure 2. 9 : Dispositif utilisé pour le déroulement des essais avec le comparateur de déplacement,

Dans cette étude, deux formes principales seront formées : formes en U et en V. Par conséquent, la matrice est faite en deux moitiés symétriques ; l'une à gauche et l'autre à droite du grément, un banc pour la fixation de ces deux moitiés, un adaptateur inférieur (figure 2.10). Dans la conception des outils de la mise en forme des tôles, il faut tenir compte de l'espace entre le poinçon et la matrice. Pour cela, la raison principale de la fabrication de deux pièces identiques pour la matrice est de permettre de procéder au pliage en air V ou à l'emboutissage en U sur le même banc d'essai et aussi de permettre de changer le jeu entre le poinçon et la matrice pour les deux procédés.

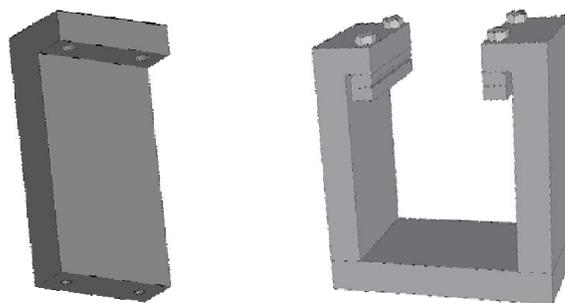


Figure 2. 10 : Les parties de la matrice conçue,

Le banc se présente sous la forme d'un bloc rectangulaire ayant la même largeur que les deux moitiés de la matrice et une longueur suffisante pour porter les autres composants. Quatre rainures ont été usinées aux deux extrémités du banc de matrice de 10 mm de largeur et de 50 mm de longueur pour supporter et guider les moitiés de la matrice et pour contrôler le jeu comme expliqué ci-dessous. L'adaptateur inférieur fixe la matrice dans tous les degrés de liberté par 4 vis.

Le serre-flan a été conçu pour appliquer une pression presque uniforme sur le flan. À l'origine, une plaque rectangulaire avec quatre trous de dégagement de 10 mm était prévue. La charge de pression a été obtenue en serrant les 4 boulons M 10 de chaque côté de flan à un couple spécifique, de plus, des rondelles ont été utilisées entre la tête du boulon et la surface supérieure des deux moitiés de la matrice.

La figure 2.11 illustre la conception de l'ensemble poinçon pour les essais d'emboutissage en U et pliage en air V. Le poinçon est divisé en trois parties : l'adaptateur supérieur, c'est une plaque rectangulaire à deux trous oblongs de chaque extrémité de 10 mm de largeur et 30 mm de longueur pour permettre de régler le jeu entre le poinçon et la matrice et aussi pour superposer avec la longueur du flan formé. Cet adaptateur est fixé au porte poinçon par quatre vis pour assurer l'alignement. Le poinçon principal qui est constitué de deux tiges cylindriques rigides en acier. Le porte poinçon est un ensemble de deux moitiés semblables, deux trous M 10 équidistants sont usinés sur la surface supérieure de chaque moitié comme indiquée la figure 2.11, aussi deux trous M 12 sont usinés sur l'avant et l'arrière de chaque moitié pour supporter les deux tiges cylindriques du poinçon principal. Le poinçon est donc fixé dans tous les degrés de liberté à l'exception de la direction verticale. La partie supérieure du poinçon est fixée rigidement à la traverse de la machine de traction à l'aide de l'adaptateur supérieur.

L'inconvénient de la première conception du dispositif est qu'elle ne permet qu'une variation limitée du jeu entre poinçon et matrice en particulier, et plusieurs paramètres de procédé en général, tout en étant coûteuse puisqu'un nouveau poinçon doit être fait pour chaque jeu. C'est pourquoi la nouvelle conception de matrice et de poinçon a été choisie pour cette expérience en raison de son faible coût et de la souplesse dont elle fait preuve pour faire varier le dégagement et aussi les autres paramètres. L'assemblage complet (poinçon et matrice) utilisé pour les essais de pliage en air V et d'emboutissage en U est illustré à la figure 2.9. Le banc d'essai de formage a été installé sur une machine universelle ZWICK ROELL. Par conséquent, les deux sous-ensembles ont été conçus pour s'installer sur la traverse et le banc de la machine d'essai. Premièrement, l'adaptateur supérieur illustré à la figure 2.9 a été conçu pour maintenir le poinçon dans la traverse de la machine. Deuxièmement, la plaque de base du banc d'essai illustrée à la figure 2.10 a été conçue pour fixer l'ensemble au centre de la plaque de base de la machine de traction ZWICK ROELL, comme indiqué à la figure 2.9.

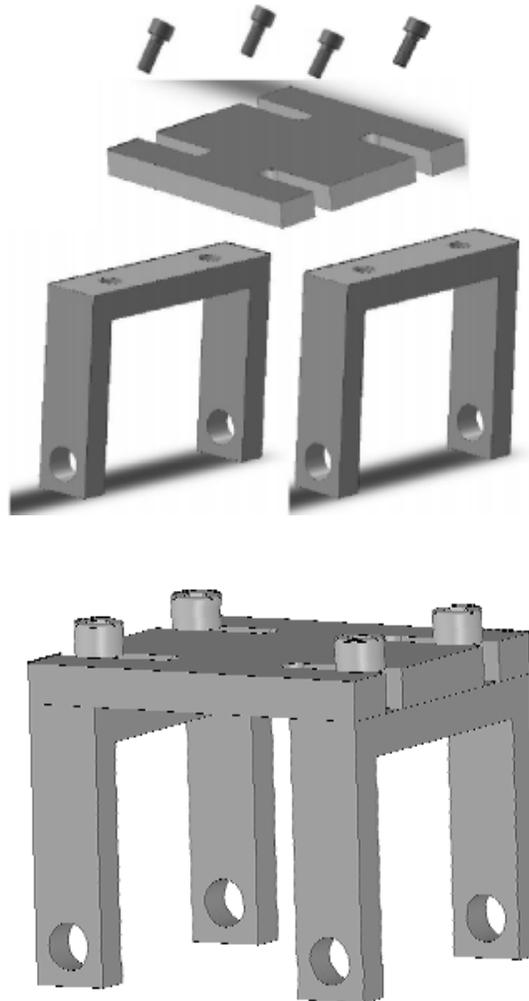


Figure 2. 11 : Conception du poinçon,

2.7 Déroulement des procédés de formage étudiés

Les essais de mise en forme par étirage-pliage (ou emboutissage en U) et pliage en air V sont des procédés de fabrication par déformation plastique à chaud ou à froid. Ils se basent sur la transformation d'une tôle métallique en des pièces de formes U et V d'une façon non-développable. Pour le procédé d'étirage-pliage, il n'existe pas les modes de déformation rencontrés lors de l'opération d'emboutissage comme l'expansion et le rétreint.

Afin d'effectuer les essais d'emboutissage en U et de pliage à l'air V, un dispositif de formage des métaux a été conçu, fabriqué et installé sur une machine d'essai de traction ZWICK ROELL, comme décrit à la section précédente. La tôle métallique utilisée (Alliage d'aluminium) a été découpée à l'électroérosion en bandes rectangulaires de 140×10 pour l'essai d'emboutissage en U, et de 100×10 mm

pour le pliage en air V dans trois directions : 0° , 45° , 90° par rapport à la direction de laminage. Les rayons de la matrice et du poinçon étaient tous les deux de 5 mm pour l'essai de pliage en air, tandis que pour l'autre essai les rayons de matrice varient de 4 à 8 mm, et les rayons de poinçon de 4 à 6 mm. L'ouverture de la matrice pour l'essai de pliage en air V a été réglée à des valeurs de 30, 50 et 70 mm respectivement. Pour l'essai d'emboutissage en U, le jeu entre poinçon et matrice est pris les valeurs suivantes: 10, 15, 20, et 26 mm respectivement.

Avant les essais, les outils et le matériau ont été nettoyés à l'acétone pour éliminer les impuretés. Dans les deux procédés de formage, le flan a ensuite été placé sur la matrice comme illustré à la figure 2.12. Quatre boulons M 10 ont été utilisés pour appliquer la force de serrage sur le support du flan. Des rondelles étaient situées entre la surface supérieure du support de flan et la surface inférieure de la tête du boulon pour aider à répartir la charge. Les propriétés des vis de serrage sont données dans le tableau 2.5.

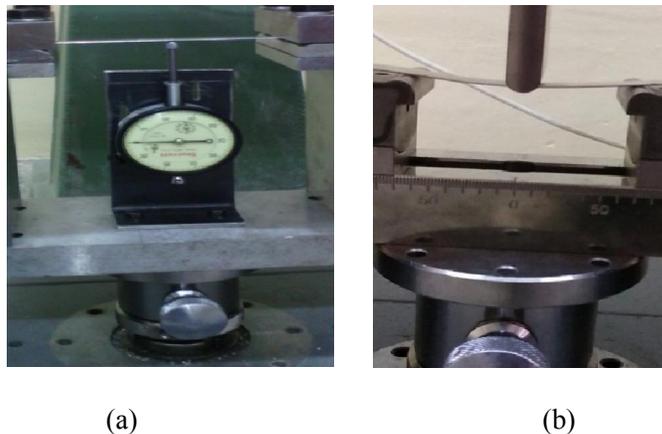


Figure 2. 12 : Installation du flan sur le banc d'essai (a) étirage-plier, (b) pliage en air,

Tableau 2. 5 : Propriétés de la vis de serrage,

Type de la vis (mm)	10
Pas de la vis (mm)	1.5
Diamètre moyen à flans de filet (mm)	9.0
Coefficient de frottement dans les filets	0.15
Diamètre moyen sous tête (mm)	13.5
Coefficient de frottement sous tête	0.15

L'application d'une force connue sur le support de flan est obtenue simplement en vissant chaque vis par une clé dynamométrique. La force exercée est calculée en utilisant la formule de Kellermann-Klein [134]. Cette formule, met en relation le couple de serrage et l'effort de tension :

$$C_s = [(pas/2\pi) + (0.583 \cdot d_f \cdot \mu_t) + (D_t/2 \cdot \mu_t)] \cdot F \quad (2.9)$$

Avec :

F (N) tension de la vis,

C_s (N.m) couple de serrage,

P (mm) pas de la vis,

D_t (mm) diamètre moyen sous tête de la vis,

μ_t coefficient de frottement sous tête de la vis,

d_f (mm) diamètre moyen de filetage de la vis, $d_f = D - 0.6495 \times P$,

μ_f coefficient de frottement dans les filets.

D'après les calculs, il est indiqué qu'un couple de serrage égal à 5 N.m crée une force de pression de 10 KN. La figure 2.13-a montre que le flan a été serré d'une force de 10 KN et que le poinçon est placé au-dessus de la surface supérieure du flan. À cette position, le poinçon commence à se déplacer vers le bas à une vitesse constante jusqu'à atteindre la profondeur désirée, ce qui a donné une forme en U comme le montre la figure 2.13-b. Le poinçon a ensuite été ramené à sa position initiale pendant le processus de déchargement. Il est clair que le retour élastique s'est produit lors de l'élévation du poinçon. La force du serre-flan a été enlevée en desserrant les boulons et la pièce formée a été soigneusement enlevée. L'essai a été effectué trois fois dans les mêmes conditions afin d'évaluer la répétabilité d'expériences.

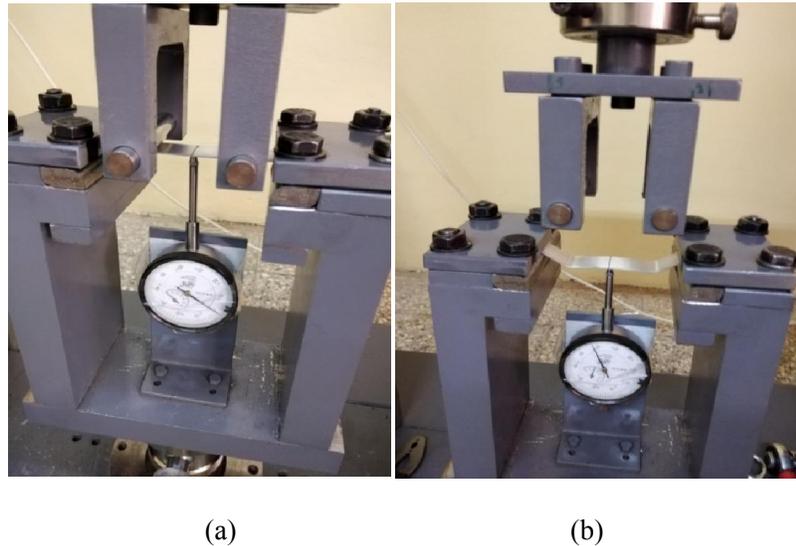


Figure 2. 13 : Étapes de réalisation de procédé d’emboutissage en U, a) application de force de serrage, b) mise en forme de la pièce,

Dans cette machine de traction, un logiciel a été utilisé pour mettre à zéro les valeurs de charge et de déplacement des capteurs. Ce logiciel a également été utilisé pour spécifier la vitesse de poinçonnage qui était respectivement de 3, 20, 100 et 180 mm/min, et le déplacement final qui était de prendre les valeurs de 10, 15, 20 mm.

Une méthodologie similaire à la procédure expérimentale pour le procédé d’emboutissage en U a été utilisée pour les essais de pliage à l’air V. Toutefois, il existe certaines différences, comme celles qui sont associées au serre-flan et à la profondeur d’étirage. En ce qui concerne le serre-flan pour cet essai, il n’existe pas cette partie du dispositif, et la profondeur d’étirage est fixée de 15 mm.

2.7.1 Méthode de mesure du retour élastique

Dans cette étude, le mesurage du retour élastique pour l’essai d’emboutissage en U est effectué par le calcul du retour élastique primaire Δ_{p1} après l’enlèvement du poinçon, la force du serre-flan est encore maintenue (figure 2.13 -b), et le calcul du retour élastique final Δ_{p2} , et $\Delta\theta$ après enlèvement des outils et libération totale de la pièce, et tout ça à l’aide d’un comparateur de déplacement de type (Apla) avec une précision $\pm 0.01\text{mm}$. Pour l’essai de pliage en air V, les mesures s’effectuent à l’aide du logiciel d’image pro-plus qui permet de mesurer l’angle de pliage à partir d’une image captée par une camera, ensuite l’étape du retour élastique se fait par l’utilisation d’un projecteur de profil MP320 de type Carl-Zeiss avec une précision $\pm 0.001\text{mm}$.

Dans tous les procédés, les paramètres du processus sont les facteurs les plus importants qui contrôlent la qualité des produits et le coût de production. La sélection de paramètres de processus optimisés permet de fabriquer des produits de haute qualité, tout en réduisant le coût et le temps de production. Afin de voir l'influence de plusieurs paramètres de procédé, comme la profondeur d'étirage, la vitesse de déformation, l'anisotropie, le jeu entre poinçon et matrice sur le retour élastique, nous avons étudié ce phénomène, en basant sur deux procédés de formage, l'emboutissage en U et le pliage à l'air V. Après chaque procédé, la pièce déformée était retirée avec précaution du banc de formage. La figure 2.14 montre des échantillons pour l'alliage d'aluminium après enlèvement. Il est évident que le retour élastique est beaucoup plus important dans l'échantillon formé par pliage à l'air V.

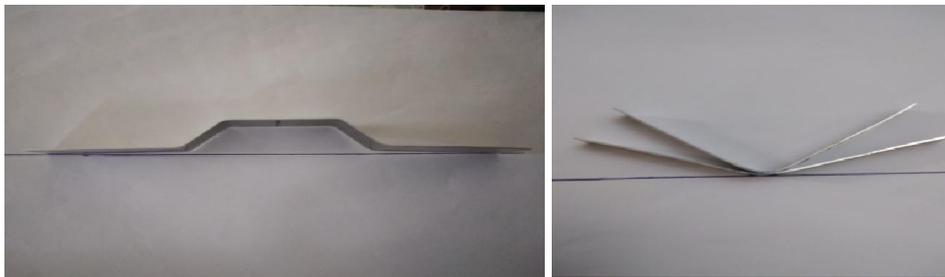


Figure 2. 14 : Eprouvettes après l'enlèvement d'outillage,

2.8 Résultats et discussions

2.8.1 Evaluation du retour élastique

2.8.1.1 Cas d'essai d'emboutissage en U

2.8.1.1.1 Effet de la profondeur d'étirage et de l'anisotropie

Pour mettre en évidence l'effet de la profondeur d'étirage sur le retour élastique primaire Δ_{p1} , plusieurs essais d'étirage-piage en U ont été réalisés sur des éprouvettes rectangulaires d'épaisseur 0.8 mm, dont les dimensions indiqués à la section 2.5. Le retour élastique final Δ_{p2} ou $\Delta\theta$ a été évalué après l'enlèvement de force de serrage par le desserrage des boulons de chaque extrémité. La quantité du retour élastique primaire Δ_{p1} mesuré à l'aide du comparateur de déplacement, en fonction de la profondeur d'étirage p (mm), pour différentes directions de laminage est représentée sur la figure 2.15.

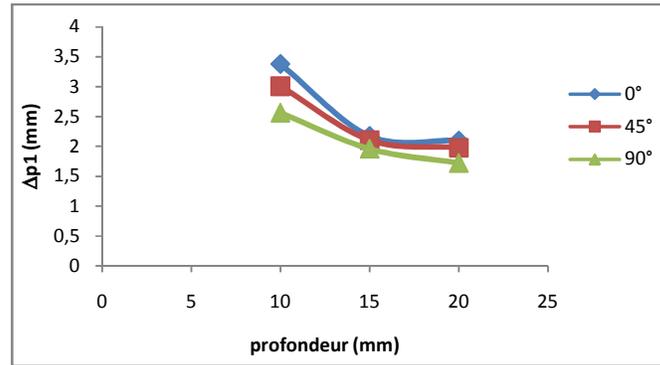


Figure 2. 15 : Variation du retour élastique primaire en fonction de profondeur d'étréage dans différentes directions de laminage (0°, 45°, 90°),

La figure 2.16 (a, b, et c) explique la relation du retour élastique et la profondeur d'étréage pour différentes vitesses du poinçon dans les trois directions de laminage choisisses.

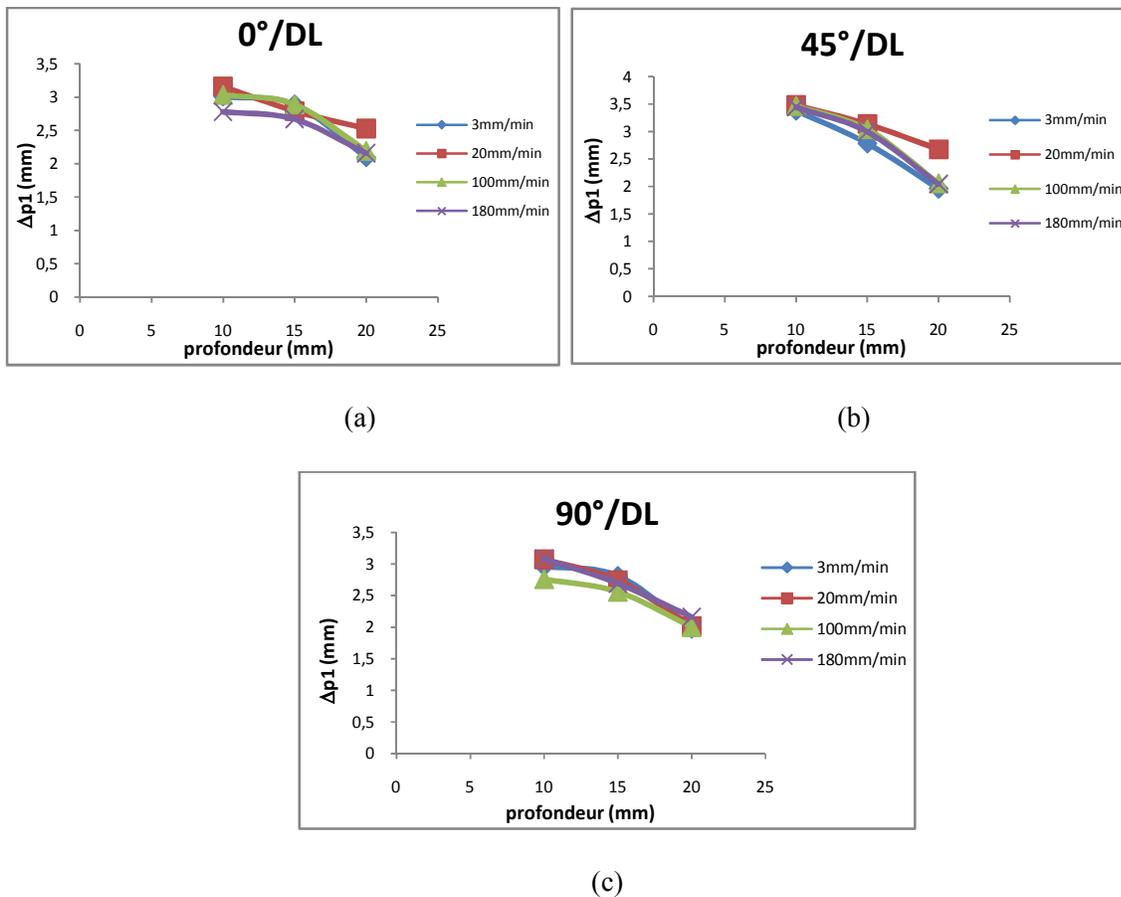


Figure 2. 16 : Variation du retour élastique primaire en fonction de profondeur d'étréage pour différentes vitesses du poinçon dans différentes direction de laminage,

D'après les résultats obtenus, nous pouvons constater que le retour élastique primaire Δp_1 diminue lorsque la profondeur d'étirage augmente, et cela pour les trois directions de laminage et les différentes vitesses de déformation. Cela peut être expliqué par la grande déformation plastique qui provoque un taux élevé d'écroutissage du matériau dans les profondeurs d'étirage les plus profonds. Cependant, la quantité du retour élastique est plus importante dans la direction de laminage 0° que la direction 45° et 90° . Donc, elle prend ses valeurs minimales dans la direction transversale par rapport à la direction de laminage (90°). À partir des résultats menés d'essais de traction, il est évident que le module d'élasticité dans la direction 90° est le plus grand par rapport aux autres directions. Pour cela, la diminution de retour élastique est plus grande dans cette direction. Selon [12, 18] la variation des propriétés mécaniques (module d'Young, limite élastique... etc) du matériau par rapport au sens de laminage a une influence sur le retour élastique.

2.8.1.1.2 Effet de la vitesse du poinçon

Afin d'étudier l'influence de la vitesse du poinçon sur le retour élastique, nous avons réalisé une série d'essais d'emboutissage en U, avec changement de vitesse de déformation, tandis que cette vitesse est réglée à chaque début d'essai à travers la machine de traction ZWICK ROELL. Les vitesses examinées dans cette étude varient de 3 jusqu'à 180 mm/min comme décrit auparavant. La figure 2.17 montre l'effet de la vitesse du poinçon sur le retour élastique pour différentes directions par rapport au sens de laminage. Le retour élastique présente une sensibilité limite à la vitesse du poinçon, cela est dû presque à la faible vitesse de déformation, ce qui est cohérent avec les travaux de Liu et al. [135].

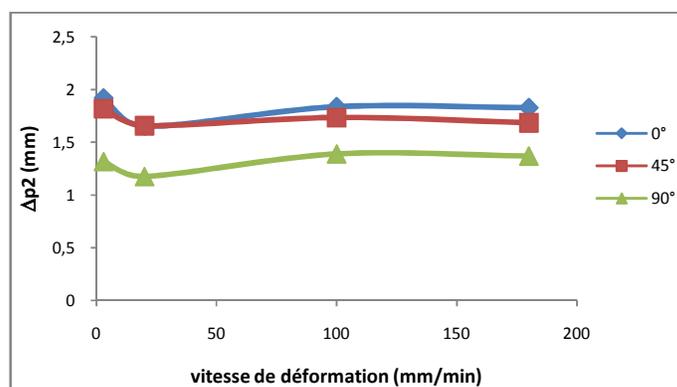
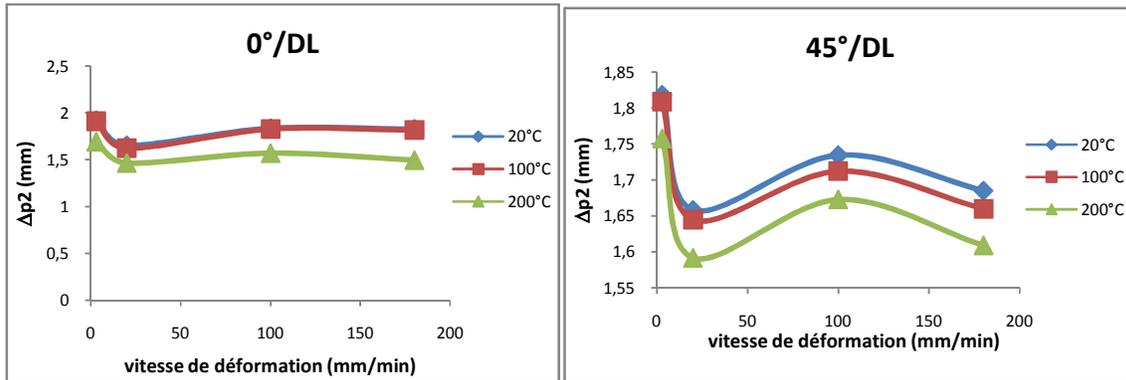


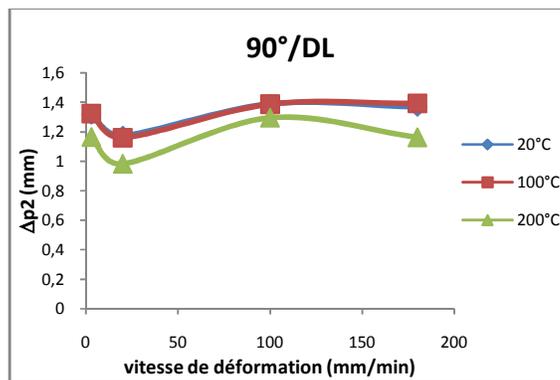
Figure 2. 17 : Évaluation du retour élastique en fonction de vitesse du poinçon dans les trois directions de laminage ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$),

Les résultats obtenus par les expériences de l'influence de la vitesse du poinçon sur le retour élastique de l'alliage d'aluminium dans différents sens de laminage et pour différentes températures de recuit sont présentés dans la figure (2.18: a, b, c) respectivement.



(a)

(b)



(c)

Figure 2. 18 : Résultats expérimentaux du retour élastique en fonction de la vitesse du poinçon pour différentes directions de laminage et différentes températures de recuit,

En effet, on peut observer que la valeur du retour élastique ne change pas beaucoup lorsque la vitesse du poinçon augmente, et cela pour toutes les valeurs de la vitesse du poinçon [37].

2.8.1.1.3 Influence de traitement thermique

Pour exprimer l'influence de température sur le retour élastique, on a réalisé des essais d'étrépliage en U sur des éprouvettes sont soumises à différentes températures de traitement thermique de recuit dans différentes directions de laminage, comme a été déjà mentionné. Les résultats indiqués sur la figure (2.19) montrent l'évolution d'angle du retour élastique en fonction de température et sens de laminage. On montre que pour l'ensemble des essais et quelle que soit l'orientation du chargement par rapport à la direction du laminage, le retour élastique présente une sensibilité positive à la température. On peut en déduire que la température a également une influence sur le retour élastique. En effet, lorsque la température augmente, le retour élastique diminue. Cet effet est peut-être dû au relâchement des contraintes résiduelles, c'est-à-dire la diminution de consolidation du matériau induit par le laminage,

donc, une diminution de limite élastique, résistance mécanique,...etc, du matériau par l'effet de recuit qui conduit à une diminution du retour élastique.

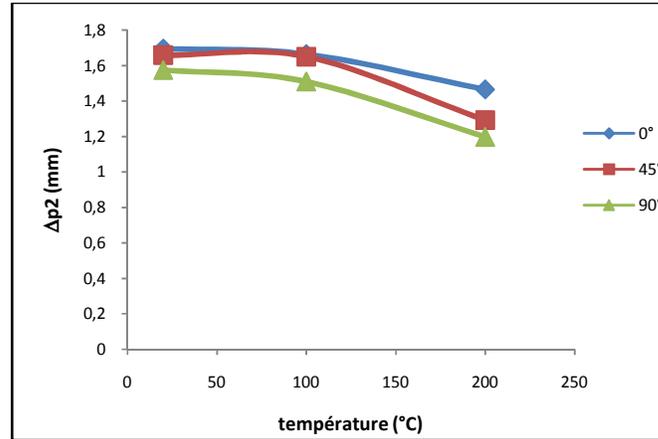


Figure 2. 19 : Variation du retour élastique final pour différentes température de recuit et différentes directions de laminage,

2.8.1.1.4 Effet du jeu entre poinçon et matrice

Le jeu est défini comme la différence entre l'épaisseur du flan et l'espace entre le poinçon et la matrice. Il contrôle donc la zone de contact entre le flan et les outils (le poinçon et la matrice). Dans le cadre de ce projet, le jeu a été modifié comme suit: 10, 15, 20, et 26 mm. La figure 2.20 montre la variation de la valeur du retour élastique pour des valeurs de jeu différentes pour le matériau considéré. Toutes les éprouvettes semblent se comporter à peu près de la même façon avec une grande variation de la valeur du retour élastique pour différentes valeurs de jeu et la tendance générale pour Δp_2 augmente avec l'augmentation du jeu pour les différentes directions de laminage. L'augmentation du jeu diminue la surface de contact entre le flan et les outils, ce qui signifie que le retour élastique devrait augmenter.

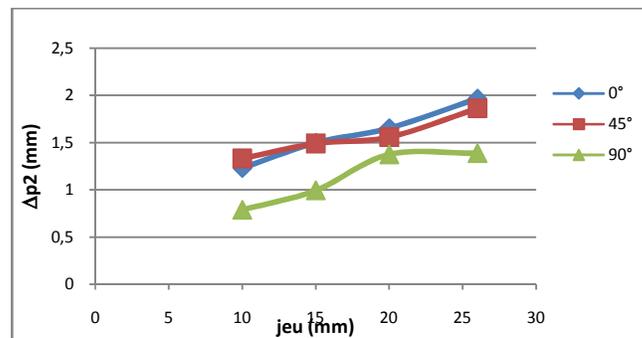


Figure 2. 20 : Influence du jeu entre poinçon et matrice sur le retour élastique final pour différentes directions par rapport au sens de laminage,

La figure (2.21: a, b, c) indique la variation du retour élastique en fonction du jeu entre poinçon et matrice dans différentes directions et différentes températures. L'augmentation des courbes peut être expliquée par le fait que le jeu a augmenté [15]. De plus, on peut remarquer qu'avec l'augmentation de la température, la quantité du retour élastique diminue.

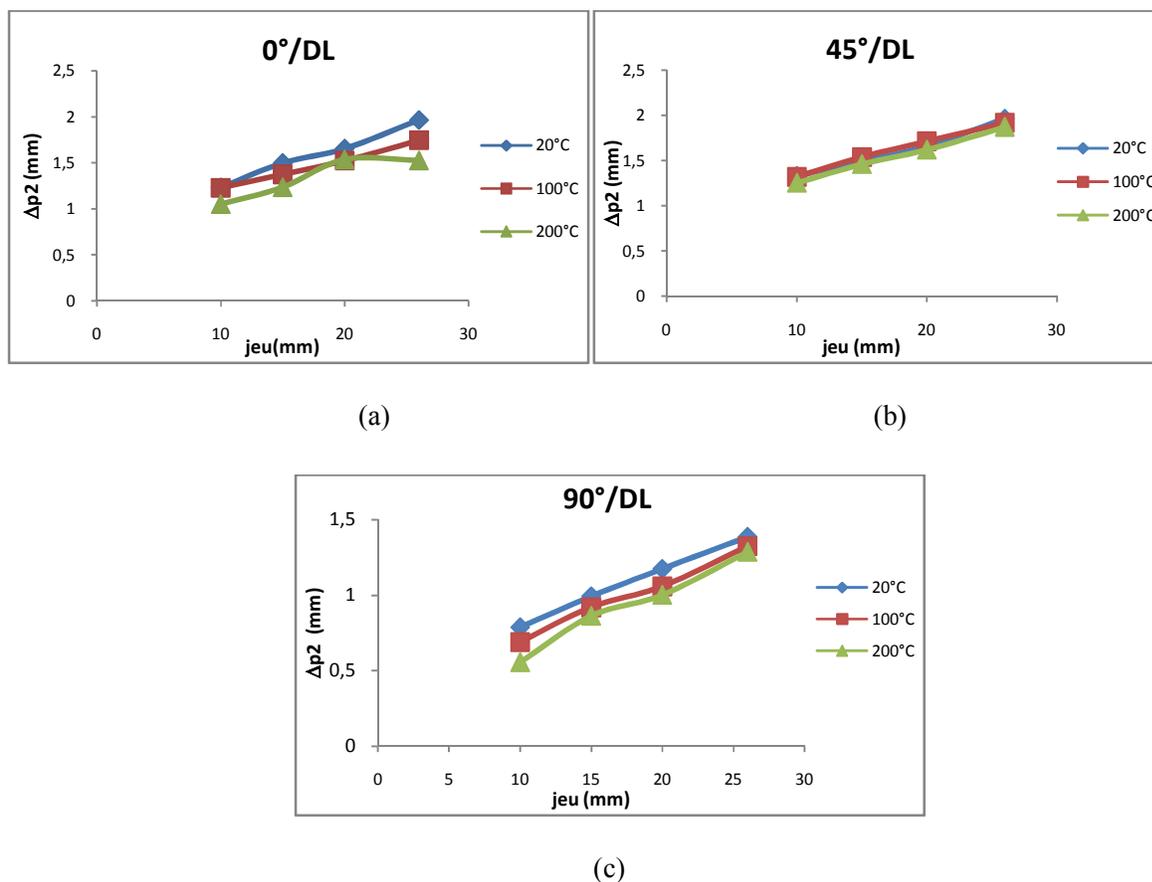


Figure 2. 21 : Retour élastique final en fonction du jeu pour différentes directions de laminage et différentes températures de recuit,

La figure 2.22 (a, b, c) ci-dessous montre la variation de la quantité du retour élastique primaire en fonction du jeu entre poinçon et matrice pour différentes profondeurs d'étirage dans les trois directions de laminage (0°, 45°, 90°). L'allure des courbes est généralement la même pour toutes les directions, et il est évident que le retour élastique primaire est aussi augmente avec l'augmentation du jeu entre poinçon et matrice.

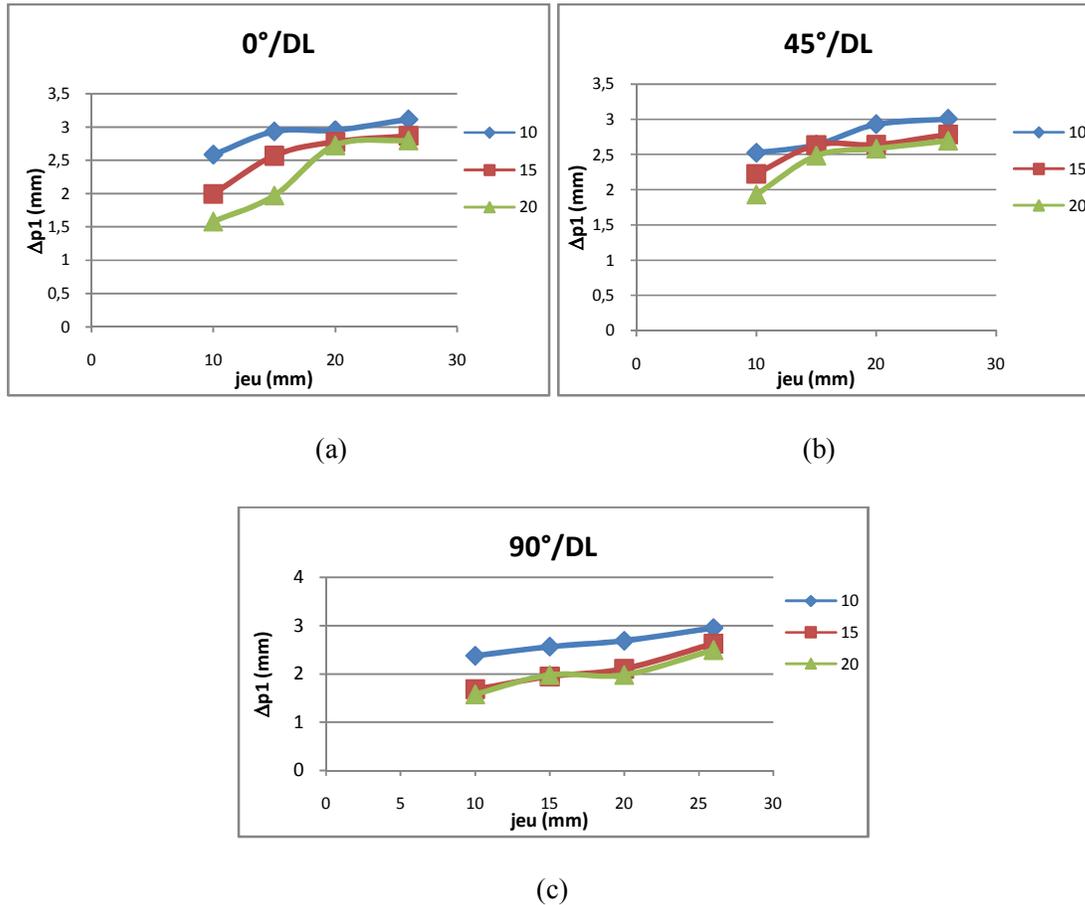


Figure 2. 22 : Évaluation du retour élastique primaire avec la variation du jeu entre poinçon et matrice pour différentes profondeurs d'étrépage dans différentes directions de laminage,

2.8.1.1.5 Effet du temps de maintien du poinçon sur le flan

Pour tenir compte de l'effet du temps de maintien du poinçon sur le flan, sur la quantité du retour élastique, on a fait quelques essais sur des éprouvettes dans différentes directions de laminage et pour différents temps de maintien. La figure 2.23 montre la relation entre le temps de maintien et le retour élastique. L'aspect général des courbes révèle qu'il y a une chute importante jusqu'au point où le retour élastique prend une valeur minimale avec un temps de maintien de 20 min dans toutes les directions de laminage. La figure (2.24: a, b, c) montre le retour élastique mesuré avec différentes directions de laminage à différents temps de maintien pour différentes températures de recuit. On peut constater que le temps de maintien est inversement proportionnel au retour élastique et que lorsque le temps de maintien augmente, le retour élastique diminue, car, lorsqu'un métal est déformé, un durcissement survient habituellement dans une certaine mesure et est causé par la génération et la réorganisation des sous-structures de dislocation du matériau. Donc, le temps de maintien permet de réduire le degré de relaxation

du stress. Après un certain temps de maintien, une certaine déformation élastique est convertie en déformation plastique et la contrainte diminue, et cela a été prouvé par des études précédentes [44] [45].

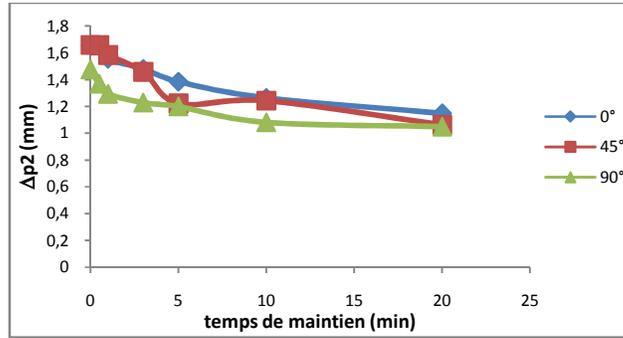


Figure 2. 23 : Retour élastique final en fonction du temps de maintien pour différentes directions de laminage,

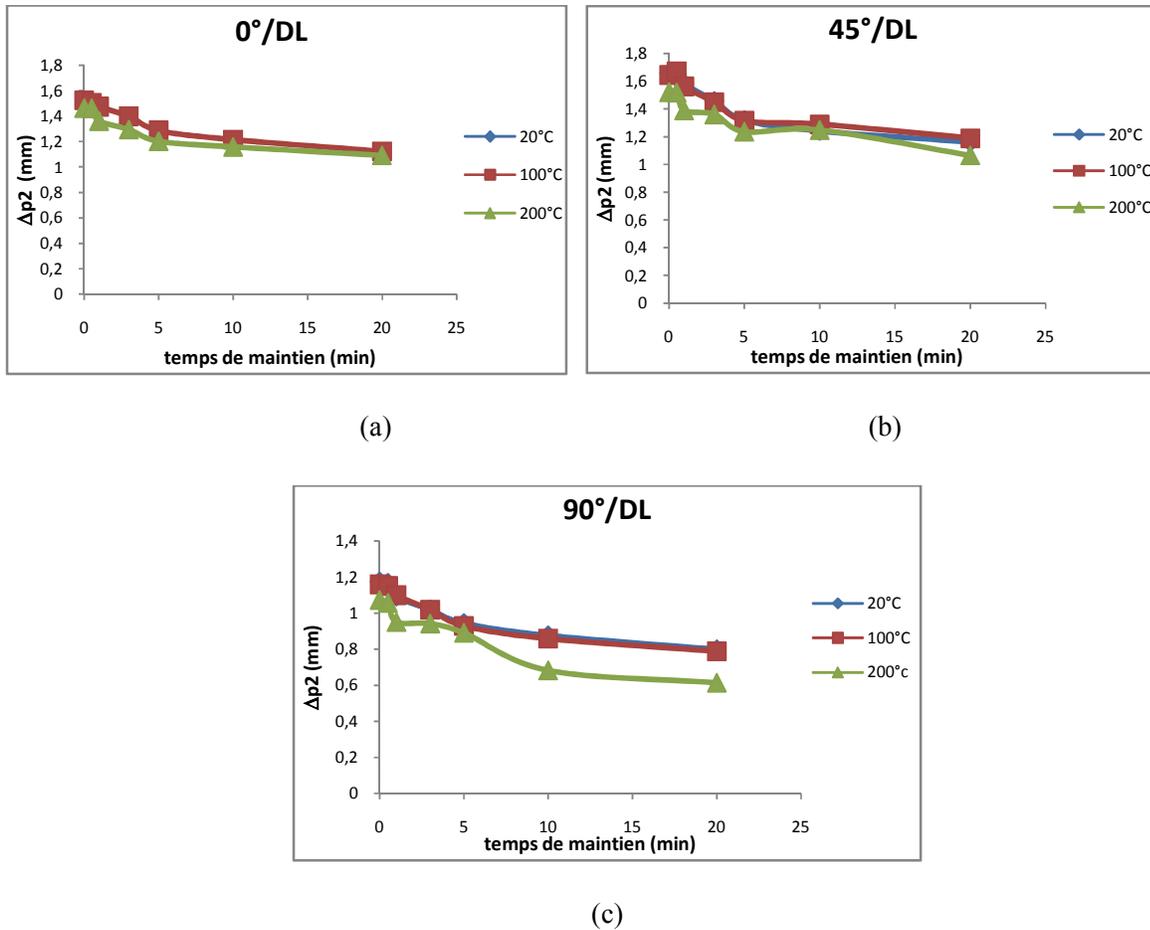


Figure 2. 24 : Variation du retour élastique final avec le temps de maintien pour les trois directions de laminage (0°,45° ,90°) et différentes températures de recuit,

2.8.1.1.6 Effet du rayon de matrice et du rayon du poinçon

Comme le montre la figure 2.25, l'augmentation du rayon de la matrice augmente l'angle de retour élastique pour les alliages d'aluminium étudiés. On peut expliquer qu'une augmentation du rayon de la matrice est similaire à une augmentation effective de l'ouverture de la matrice dans un sens restreint. Dans ce cas, les points de contact entre la tôle et l'outil sont plus espacés. Ceci augmente le bras de moment et donc le moment de flexion [105]. Par conséquent, une augmentation du rayon de la matrice augmente l'angle de retour élastique.

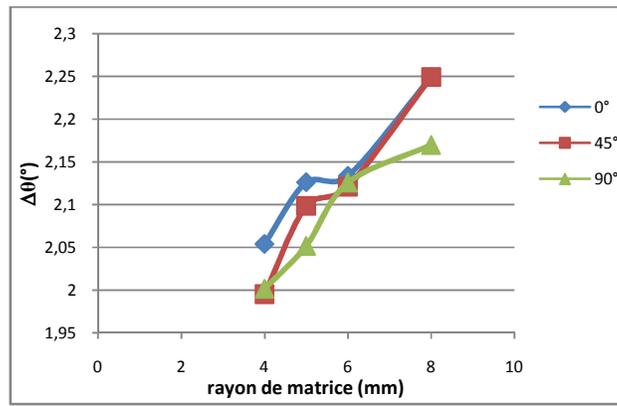
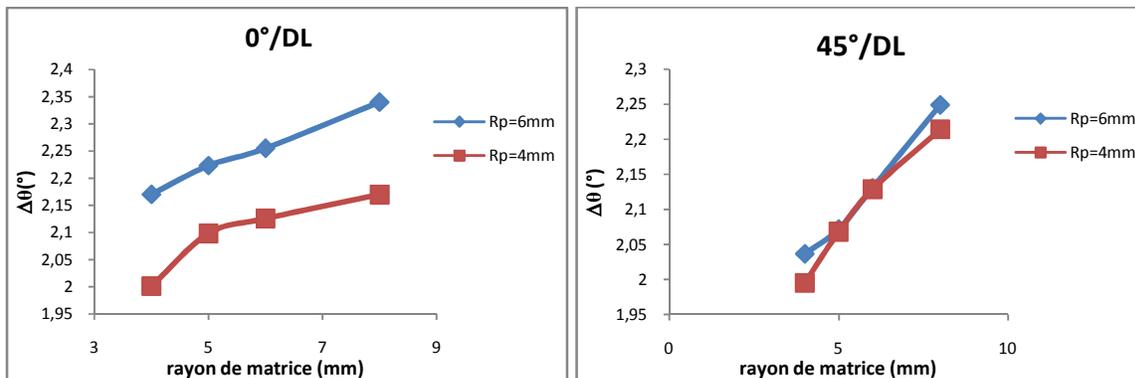


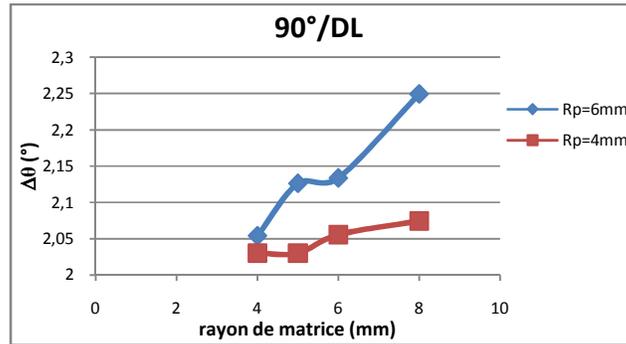
Figure 2. 25 : Influence du rayon de la matrice sur le retour élastique pour différentes direction de laminage,

L'influence du rayon du poinçon sur les angles de retour élastique est illustrée sur la figure (2.26 : a, b, c). On constate que l'angle de retour élastique augmente avec l'augmentation des rayons du poinçon pour les tôles d'alliage d'aluminium étudié. De plus, les rayons du poinçon les plus grands entraînent un niveau de déformation locale plus élevé et une déformation plastique plus importante [84], et donc un retour élastique est agrandi.



(a)

(b)



(c)

Figure 2. 26 : Effet du rayon du poinçon sur le retour élastique final pour différentes directions de laminage et différents rayons de matrice,

2.8.1.2 Cas d'essai de pliage en air

2.8.1.2.1 Effet de l'anisotropie et de l'ouverture de la matrice

La figure 2.27 montre les angles de retour élastique pour l'alliage d'aluminium dans les trois orientations 0° , 45° et 90° pour différentes ouvertures de la matrice. Notez que l'augmentation de l'ouverture de la matrice augmente les valeurs de retour élastique [84].

On observe que l'orientation a une grande influence sur le retour élastique aussi bien pour la direction 90° , et que le flan à 45° présente un retour élastique inférieur à celui de l'orientation 0° . Il est bien entendu que l'angle de retour élastique est fonction de la limite d'élasticité par rapport au module d'élasticité (σ_y/E) [12], qui est plus élevé dans le sens de laminage que dans le sens transversal.

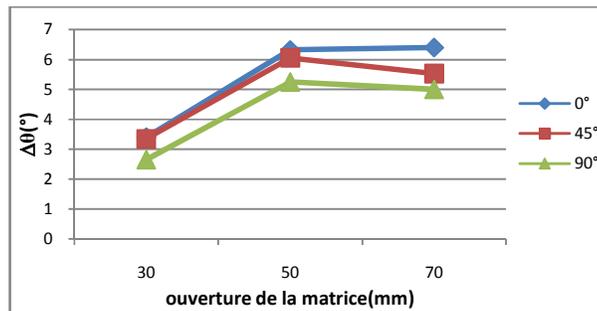


Figure 2. 27 : Résultats du retour élastique en fonction d'ouverture de la matrice pour différentes directions de laminage,

2.8.1.2.2 Effet de la vitesse du poinçon

L'influence de la vitesse du poinçon sur les valeurs de retour élastique est illustrée à la figure 2.28 et à la figure 2.29. On peut constater que la vitesse de déformation a une influence limitée sur la quantité

du retour élastique pour les tôles d'alliage d'aluminium. La raison peut en être la faible vitesse de déformation [37].

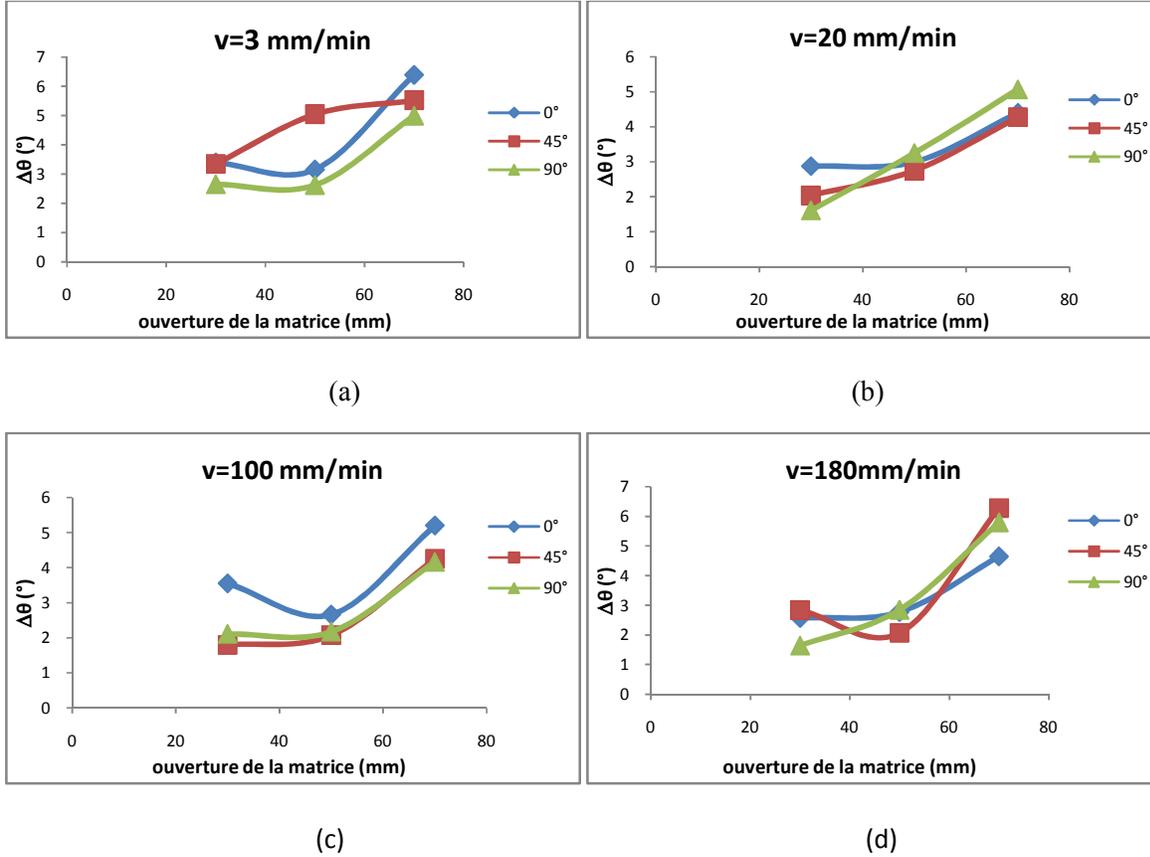
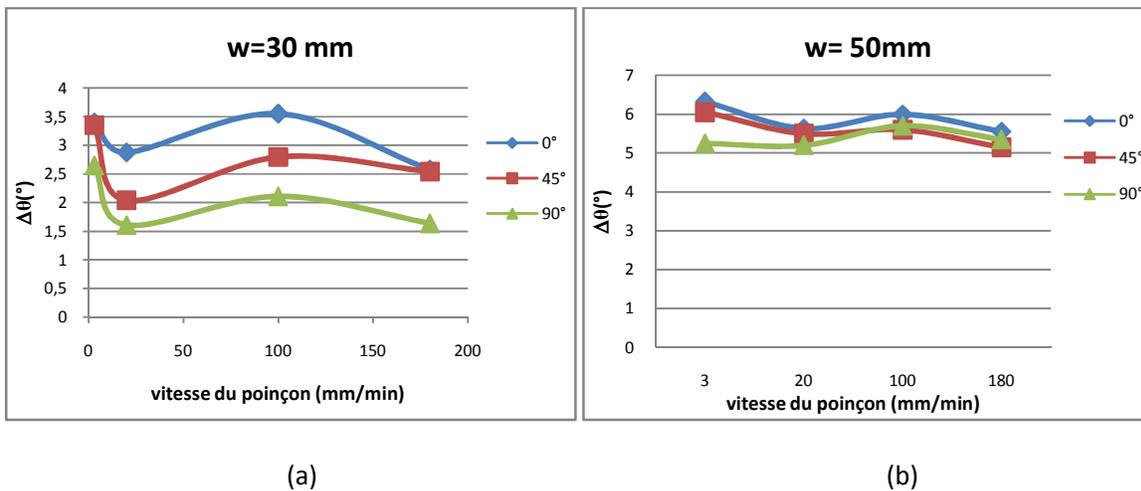
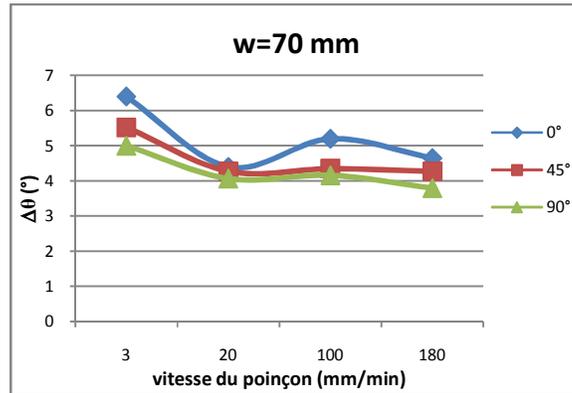


Figure 2. 28 : Variation d'angle de retour élastique avec l'ouverture de la matrice dans différentes orientations et différentes vitesses de déformation,



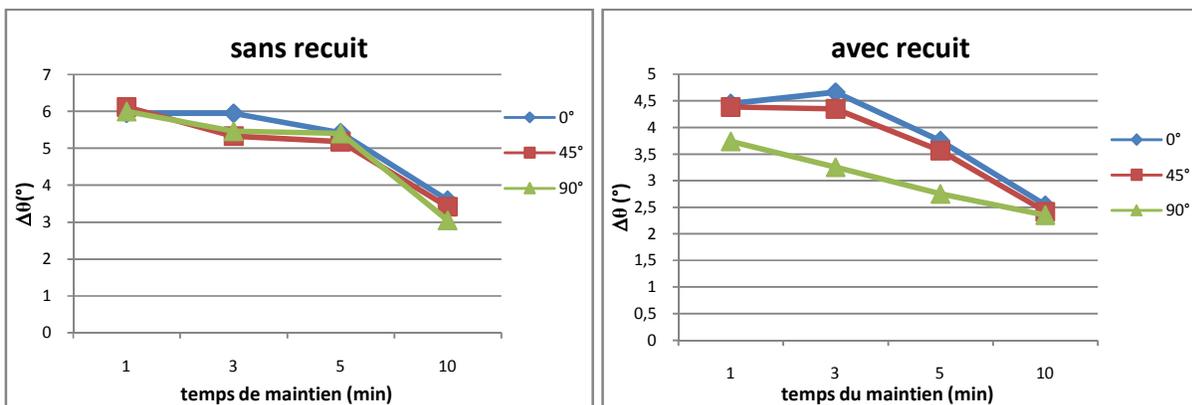


(c)

Figure 2. 29 : Angle de retour élastique en fonction de vitesse de déformation dans trois directions de laminage (0°,45°,90°) pour différentes ouverture de matrice,

2.8.1.2.3 Effet du temps de maintien et de traitement thermique

Dans les industries, le choix d'un temps est important. Pour cela, la qualité du produit dépend de trouver la relation entre le temps faible et l'amélioration du produit. Dans cette étude, il a été constaté que le temps de maintien est inversement proportionnel au comportement du retour élastique ; ceci peut être lié aux caractéristiques de l'alliage d'aluminium utilisé. Lorsque le temps de maintien augmente, le retour élastique diminue pour les éprouvettes d'alliage d'aluminium avec et sans traitement de recuit, comme le montre la figure 2.30. Donc, le temps de maintien est un paramètre technologique qui a un effet non négligeable sur ce phénomène physique.



(a)

(b)

Figure 2. 30 : Variation de l'angle du retour élastique en fonction du temps de maintien pour différentes directions de laminage.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous sommes en mesure de présenter brièvement le matériau utilisé pour cette étude qui est l'alliage d'aluminium (5086-H111), sa désignation, sa structure cristalline, leur utilisation, ... etc. Comme nous avons consacré à la caractérisation du comportement mécanique de celle-ci, en se basant sur l'essai de traction, où il y a une explication détaillée de cette technique de caractérisation. Ces essais de traction uniaxial ont été réalisés sur des échantillons avec et sans traitement thermique de recuit découpés dans trois directions par rapport au sens de laminage (0°, 45°, 90°), pour caractériser le comportement anisotrope de la tôle en alliage d'aluminium. D'après ces essais, nous avons pu déterminer plusieurs grandeurs essentielles comme le module d'élasticité, la limite élastique, la résistance mécanique, les coefficients d'anisotropie, etc. Afin de connaître la composition chimique du matériau étudié, un test d'analyse chimique a été réalisé au moyen de la technique de spectrométrie fluorescence X. Ainsi, des essais de micro-dureté ont été réalisés sur des échantillons avec et sans traitement thermique de recuit. Aussi, nous avons fait une étude métallographique de notre alliage pour révéler la microstructure de ce dernier. Par la suite, une description et une modification ont été présentées sur l'outillage de mise en forme pour le procédé d'étirage-plier (emboutissage en U). Cette modification nous a permis d'étudier plusieurs paramètres influent le retour élastique comme la profondeur d'étirage, la vitesse de déformation, l'anisotropie, le jeu entre le poinçon et la matrice, et le temps de maintien du poinçon sur le flan, ainsi que la température. Afin de mettre en évidence cette influence, une étude expérimentale des deux procédés de formage étudiés (emboutissage en U et pliage à l'air V) et du retour élastique a été effectuée. Cette étude a mené à des résultats très importants sur le comportement du retour élastique pendant ces deux procédés.

Chapitre 3 : Analyse numérique et optimisation

3.1 Introduction

Afin de prédire plusieurs phénomènes rencontrés lors de la mise en forme des tôles avec la plus grande précision possible, et éviter la cherté des essais expérimentaux et aussi de gagner le temps de fabrication, l'outil de simulation numérique par éléments finis devient un moyen robuste pour la mise au point des modélisations des phénomènes rencontrés lors de la mise en forme et particulièrement le phénomène du retour élastique. Pour que la simulation de la mise en forme des pièces soit correcte et fiable, la modélisation du comportement réel du matériau soumis à différentes sollicitations mécaniques est un facteur très important. Pour cela, il y a plusieurs sortes d'identification et d'implantation de ces modèles dans les codes de calcul éléments finis, soit par le choix du modèle d'après les modèles existents dans la bibliothèque du logiciel utilisé, soit par l'intégration des sous-routines écrites sous Python ou Fortran. Dans ce chapitre, l'évaluation numérique du retour élastique lors de la mise en forme des éprouvettes plates d'alliage d'aluminium de forme rectangulaire par les procédés de pliage à l'air V et d'étirage-piage (emboutissage en U) a été présentée. Lors de ce travail, et pour cette simulation, le code éléments finis Abaqus adopté pour mettre en évidence le problème du retour élastique lors de la mise en forme par ces deux procédés. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus expérimentalement dans le chapitre précédent. Puis, nous exposons la démarche d'optimisation par plans d'expériences appliquée aux procédés de formage étudiés (pliage à l'air en V et l'emboutissage en U).

3.2 Simulation des deux procédés de formage et du retour élastique

Dans le cadre de cette simulation, le logiciel Abaqus est utilisé pour réaliser nos simulations. Il existe différentes versions d'Abaqus : Abaqus/Explicit qui emploie un schéma explicite pour résoudre les problèmes dynamiques et quasi-statiques et Abaqus/Standard (implicite) qui utilise un schéma d'intégration implicite pour résoudre les problèmes statiques, dynamiques linéaires ou non linéaires.

L'étude numérique du procédé d'emboutissage en U est effectuée avec le code éléments finis Abaqus/Explicit, en conséquence de la complexité des conditions de contact et de problème de frottement entre les différentes pièces qui sont nombreux dans ce procédé, tandis que les résultats de simulations numériques du retour élastique ont été obtenus par une approche quasi-statique implicite. Dans plusieurs travaux réalisés sur la prédiction du retour élastique (par exemple, Lee et al. [80]) l'étape d'emboutissage est simulée au moyen d'un code explicite, afin d'éviter les difficultés de convergence de

l'équilibre rencontrées dans un code implicite. Les résultats sont ensuite importés du code explicite vers le code implicite afin de simuler l'étape du retour élastique.

Pour que la simulation numérique doit être valide, Il faut prendre en compte l'influence de plusieurs facteurs sur la précision des résultats du calcul. Les résultats de la simulation dépendent directement de la géométrie, du comportement réel du matériau, du type de calcul (tridimensionnel, axisymétrique,...), du maillage (type et taille des éléments finis), des conditions aux limites, de gestion de contact, etc...

Un modèle bidimensionnel en déformations planes sera utilisé. Les différentes parties du dispositif de formage (matrice, serre-flan, poinçon) sont décrites par des surfaces rigides analytiques, alors que le flan est modélisé comme une surface déformable et a été maillés avec des éléments linéaires à intégration réduite CPE4R (Figure 3.1). Nous n'avons spécifié qu'une moitié de flan, en utilisant la symétrie du problème pour réduire le temps de calcul.

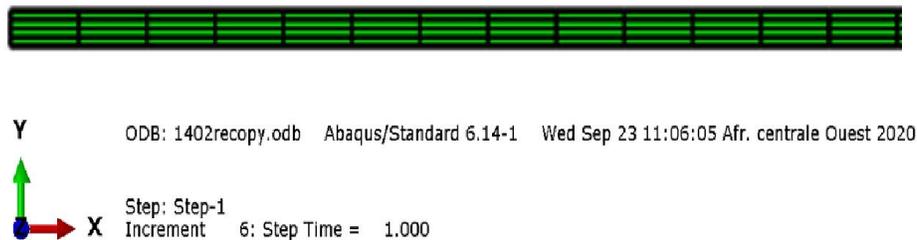


Figure 3. 1 : Maillage du flan avec des éléments CPE4R,

Le flan a une épaisseur de 0.8 mm et il est serré entre le serre-flan et la matrice. Une condition d'encastrement a été imposée au flan pour représenter le jonc de serrage. La force du serre-flan est une force concentrée appliquée au point de référence (set) du serre-flan. Elle a été déterminée par le calcul du couple de serrage sur chaque extrémité du flan par l'utilisation de la formule de Kellermann et Klein [134]. Cette force, associée au frottement entre le flan et le serre-flan et le serre-flan et la matrice. Pour nos simulations, la loi de Coulomb est utilisée pour modéliser le contact entre les outils et le flan. Le coefficient de frottement utilisé est de 0,2, coefficient habituellement utilisé entre l'acier et l'aluminium. L'effet de frottement entre le poinçon et le flan est négligé. Tous les degrés de liberté de la matrice sont bloqués (encastrement). Pour éviter les phénomènes d'accélération et les effets d'inertie dans la simulation, on a choisi un déplacement du poinçon de type progressif (smooth step). L'analyse est principalement composée de deux étapes. La première est l'étape d'emboutissage en U qui consiste à exercer un effort de serrage uniformément réparti par le serre flan sur la tôle et d'appliquer ensuite un

déplacement imposé au poinçon jusqu'à atteindre la profondeur voulue (Figure 3.2). La seconde étape est celle du retour élastique qui consiste à enlever les outils de manière à obtenir un relâchement de la tôle. La figure (3.3) présente le modèle 2D en déformations planes du procédé d'étirage-plierage (emboutissage en U). Il est possible de mesurer la quantité de retour élastique en comparant la déformation acquise à cette étape avec la déformation à la fin de l'étape d'étirage (Figure 3.4).

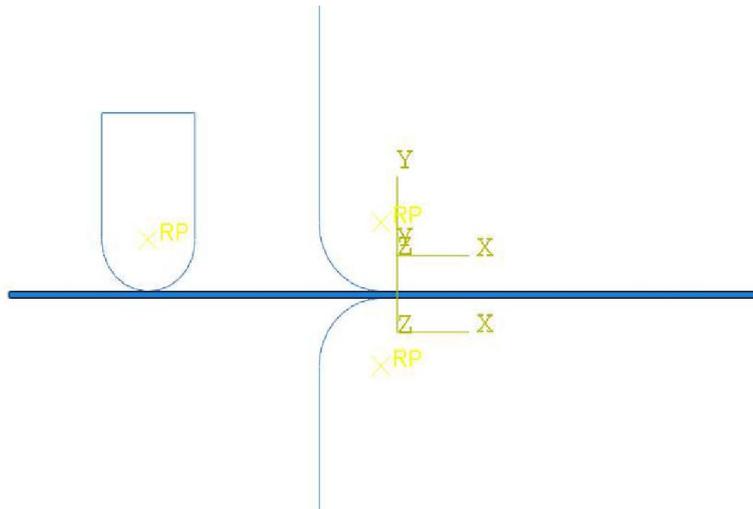
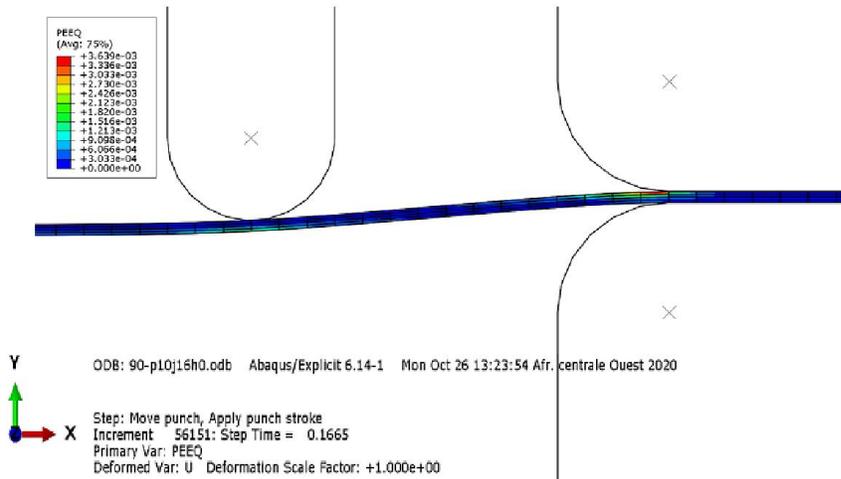
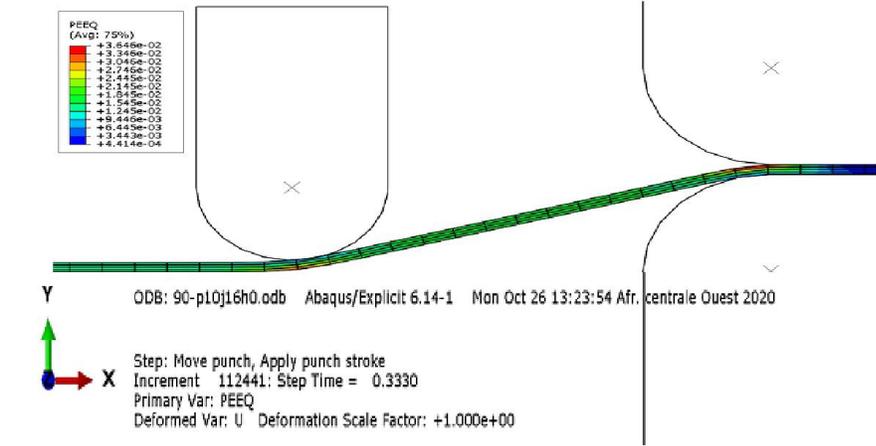


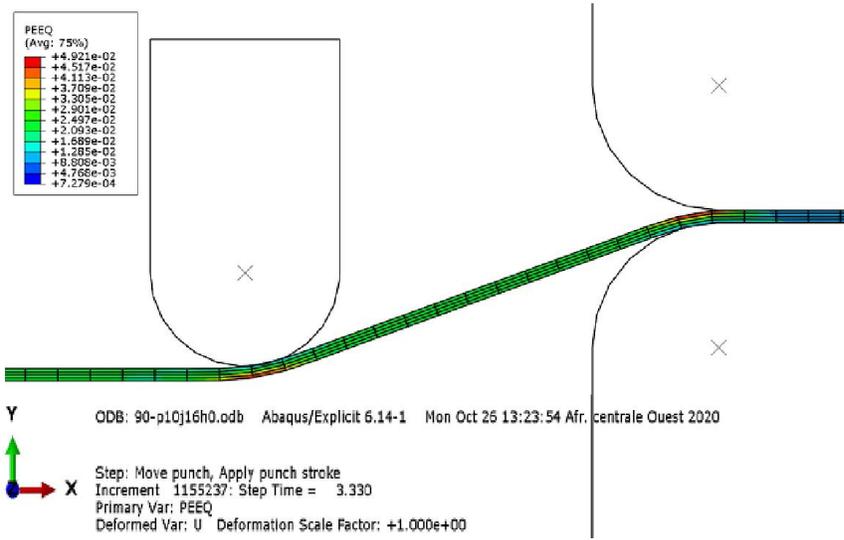
Figure 3. 2 : Le modèle 2D en déformation plane de procédé d'étirage-plierage,



(a)



(b)



(c)

Figure 3.3 : Etapes du procédé d'étrage-piage,

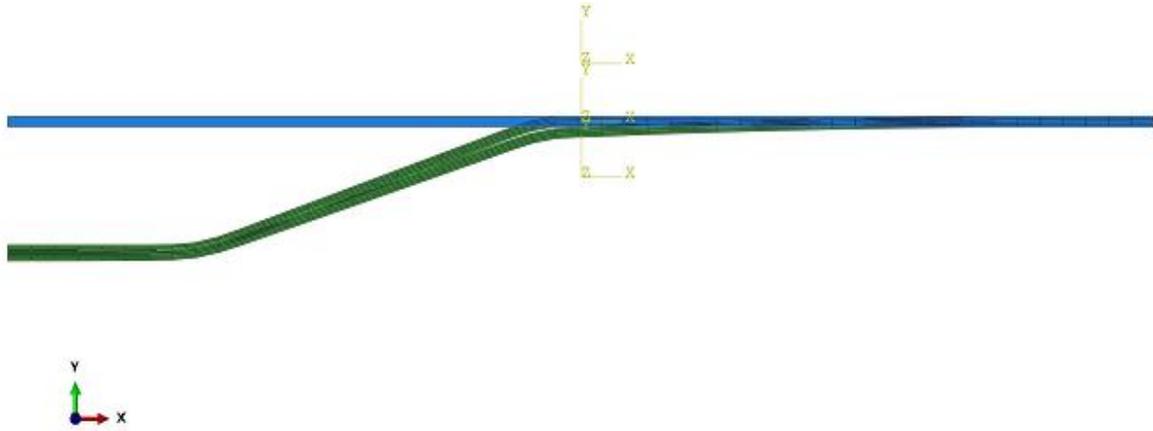


Figure 3. 4 : La pièce déformée avant et après le phénomène du retour élastique,

La figure (3.5) présente l'évolution des contraintes de déformation plastique juste avant l'annulation de l'outillage. Nous pouvons constater que les contraintes maximales de déformation plastique se localisent aux coins des rayons du poinçon et de la matrice.

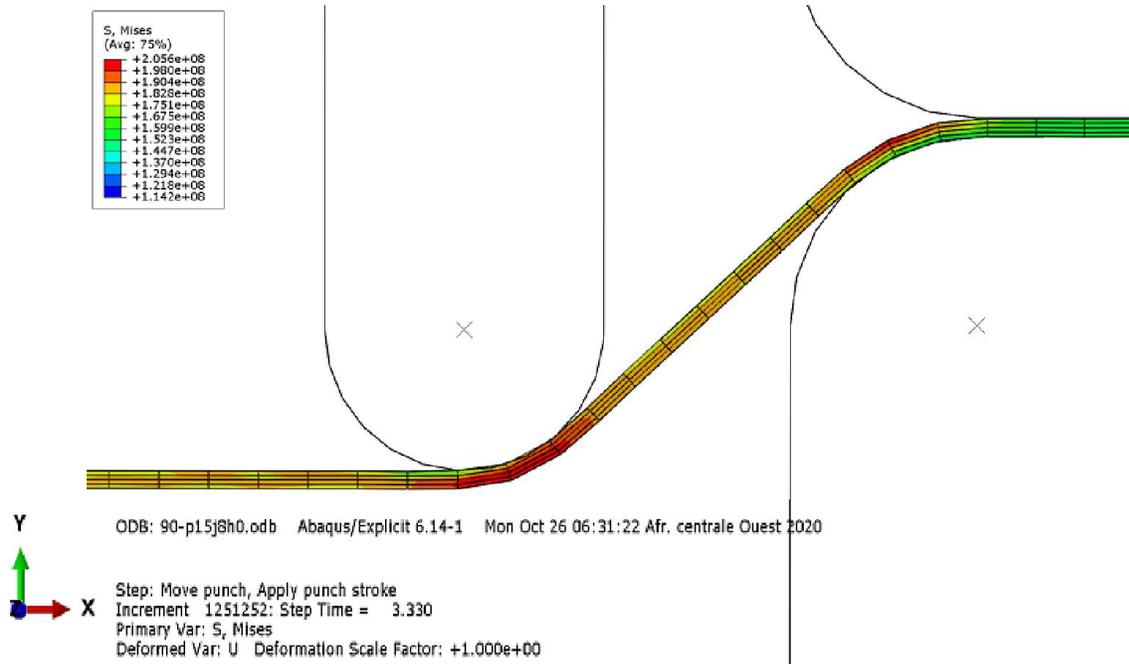


Figure 3. 5 : Localisation des contraintes maximales de déformation aux rayons des outils,

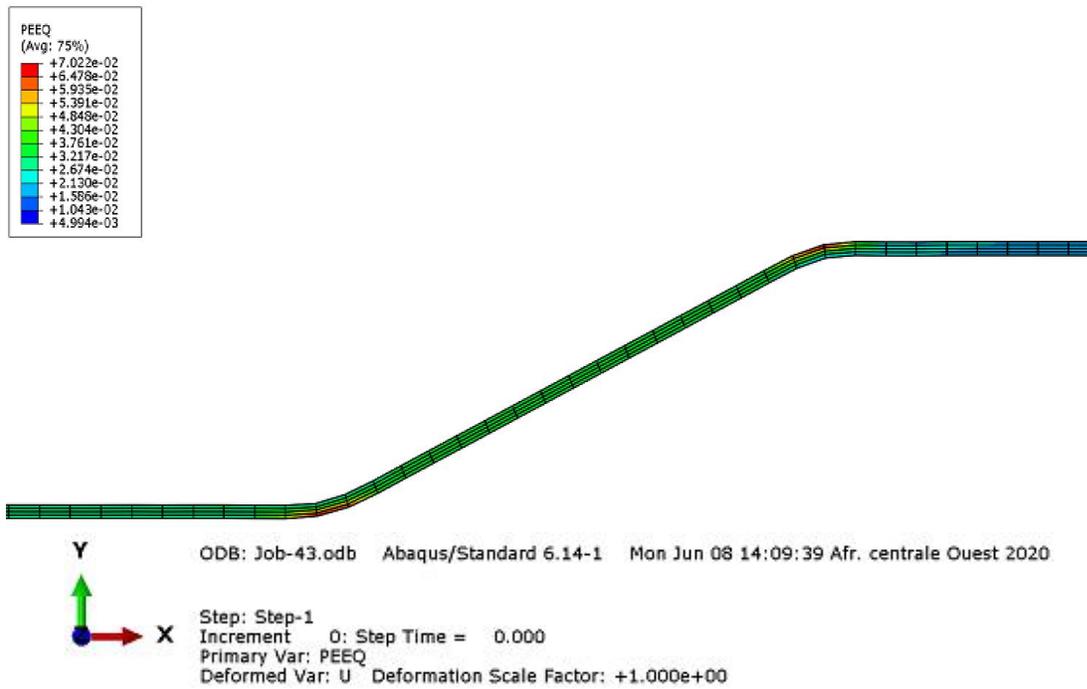


Figure 3. 6 : Cas d’une distribution des déformations plastiques équivalentes dans l’épaisseur,

Grâce aux essais expérimentaux précédemment obtenus de traction monotone (chapitre 2) des nombreuses éprouvettes prélevées dans différentes directions (0°, 45°, 90°) par rapport au sens de laminage, on peut identifier les différents paramètres nécessaires pour la simulation des essais d’étirage-pliage. Nous avons introduit dans le logiciel d’éléments finis Abaqus les propriétés mécaniques du matériau, les paramètres du procédé, les dimensions principales des différents outils, qui sont récapitulés dans le tableau (3.1). Un modèle de comportement de type élasto-plastique anisotrope a été implantée, en utilisant le critère de plasticité de Hill 48. Un modèle d’écrouissage de type Hollomon a été considéré.

Nous avons également introduit les coefficients R_{11} , R_{22} , R_{33} , R_{12} , R_{13} et R_{32} qui sont le rapport des contraintes équivalentes de Hill par rapport à la direction de référence. Ces coefficients s’obtiennent en utilisant les coefficients d’anisotropie, présentés dans le chapitre 2, à partir des formules suivantes :

$$R_{11} = R_{12} = R_{13} = 1 \tag{3.1}$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_y * (r_x + 1)}{r_x * (r_y + 1)}} \tag{3.2}$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_y * (r_x + 1)}{(r_x + r_y)}} \tag{3.3}$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3*r_y*(r_x+1)}{(r_x+r_y)*(2r_{45}+1)}} \tag{3.4}$$

$$r_x = \frac{d\varepsilon_{22}}{d\varepsilon_{33}} = \frac{H}{G} \quad \text{et} \quad r_y = \frac{d\varepsilon_{11}}{d\varepsilon_{33}} = \frac{H}{F}$$

H, G et F représentent les coefficients de Hill calculés dans le chapitre 2 §2.4.1.2.

Tableau 3. 1 : Conditions numérique des deux procédés,

<i>Matériau</i>	<i>Propriétés du matériau</i>	<i>Procédé</i>	<i>Paramètres du procédé</i>	<i>Géométrie de l'outillage</i>
Alliage d'aluminium (5086-H111)	E _{0°} = 6523100 MPa E _{45°} = 6627600 MPa E _{90°} = 9199100 MPa ν=0.31	<i>Emboutissage en U</i>	V=3 ; 20 ;100 ;180 mm/min Force de serrage =10KN μ= 0.2 Profondeur = 10 à 20mm	Rm= 8mm Rp= 6mm Jeu= 9 à 26 mm
		<i>Pliage à l'air</i>	V=3 ; 20 ;100 ;180 mm/min μ= 0.2 Profondeur = 15 mm	Rm= 5mm Rp= 5mm Ouverture de la matrice (W) = 30, 50, 70 mm

Pour le cas de pliage à l'air en V, le matériau brut a une épaisseur de 0,8 mm et a été modélisé aussi avec des éléments de CPE4R; le maillage devait donc être suffisamment dense pour capturer la courbure locale de l'outillage. La simulation de formage en une seule étape était composée de trois éléments qui sont le poinçon, la matrice et le flan, comme le montre la figure (3.7).

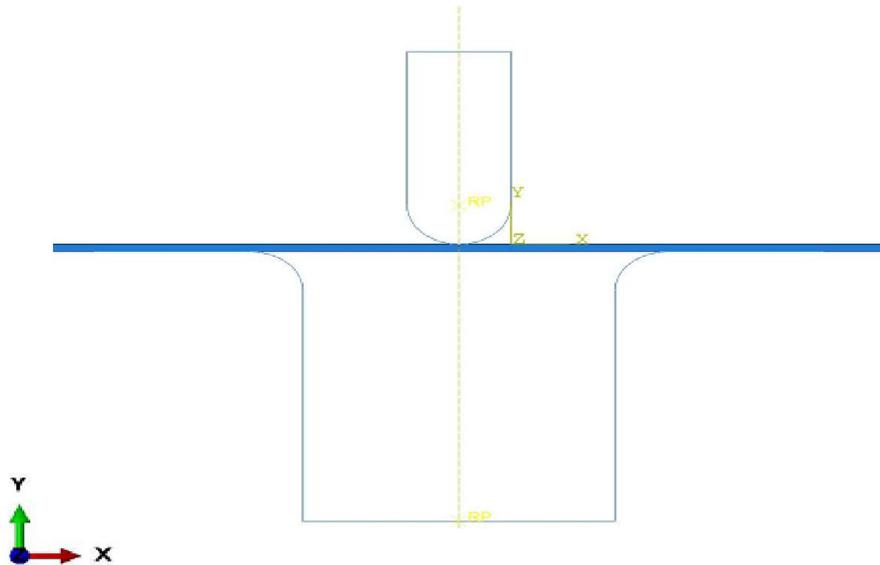


Figure 3. 7 : Modèle 2D à déformation planes du procédé de pliage à l'air en V,

Plusieurs conditions limites différentes ont été imposées à ce modèle. Seule la moitié du modèle a été simulée en raison de la condition de limite de symétrie le long du plan x-y. Le poinçon était contraint dans toutes les directions, à l'exception de la translation dans l'axe y.

La matrice était contrainte dans toutes les directions. Un mouvement de vitesse sinusoïdal avec une vitesse de pointe variable de 3 à 180mm/min a été imposé au poinçon pour un déplacement dans la direction positive de l'axe y jusqu'à ce que le poinçon arrive à la profondeur voulue (Figure 3.8). La forme d'onde sinusoïdale a été utilisée pour minimiser les effets d'inertie lors du contact initial entre la pièce mise en forme et l'outillage. Deux conditions limites de contact surface à surface basées sur des pénalités ont été imposées entre le flan et les deux composants de l'outillage (matrice et poinçon).

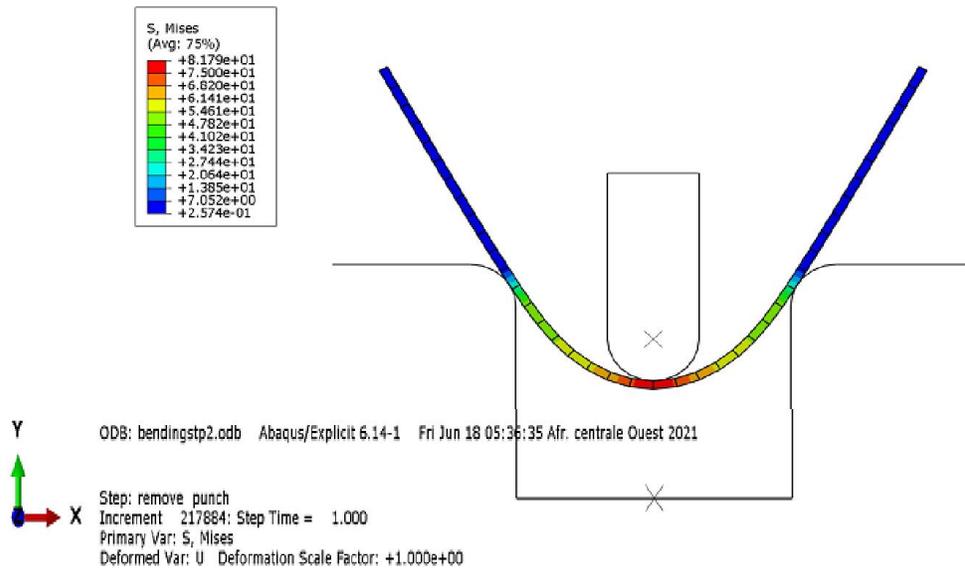


Figure 3. 8 : Mise en œuvre numérique du procédé de pliage à l’air en V,

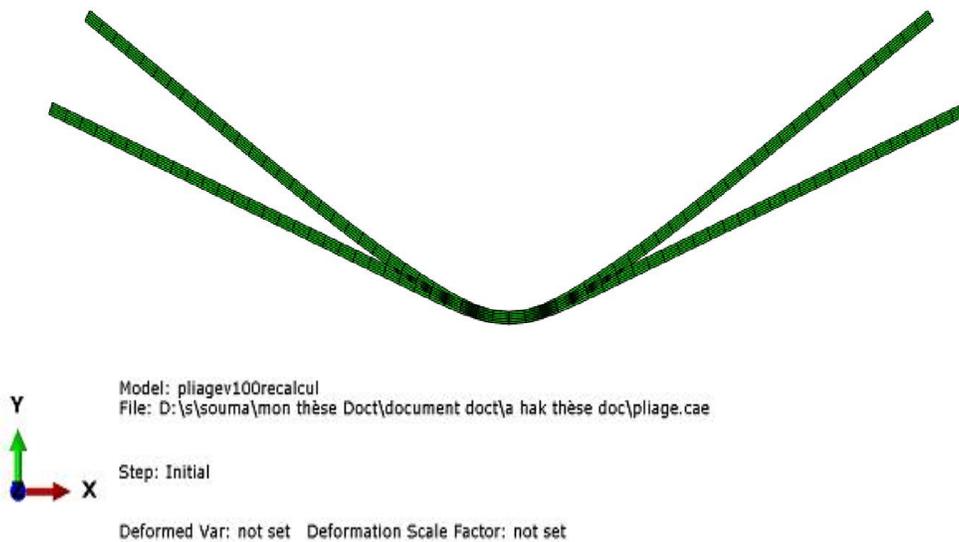


Figure 3. 9 : Géométrie de la déformée avant et après retour élastique,

3.3 Résultats et discussions

3.3.1 Cas d’essai d’emboutissage en U

Pour mettre en évidence la différence entre les résultats issus de la simulation numérique et les résultats expérimentaux, un modèle bidimensionnel en déformations planes a été utilisé, avec une implémentation des principaux paramètres nécessaire à cette simulation. Le retour élastique primaire Δp_1 est calculé numériquement en utilisant la courbe temps-déplacement (U_2) donnée sur la figure (3.10). La géométrie finale de la pièce déformée après retrait complet des outils et relâchement de cette dernière avec l'étape du retour élastique est donnée sur la figure (3.11).

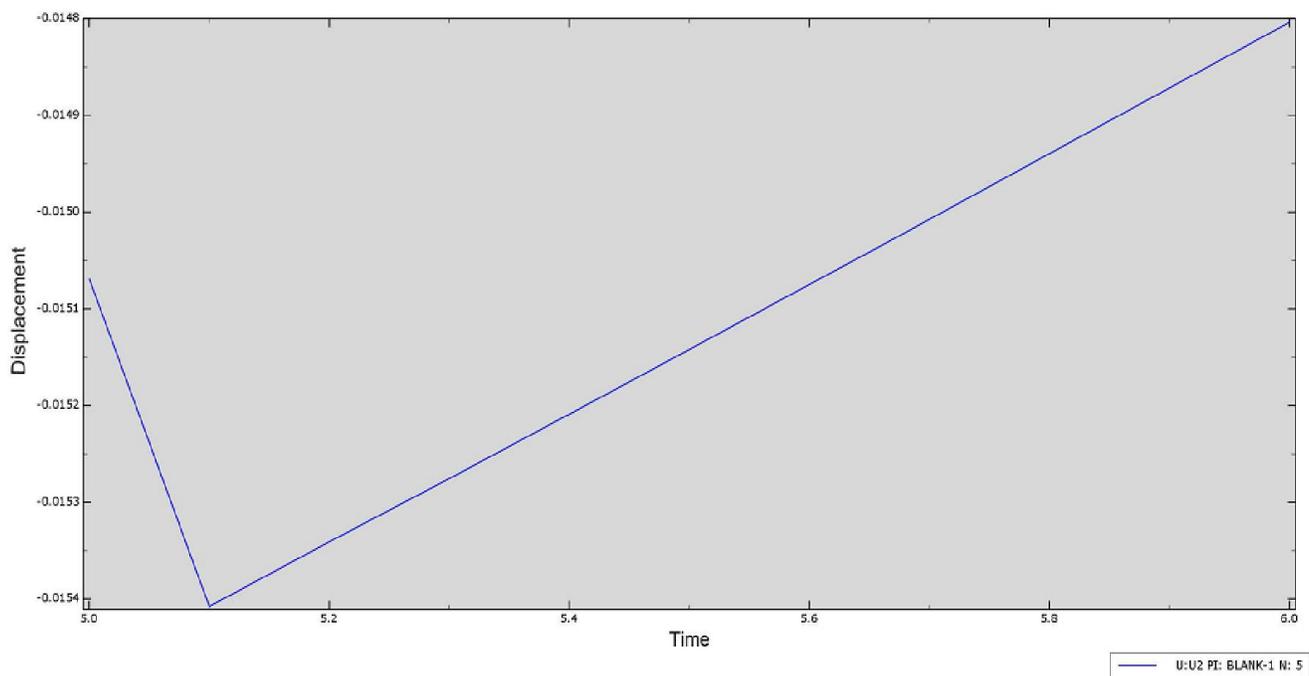


Figure 3. 10 : La courbe temps-déplacement (U_2) numérique pour mesurer le retour élastique,

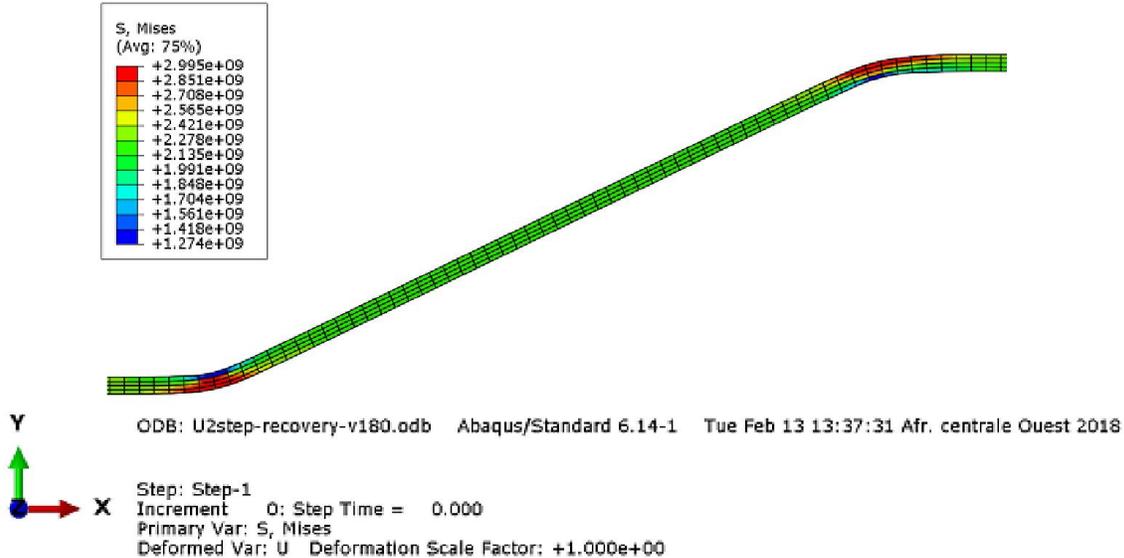
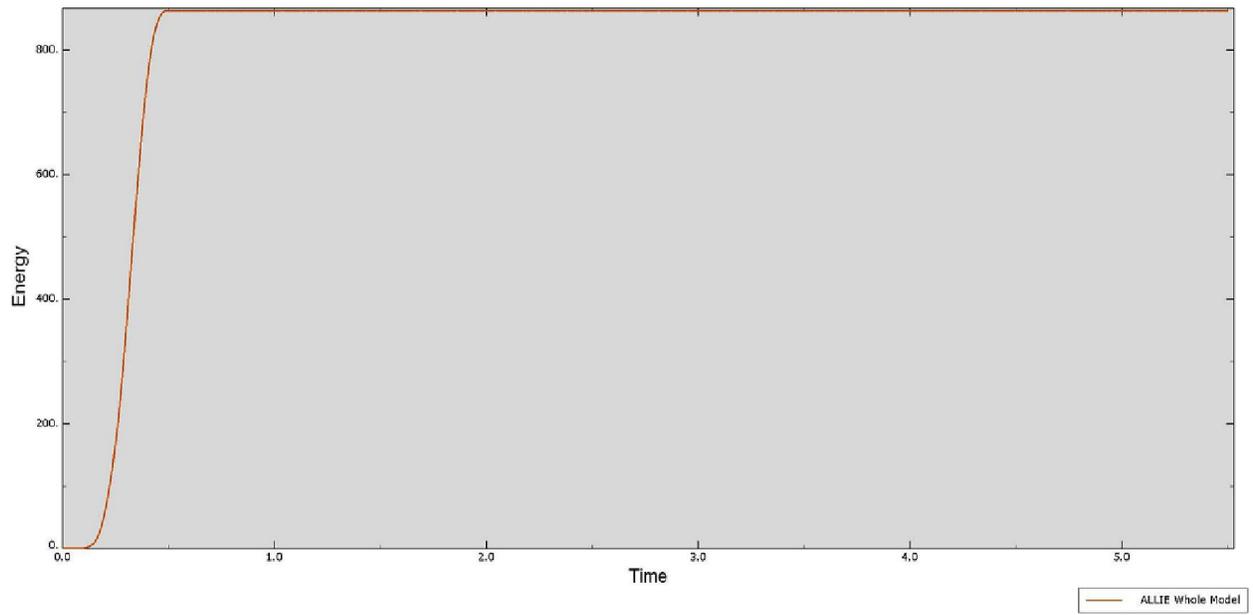
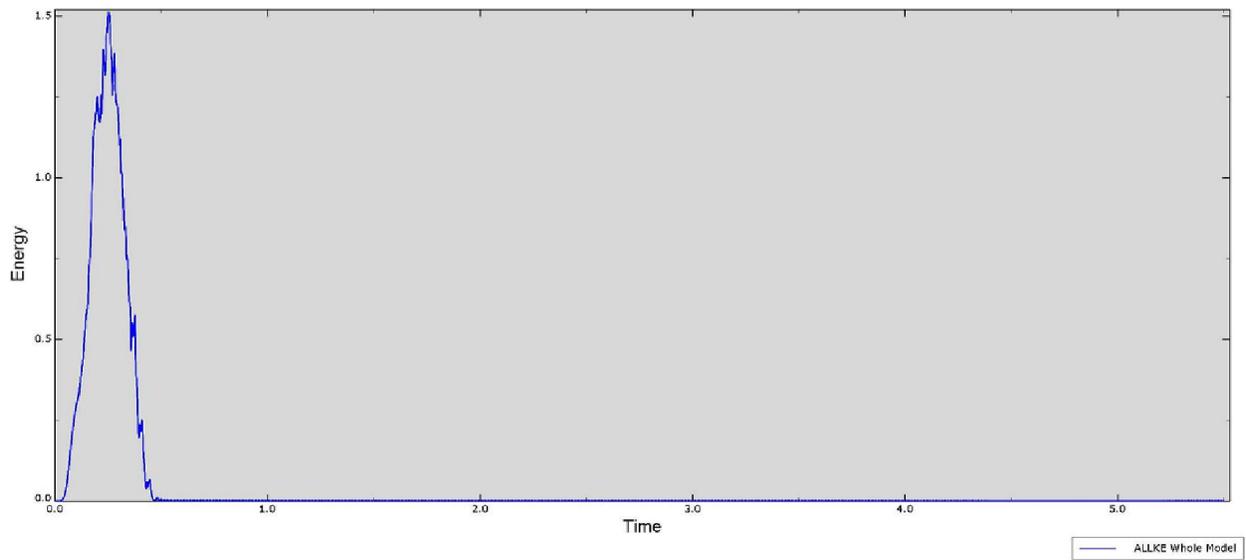


Figure 3. 11 : La géométrie de la pièce déformée après retour élastique avec un amincissement qui dû aux efforts d'étirage pour une grande profondeur d'étirage,

L'énergie cinétique, l'énergie interne et le travail externe ont également été contrôlés pour s'assurer que les effets dynamiques étaient négligeables dans les simulations. Si l'énergie cinétique est significativement faible par rapport à l'énergie interne et au travail externe, l'échelle de masse est considérée comme acceptable dans la simulation. La figure (3.12) : (a) et (b) montre l'évolution d'énergie cinétique et interne pour la simulation du procédé d'étirage-plier (emboutissage en U), il est cependant à souligner que l'énergie cinétique ne dépasse pas 5% de l'énergie interne. La courbe représentative de la variation de la force appliquée par le poinçon en fonction du déplacement qui lui est imposé est donnée sur la figure 3.13.



(a)



(b)

Figure 3. 12 : L'énergie cinétique (a), et l'énergie interne (b) pour la simulation de procédé d'étirage-pliage,

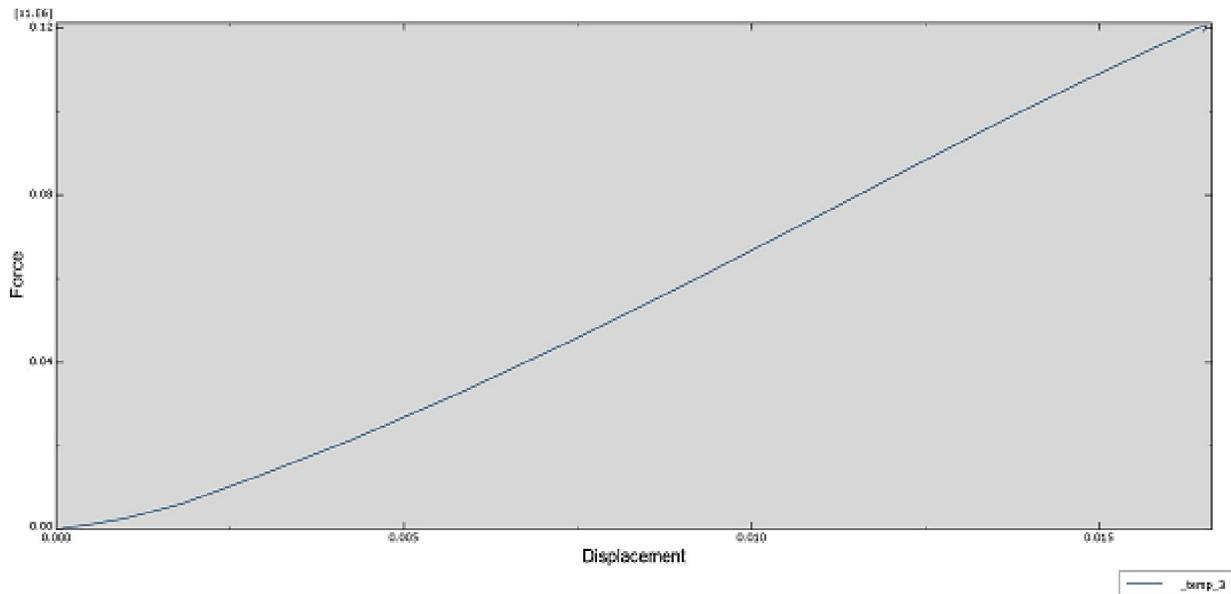


Figure 3. 13 : Courbe force-déplacement numérique pour un procédé d'étirage-plierage (90° , $p=10$ mm, jeu=16mm),

3.3.1.1 Effet de la profondeur d'étirage et de l'anisotropie

Dans le cadre de cette étude, une prédiction de l'effet de la profondeur d'étirage sur le retour élastique a été effectuée. Afin de permettre de voir l'influence de l'anisotropie initiale sur la prédiction du retour élastique, différents paramètres qui sont identifiés précédemment dans les différentes directions de prélèvement de l'éprouvette (0° , 45° , 90°) par rapport au sens de laminage, sont introduits dans le code de calcul Abaqus. La figure (3.14) décrit les résultats numériques de la variation du retour élastique primaire Δp_1 en fonction de la profondeur d'étirage pour différentes directions (0° , 45° , 90°) par rapport au sens de laminage. Les résultats obtenus montrent que la quantité du retour élastique diminue progressivement en augmentant la profondeur d'étirage, il en résulte une forte déformation plastique donc un fort écrouissage, et ça pour les trois directions de prélèvement des éprouvettes. Donc, on peut voir que l'anisotropie initiale a une influence significative sur le retour élastique comme décrit auparavant.

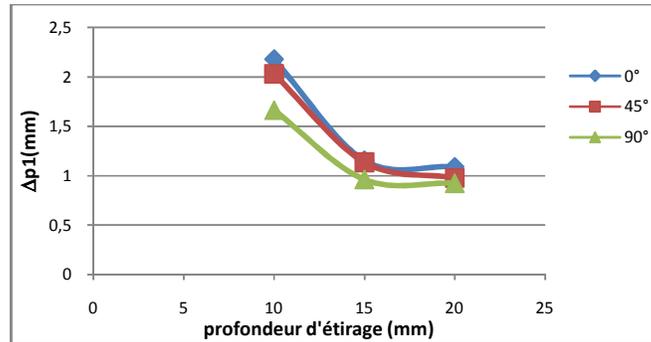


Figure 3. 14 : Résultats numérique de l'effet de la profondeur d'étirage et de l'anisotropie initiale sur le retour élastique,

3.3.1.2 Effet de la vitesse du poinçon

La figure (3.15) montre l'effet de la vitesse de formage sur le retour élastique. Comme prévue, la vitesse de formage n'affecte le retour élastique qu'à des valeurs élevées en raison de la sensibilité accrue à la vitesse de déformation, comme l'ont montré précédemment les résultats des essais expérimentaux.

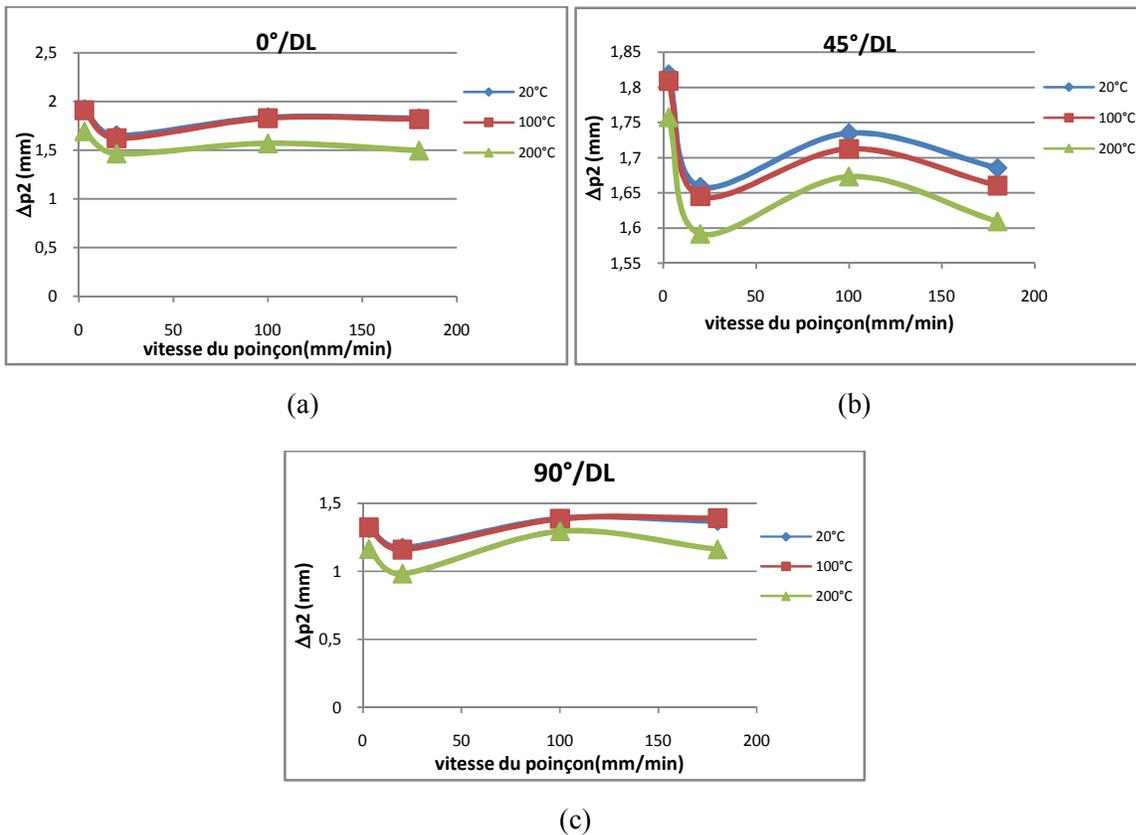


Figure 3. 15 : Résultats numériques du retour élastique en fonction de la vitesse du poinçon pour différentes températures de recuit,

3.3.1.3 Effet du jeu entre poinçon et matrice

La figure (3.16) présente l'effet du jeu (espace) entre le poinçon et la matrice sur le retour élastique. On peut voir que ce facteur a une influence significative sur le retour élastique. Donc, l'augmentation de l'espace entre le poinçon et la matrice augmente la quantité du retour élastique. Il est peut-être dû à la diminution de la déformation plastique dans la pièce déformée.

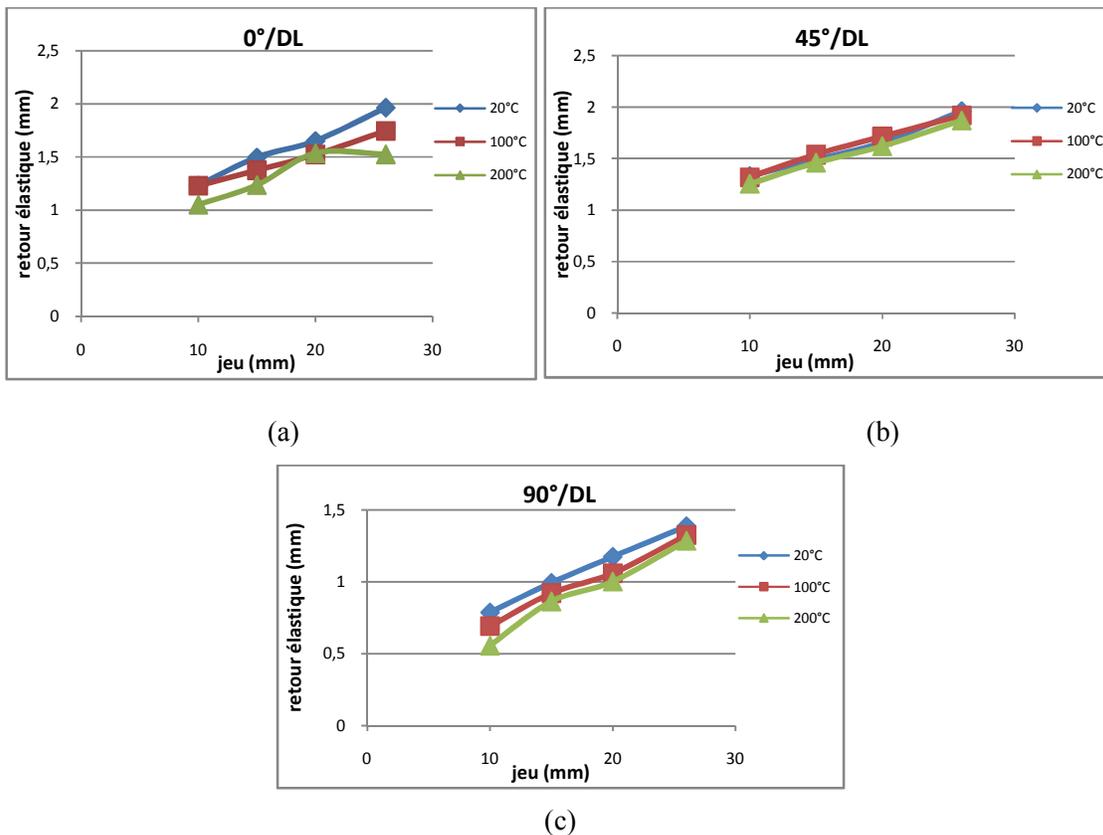


Figure 3. 16 : Résultats numériques du retour élastique en fonction du jeu entre poinçon et matrice pour différentes températures de recuit,

3.3.1.4 Effet du temps de maintien du poinçon sur le flan

D'après l'évolution illustré dans les figures (3.17) nous avons constaté que plus le temps de maintien augmente plus le retour élastique diminue. Cela est démontré précédemment avec les résultats expérimentaux.

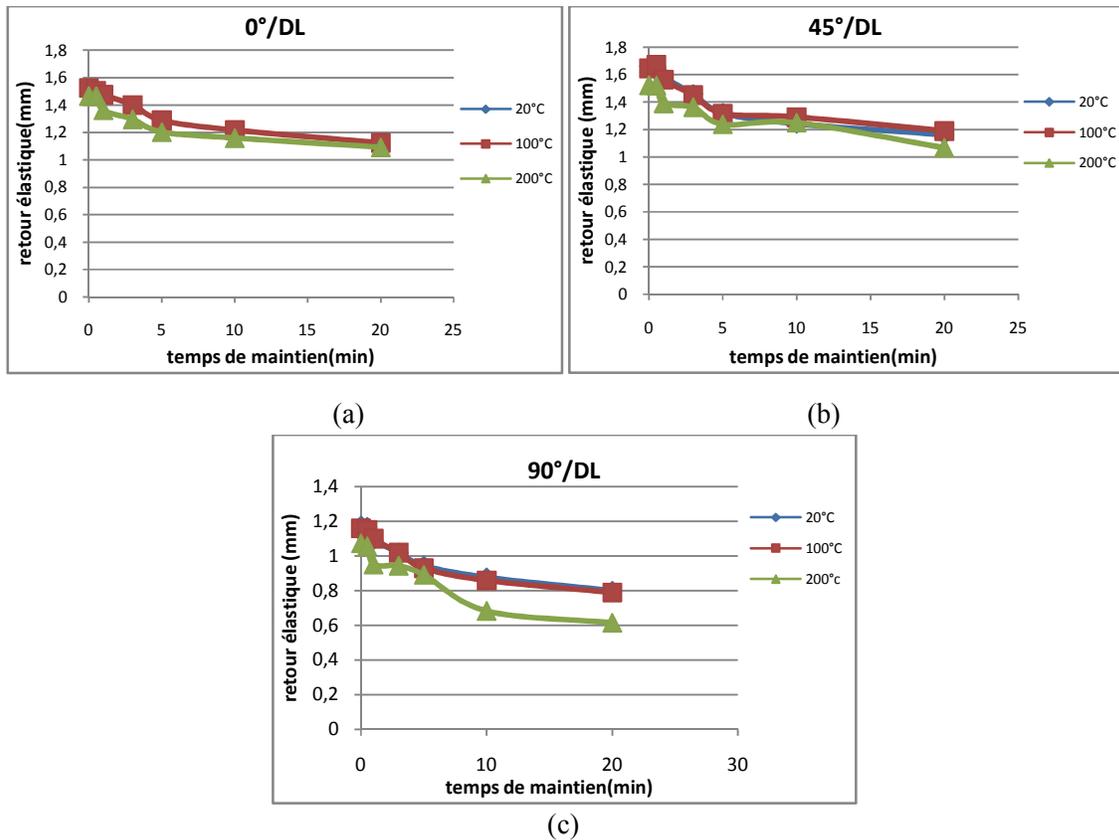


Figure 3. 17 : Résultats numériques de l'influence de temps de maintien sur le retour élastique pour différentes directions de laminage et températures de recuit,

3.3.2 Cas du procédé de pliage à l'air

3.3.2.1 Effet de l'anisotropie

En raison de la texture cristallographique induite par le processus de laminage, les tôles peuvent présenter une anisotropie importante. Par conséquent, l'effet de la direction de la tôle (anisotropie) a été étudié selon trois directions différentes par rapport au sens de laminage. Les résultats du retour élastique sont résumés dans la figure (3.18). Il a été observé que l'anisotropie a un effet clair sur le retour élastique comme il a été déjà présenté auparavant.

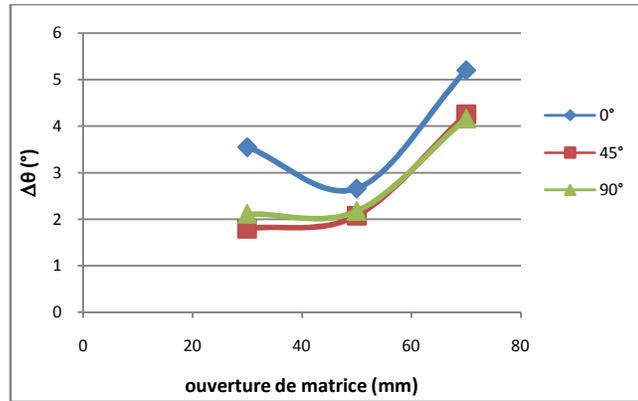
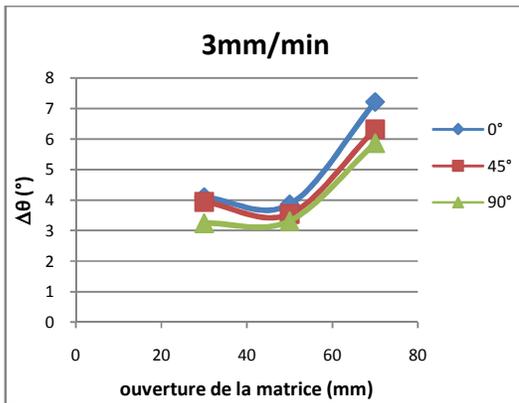


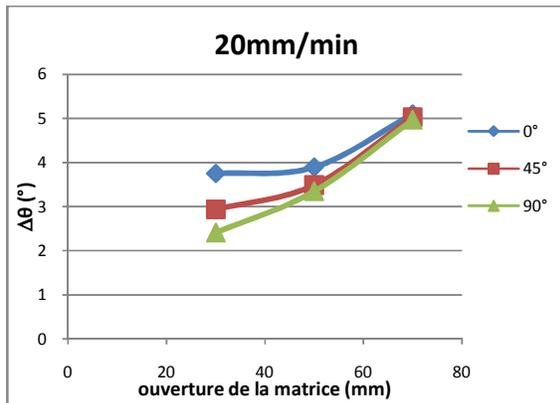
Figure 3. 18 : Influence de l’anisotropie du matériau sur le retour élastique pour différentes ouvertures de la matrice,

3.3.2.2 Effet de l’ouverture de la matrice et de la vitesse du poinçon

En effet, on peut observer que l’angle du retour élastique $\Delta\theta$ ne change pas beaucoup lorsque la vitesse du poinçon varie et augmente lorsque l’ouverture de la matrice augmente, pour toutes les trois directions de laminage. On note que la vitesse du poinçon a un effet limité sur le retour élastique pour les trois directions par rapport à la direction de laminage respectivement 0°, 45°, 90°.



(a)



(b)

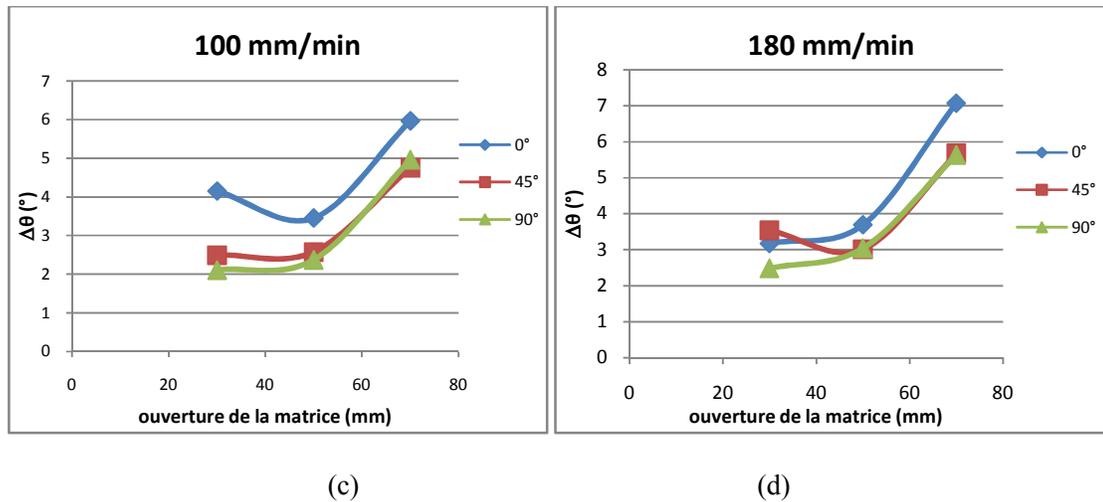


Figure 3. 19 : Variation d’angle de retour élastique avec l’ouverture de la matrice dans différentes orientations et différentes vitesses de déformation,

3.3.2.3 Effet du temps de maintien du poinçon sur le flan

Il a été observé qu’à mesure que le temps de maintien augmentait, le retour élastique diminuait, comme le montre la figure (3.20). La déformation à travers l’épaisseur conduit à une forte contrainte de compression localisée et à la plasticité dans les régions de pliage, ce qui réduit les contraintes résiduelles et le retour élastique qui en résulte. L’effet du temps de maintien du poinçon a été étudié en maintenant la pièce pliée sous la charge du poinçon pendant une durée allant de 1 à 10 min.

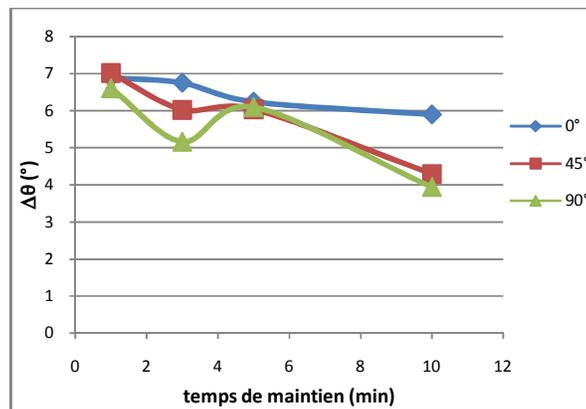


Figure 3. 20 : Effet du temps de maintien sur l’angle du retour élastique $\Delta\theta$ pour différentes directions de laminage,

3.4 Optimisation

Dans les études d’usabilité, les plans d’expériences statistiques sont largement utilisés. La conception statistique d’expérience fait référence au processus de planification de l’expérience de manière

à ce que les données appropriées puissent être analysées par des méthodes statistiques, aboutissant à des conclusions valides et objectives. Les plans et méthodes tels que le plan factoriel, la méthodologie de la surface de réponse (RSM) et les méthodes Taguchi sont maintenant largement utilisés en remplacement de l'approche expérimentale à un facteur à la fois, qui prend beaucoup de temps et dont le coût est exorbitant.

Le RSM permet également de quantifier les relations entre une ou plusieurs réponses mesurées et les facteurs d'entrée essentiels. La version 12 du logiciel Design Expert a été utilisée pour élaborer le plan expérimental du RSM. Le même logiciel a également été utilisé pour analyser les données recueillies.

3.4.1 Optimisation de procédé d'étirage-pliage et de retour élastique

L'objectif essentiel de cette optimisation est d'obtenir la forme cible de l'éprouvette mise en forme, et d'éliminer au maximum la déviation de sa géométrie due au retour élastique. Pour cette raison, un plan d'expérience basé sur la méthode D-optimal de surface de réponse a été utilisé pour analyser les réponses du retour élastique en fonction de plusieurs paramètres de procédés. Pour construire ce plan, six facteurs sont choisis: la vitesse de déformation, la profondeur d'étirage, le jeu entre poinçon et matrice, le temps de maintien, l'anisotropie, et la température, avec une marge minimale et maximale de chaque facteur. Les réponses du plan d'expérience sont étirées des résultats des simulations numériques du retour élastique.

Tableau 3. 2 : Les facteurs choisis pour construire le plan d'expérience,

Factor	Name	Units	Type	Minimum	Maximum	Coded Low	Coded High	Mean	Std. Dev.
A	velocity	mm/min	Numeric	3,00	180,00	-1 ↔ 3,00	+1 ↔ 180,00	80,03	78,87
B	punch travel	mm	Numeric	10,00	20,00	-1 ↔ 10,00	+1 ↔ 20,00	15,00	4,45
C	clearance	mm	Numeric	9,00	15,00	-1 ↔ 9,00	+1 ↔ 15,00	11,94	2,52
D	hold time	s	Numeric	0,0000	300,00	-1 ↔ 0,00	+1 ↔ 300,00	154,17	136,22
E	anisotropy	degree	Categoric	0°	90°			Levels:	3
F	T°C	degree celsius	Categoric	20°C	200°C			Levels:	3

Après l'analyse de chaque réponse, une optimisation des réponses multiples a été effectuée, soit par l'inspection des diagrammes d'interprétation, soit à l'aide des outils graphiques et numériques prévus à cet effet. Il a été mentionné précédemment que les conceptions RSM aident également à quantifier les relations entre une ou plusieurs réponses mesurées et les facteurs d'entrée vitaux. Afin de déterminer s'il existe une relation entre les facteurs et les variables de réponse étudiées, les données collectées doivent être analysées d'une manière statistiquement valable en utilisant la régression.

Une régression est effectuée afin de décrire les données collectées, une variable empirique observée (réponse) étant approximée sur la base d'une relation fonctionnelle entre la variable estimée, y_{est} , et une ou plusieurs variables de régression ou d'entrée x_1, x_2, \dots, x_i . Dans le cas où il existerait une relation non linéaire entre une réponse particulière et trois variables d'entrée, une équation quadratique, $y_{est} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_2^2 + b_8x_2^2 + b_9x_2^3 + \text{erreur}$, peut être utilisée pour décrire la relation fonctionnelle entre la variable estimée, y_{est} et les variables d'entrée x_1, x_2 et x_3 . La technique des moindres carrés est utilisée pour ajuster une équation modèle contenant les dits régresseurs ou variables d'entrée en minimisant l'erreur résiduelle mesurée par la somme des écarts carrés entre les réponses réelles et estimées.

Cela implique le calcul d'estimations pour les coefficients de régression, c'est-à-dire les coefficients des variables du modèle, y compris l'intercept ou le terme constant. Les coefficients calculés ou l'équation du modèle doivent toute fois faire l'objet d'un test de signification statistique. À cet égard, des tests sont effectués.

3.4.1.1 Résultats et discussions

3.4.1.1.1 Test de signification du modèle de régression

Ce test est effectué comme une procédure ANOVA en calculant le rapport F, qui est le rapport entre le carré moyen de la régression et l'erreur quadratique moyenne. Le rapport F, également appelé rapport de variance, est le rapport entre la variance due à l'effet d'un facteur (dans ce cas le modèle) et la variance due au terme d'erreur. Ce rapport est utilisé pour mesurer la significativité du modèle étudié par rapport à la variance de tous les termes inclus dans le terme d'erreur au niveau de signification souhaité. Un modèle significatif est souhaité. Dans notre cas, l'analyse de la variance montre que le modèle quadratique décrit bien la réponse, car, le facteur de corrélation R^2 égal à 94,46 %, qui signifie une faible valeur de résidus.

Tableau 3. 3 : Test de signification du modèle de regression,

Std. Dev.	0,4472	R ²	0,9446
Mean	1,70	Adjusted R²	0,8042
C.V. %	26,31	Predicted R²	-2,0747
		AdeqPrecision	10,4752

3.4.1.1.2 Test de signification des coefficients individuels du modèle

Ce test constitue la base de l'optimisation du modèle par l'ajout ou la suppression de coefficients par élimination en amont, addition en aval ou élimination/addition/échange par étapes. Il implique la détermination de la valeur P ou valeur de probabilité, généralement liée au risque de rejeter à tort une hypothèse donnée. Par exemple, la valeur "Prob.>F" d'un test F indique la proportion de fois où vous vous attendez à obtenir la valeur F indiquée si aucun effet de facteur n'est significatif. La valeur "Prob.>F" déterminée peut être comparée à la probabilité ou au niveau souhaité. En général, on choisit le polynôme d'ordre le plus bas pour décrire adéquatement le système. Les résultats obtenus montrent que la profondeur d'étirage est le facteur le plus influe le retour élastique, puis le jeu entre poinçon et matrice, la température, le temps de maintien, l'anisotropie, la vitesse de déformation, respectivement.

3.4.1.1.3 Test d'absence d'ajustement

Dans la mesure où des mesures répétées sont disponibles, un test indiquant la signification de l'erreur répétée par rapport à l'erreur dépendante du modèle peut être effectué. Ce test divise le résidu ou la somme des carrés des erreurs en deux parties, l'une due à l'erreur pure basée sur les mesures répétées et l'autre due au manque d'ajustement basé sur la performance du modèle. La statistique de test pour le manque d'adéquation est le rapport entre le carré moyen du manque d'adéquation et le carré moyen de l'erreur pure. Comme précédemment, cette statistique de test F peut être utilisée pour déterminer si l'erreur de manque d'ajustement est significative ou non au niveau de signification souhaitée.

Un manque d'ajustement non significatif est souhaité car un manque d'ajustement significatif indique qu'il pourrait y avoir des contributions dans la relation régresseur réponse qui ne sont pas prises en compte par le modèle. En outre, des vérifications doivent être effectuées afin de déterminer si le modèle décrit réellement les données expérimentales. Les vérifications effectuées ici comprennent la détermination des différents coefficients de détermination, R². Ces coefficients R² ont des valeurs comprises entre 0 et 1. En plus de ce qui précède, l'adéquation du modèle est également étudiée par

l'examen des résidus. Les résidus, qui sont la différence entre les réponses observées respectives et les réponses prédites, sont examinés à l'aide des tracés de probabilité normale des résidus et des tracés des résidus en fonction de la réponse prédite (Figure 3.21). Si le modèle est adéquat, les points des tracés de probabilité normale des résidus doivent former une ligne droite. D'autre part, les tracés des résidus par rapport à la réponse prédite devraient être sans structure, c'est-à-dire qu'ils ne devraient pas contenir de motifs évidents.

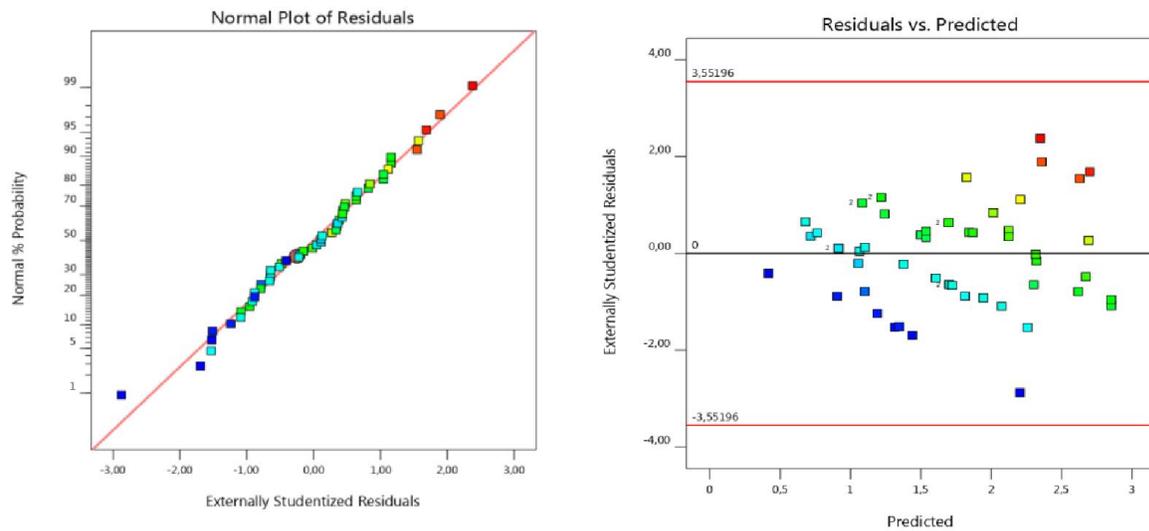


Figure 3. 21 : Tracés de probabilité normale des résidus et des tracés des résidus en fonction de la réponse prédite pour le cas d’étirage-plierage,

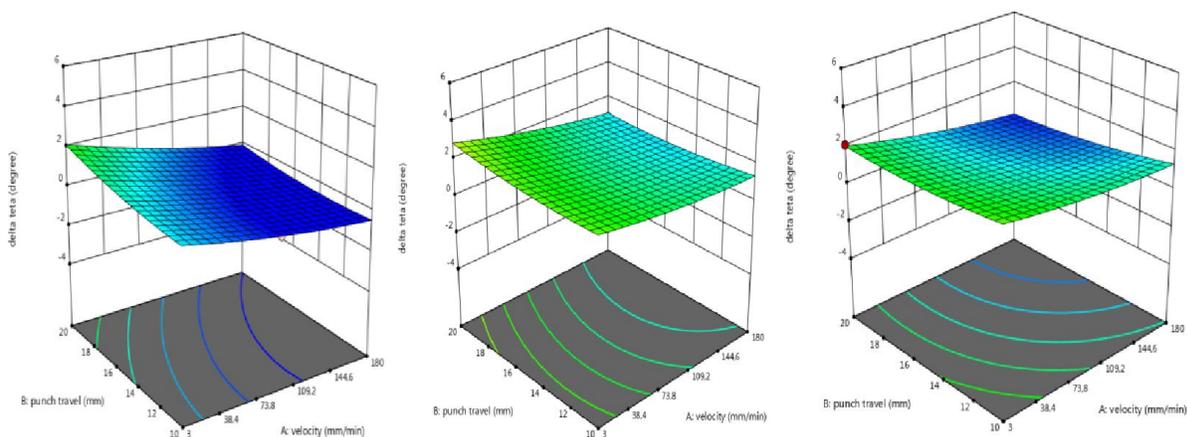


Figure 3. 22 : Réponse de surface de l’angle du retour élastique quand les paramètres de procédé sont aux valeurs minimales et la direction de laminage à 0°,45°, 90° respectivement,

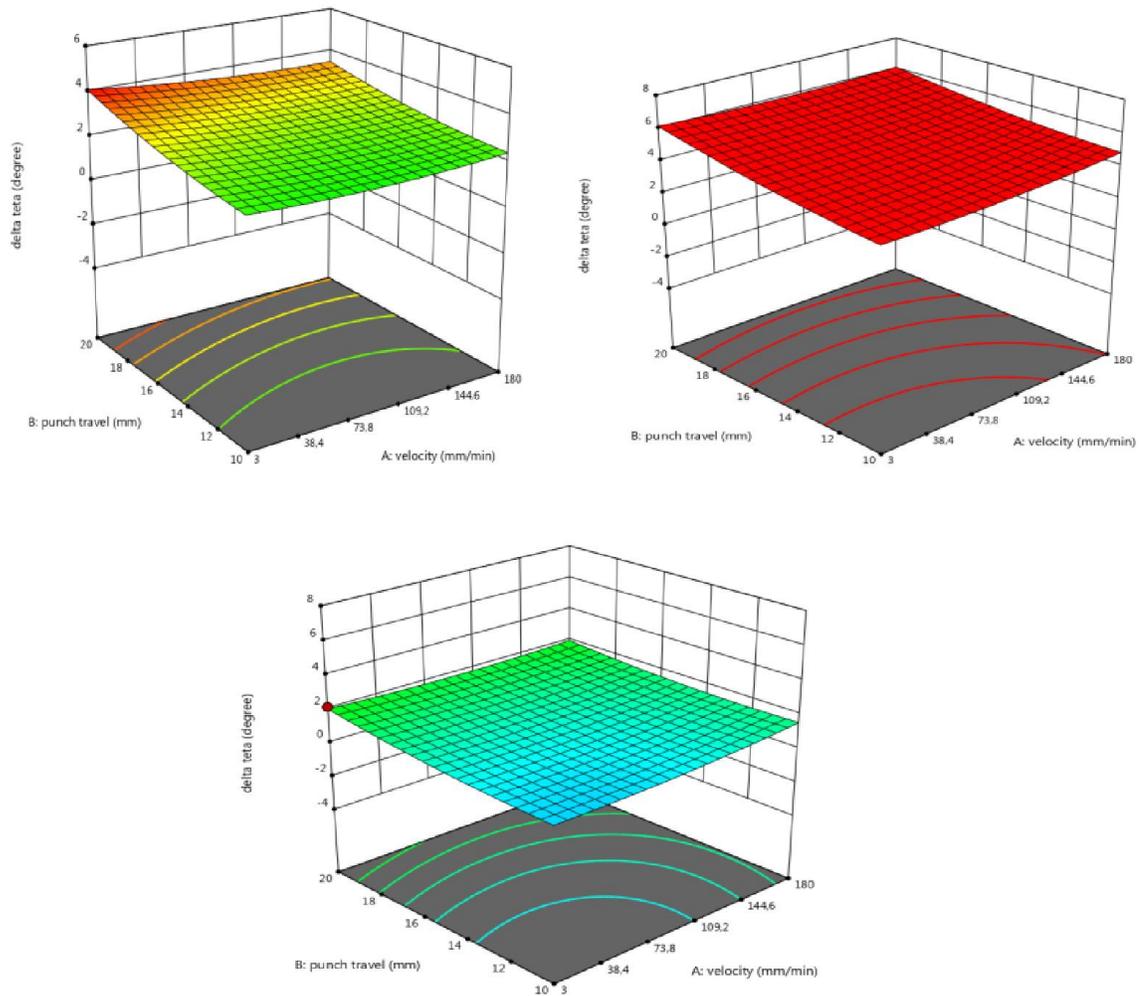


Figure 3. 23 : Réponse de surface de l’angle du retour élastique quand les paramètres de procédé sont aux valeurs maximales et la direction de laminage à 0°,45°,90° respectivement,

La comparaison des pentes de la surface de réponse en fonction du facteur B (profondeur d’étirage) et du facteur A (vitesse de déformation) (Figure 3.22) permet de confirmer que la profondeur d’étirage influe plus sur la réponse que les autres facteurs.

La résolution du problème d'optimisation est réalisée par le logiciel Design-expert qui calcule les valeurs optimales pour les six facteurs. Une valeur d'attractivité est attribuée à cette solution. Le facteur de désirabilité indique dans quelle mesure un ensemble d'éléments permet d'atteindre le résultat souhaité. Il varie de 0 à 1, 1 étant le cas idéal et 0 indiquant qu'une ou plusieurs réponses se situent en dehors de la fourchette autorisée. Les figures (3.24) et (3.25) montrent les résultats de l'optimisation lorsque la désirabilité est égale à 1.

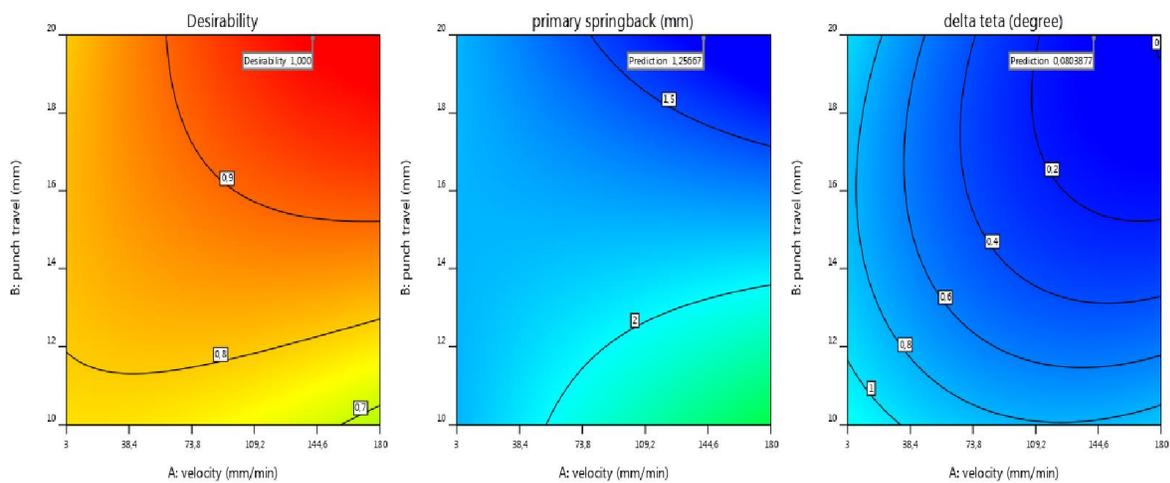


Figure 3. 24 : Résultats numériques du retour élastique optimisés graphiquement (étrirage-plier),

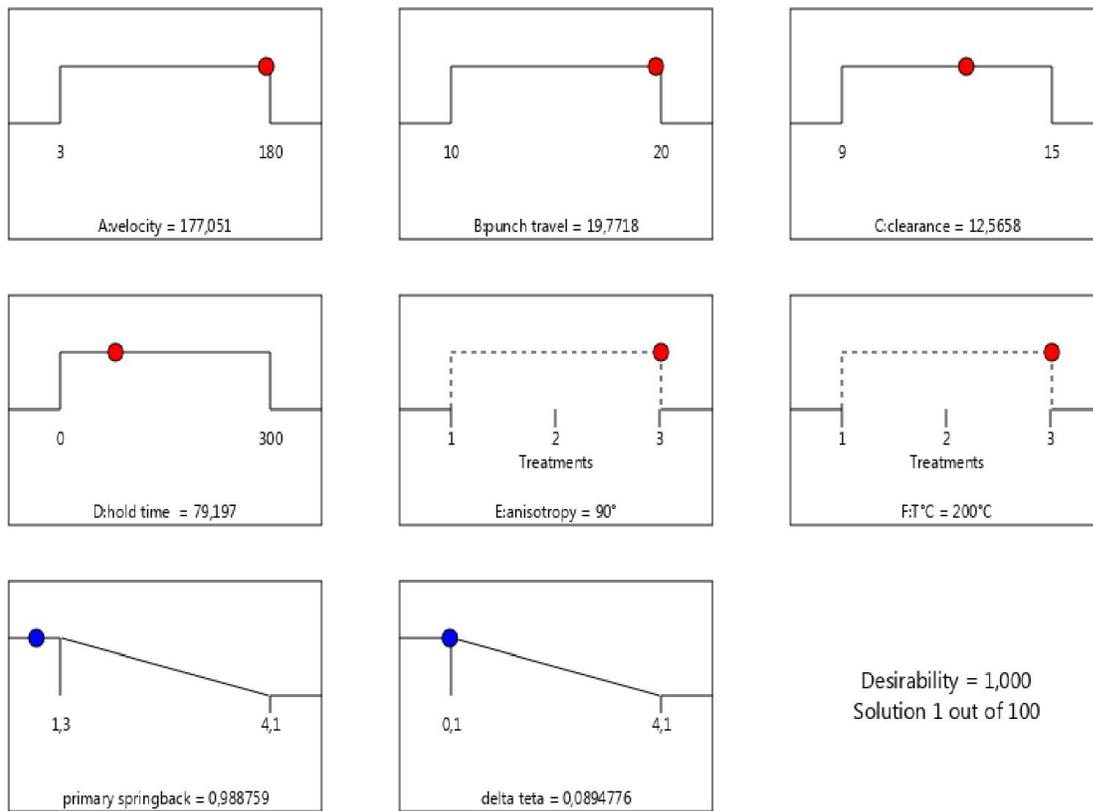


Figure 3. 25 : Résultats d’optimisation numérique du retour élastique pour le procédé d’étirage-plier,

Cette étude a permis de valider la faisabilité de l’optimisation de l’outillage des procédés grâce à un plan d’expériences mené avec la simulation numérique. Le plan de surface de réponse D-optimal a mis en évidence un effet quadratique des facteurs. L’écart entre la prédiction de l’angle du retour élastique optimisé par le modèle résultant du plan d’expériences et la simulation numérique est calculé par: $(\Delta\theta_{\text{exp}} - \Delta\theta_{\text{num}}) * 100 / \Delta\theta_{\text{exp}}$. Le calcul montre un écart faible, il est environ 1.15%.

3.4.2 Optimisation de procédé de pliage à l’air et du retour élastique

Pour l’optimisation de ce procédé, différents facteurs sont pris en compte, comme l’ouverture de la matrice, la vitesse de déformation, le temps de maintien, et l’anisotropie. La procédure d’analyse est la même pour que le premier procédé.

Tableau 3. 4 : Les facteurs choisis pour construire le plan d'expérience,

Factor	Name	Units	Type	Minimum	Maximum	Coded Low	Coded High	Mean	Std. Dev.
A	die opning	mm	Numeric	30,00	70,00	-1 ↔ 30,00	+1 ↔ 70,00	50,00	17,02
B	punch velocity	mm/min	Numeric	3,00	180,00	-1 ↔ 3,00	+1 ↔ 180,00	95,92	74,73
C	hold time	S	Numeric	0,0000	300,00	-1 ↔ 0,00	+1 ↔ 300,00	155,00	121,31
D	anisotropy	degree	Categoric	0°	90°			Levels:	3

3.4.2.1 Résultats et discussions

3.4.2.1.1 Test de signification du modèle de régression

L'analyse ANOVA présente que le modèle quadratique est significatif, et la valeur du R^2 est vaut 83.71 % comme le montre le tableau (3.5).

Tableau 3. 5 : Test de signification du modèle de regression,

Std. Dev.	3,17	R^2	0,8371
Mean	10,73	Adjusted R^2	0,6063
C.V. %	29,53	Predicted R^2	-0,3109
		Adeq Precision	5,8144

3.4.2.1.2 Test de signification des coefficients individuels du modèle et test d'absence d'ajustement

Ces tests montrent qu'un manque d'ajustement non significatif qui indique qu'il pourrait y avoir des contributions dans la relation régresseur réponse qui ne sont pas prises en compte par le modèle. Les tracés de probabilité normale des résidus et des tracés des résidus en fonction de la réponse prédite (Figure 3.26).

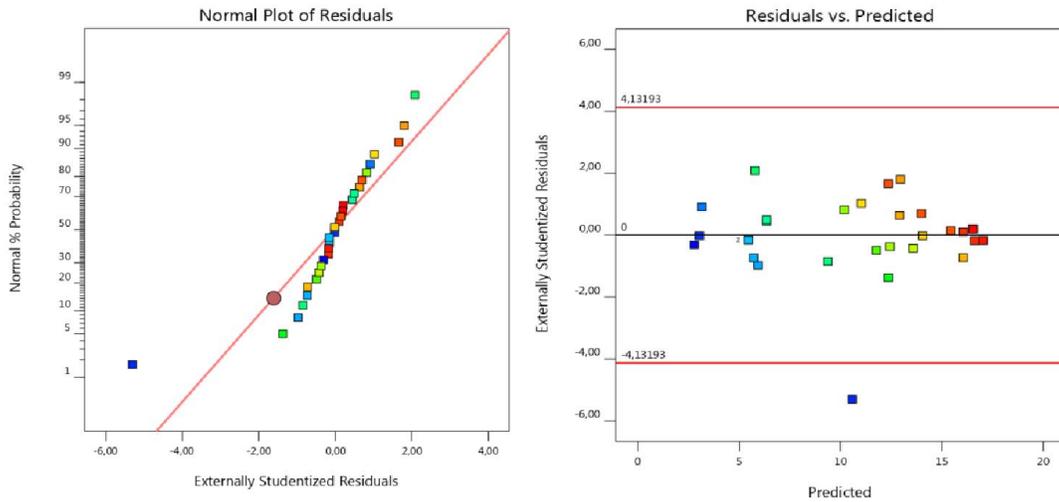


Figure 3. 26 : Tracés de probabilité normale des résidus et des tracés des résidus en fonction de la réponse prédite pour le cas de pliage à l’air,

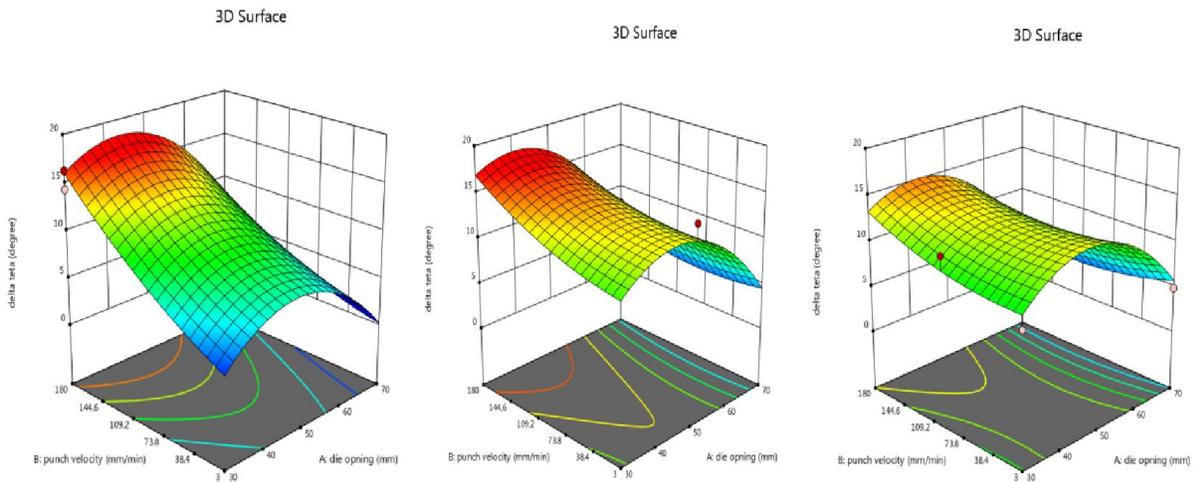


Figure 3. 27 : Surface de réponse en fonction de vitesse de deformation(B), et d’ouverture de la matrice (A) quand le temps de maintien vaut 0 s, dans les direction 0°, 45°, et 90° respectivement,

La figure 3.27 montre que la réponse (angle du retour élastique) minimale est obtenue lorsque l’ouverture de la matrice à sa valeur maximale, et la vitesse de déformation prend une valeur minimale dans la direction de laminage de 0° par rapport au sens de laminage.

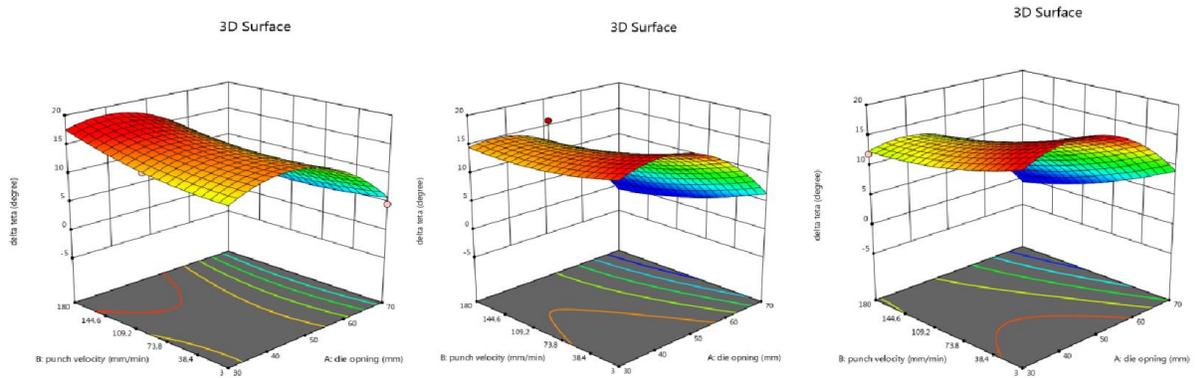


Figure 3. 28 : Surface de réponse en fonction de vitesse de deformation (B), et d’ouverture de la matrice (A) quand le temps de maintien vaut 300 s, dans les directions 0°, 45°, et 90° respectivement,

La résolution du problème d’optimisation est réalisée par Design Expert qui calcule les valeurs optimales pour les quatre facteurs. À cette solution, est associée une valeur de la désirabilité. Dans notre cas de pliage à l’air, la valeur de désirabilité présente un cas idéal qui égale à 1 (Figure 3.29 et Figure 3.30).

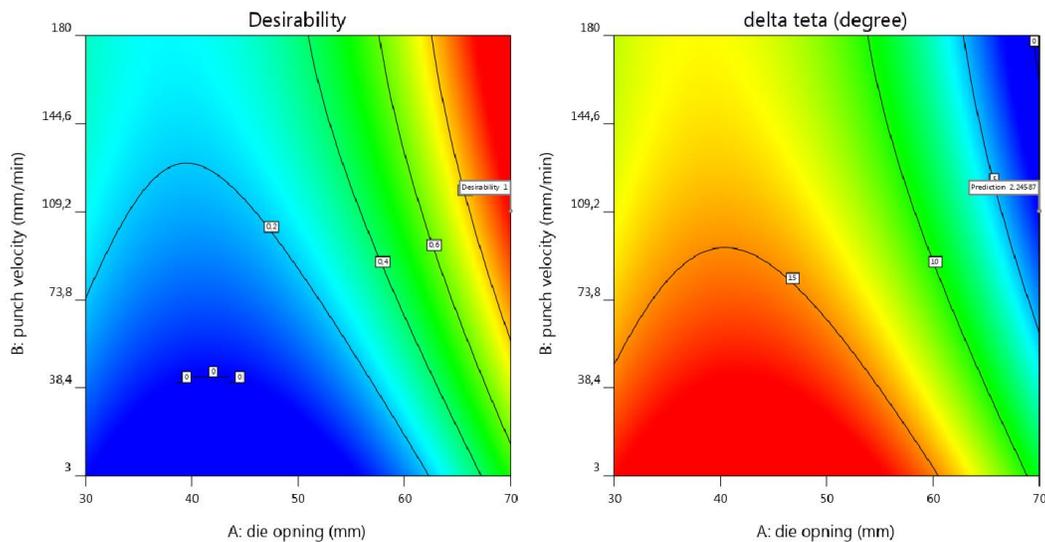


Figure 3. 29 : Résultats numériques du retour élastique optimisés graphiquement dans le cas de pliage à l’air,

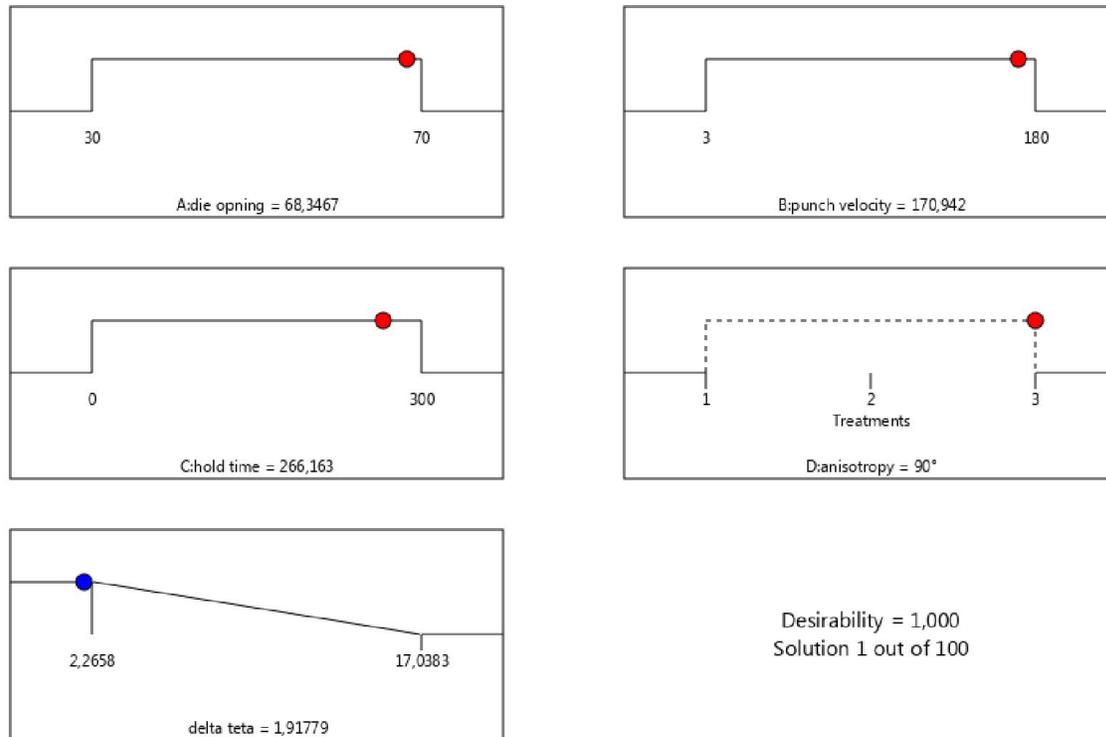


Figure 3.30 : Résultats d’optimisation numérique du retour élastique pour le procédé de pliage à l’air,

Les résultats obtenus montrent que l’angle du retour élastique dans le procédé de pliage à l’air est affecté par plusieurs paramètres. L’optimisation par le plan d’expérience présente que cette réponse (angle du retour élastique) prend sa valeur minimale quand l’ouverture de la matrice, la vitesse de déformation, et le temps de maintien sont grands, et cela, pour une direction de 90° par rapport au sens de laminage. Ces résultats sont validés par simulation numérique, et l’écart entre les deux ne dépasse pas le 0.98 %.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, afin de mettre en évidence la sensibilité d’une grandeur physique, le plus rencontrée en cours des procédés de mise en forme des tôles métallique qui est le retour élastique à plusieurs paramètres d’influence tels que la profondeur d’étirage, la vitesse de déformation, l’anisotropie, le temps de maintien du poinçon, le jeu entre poinçon et matrice, la température, etc. Deux opérations de mise en forme, l’étirage-pliage et le pliage à l’air en V sont étudiés numériquement menées sur des tôles en alliage d’aluminium. La simulation de ces deux procédés est effectuée par l’utilisation de la version explicite d’un logiciel éléments finis Abaqus, tandis que l’étape du retour élastique est prédite par

l'importation des résultats à la version implicite. Les résultats numériques obtenus montrent un accord satisfaisant avec ceux mesurés expérimentalement. Par la suite, dans le but de minimiser ou réduire ce phénomène néfaste, une optimisation de ces deux procédés a été réalisée pour déterminer les paramètres ou les facteurs optimaux qui donnent la valeur la plus faible du retour élastique. Pour cela, une méthode des plans d'expérience basée sur la réponse de la surface (RSM) a été employée pour optimiser cet impact. En outre, il a été montré par le biais de cette méthode que le retour élastique a été sensible à la combinaison de plusieurs paramètres à la fois. En conséquent, l'optimisation effectuée des résultats obtenus par cette stratégie des plans d'expérience (RSM), montre une grande précision et une fiabilité élevée.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif essentiel de ce mémoire de thèse est la mise en évidence du phénomène du retour élastique par l'étude et la caractérisation expérimentale et la simulation numérique de différentes opérations de mise en forme telles que l'étirage-plier (emboutissage en U) et le pliage à l'air avec la phase du retour élastique d'un alliage d'aluminium. Donc, notre contribution dans ce secteur de recherche est la prédiction du retour élastique par l'étude numérique et expérimentale et l'optimisation de différents paramètres influent le retour élastique.

Dans un premier lieu, l'approche expérimentale nous a permis de la détermination des propriétés mécaniques, physico-chimique, et métallographique de l'alliage d'aluminium étudié (5086-H111). Donc, le comportement de ce matériau est effectué par un essai de traction simple à température ambiante et à différentes températures de recuit sur des éprouvettes prélevées de la tôle dans différentes directions de laminage. Les résultats menés des essais de traction permettent de réaliser une base de données numérique pour élaborer un modèle éléments fini des deux procédés de formage et la simulation du retour élastique.

Ensuite, par l'adaptation d'un dispositif d'étirage-plier sur la machine de traction, nous pouvons étudier les différents paramètres du procédé qui ont une influence sur la grandeur du retour élastique. La quantification de ce dernier est réalisée en deux étapes, la première c'est la mesure du retour élastique primaire par l'enlèvement seulement de la charge du poinçon, à l'aide d'un comparateur de déplacement. Et la deuxième se fait par l'obtention du retour élastique final après enlèvement complète de la pièce déformée du banc d'outillage, par un projecteur de profil. Nous avons tout d'abord pu souligner l'extrême sensibilité de retour élastique aux paramètres du procédé comme l'anisotropie, la profondeur d'étirage, la vitesse de déformation, l'espace entre poinçon et matrice, le temps de maintien, le rayon du poinçon et de la matrice, et la température. La prédiction du retour élastique à l'aide de simulation numérique par éléments finis d'un code numérique Abaqus a été aussi considérée dans cette étape d'étude qui fait partie de ce travail de recherche. Les résultats obtenus montrent que ce code éléments fini est un outil robuste pour améliorer la prédiction de ce phénomène néfaste

Par la suite, la recherche des conditions optimales de procédé de mise en forme pour éliminer le problème de changement de la géométrie de la pièce mise en forme dû au retour élastique, fait l'objet de concentrer notre étude sur un choix d'une méthode d'optimisation. Notre choix s'est porté sur les plans d'expérience notamment sur la stratégie de surface de réponse (RSM) afin de mieux cibler les paramètres importants du procédé, et de mieux comprendre le mécanisme de retour élastique.

Les résultats de cette étude de thèse apportent diverses informations qui nous ont permis de tirer plusieurs tâches de conclusion :

- ✓ Nous avons pu prédire les évolutions de retour élastique en fonction des variations de plusieurs paramètres de procédé (l'anisotropie, la profondeur d'étirage, le jeu entre poinçon et matrice, le temps de maintien, la vitesse de déformation, le rayon du poinçon et de la matrice, la température) mettant aussi en évidence l'influence de ces paramètres de procédés sur le comportement en service des pièces. La comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux pour les deux opérations de mise en forme (étirage-plier et pliage à l'air), montre que le modèle numérique proposé fournit des résultats proches des observations expérimentales.
- ✓ Une étude d'optimisation a mené à la détermination des paramètres optimaux du procédé conduisant à la minimisation de la quantité du retour élastique. La modélisation mathématique de retour élastique pour les deux procédés de formage étudiés a été faite grâce à l'utilisation des surfaces de réponse construites à partir d'une série d'essais numériques qui constituent un plan d'expériences. Nous avons constaté que la profondeur d'étirage, l'anisotropie et le jeu entre poinçon et matrice sous l'effet de température influent grandement sur la valeur minimale de ce dernier. La représentation des évolutions globales de cette réponse par la méthode des surfaces de réponse montre une très bonne corrélation entre les résultats issus des deux approches: numérique et expérimentale.
- ✓ Dans les limites des facteurs examinés, les modèles quadratiques réduits créés à l'aide du RSM étaient relativement précis et pouvaient être utilisés pour la prédiction.

À la vue des résultats obtenus, de nombreuses perspectives scientifiques intéressantes doivent être envisagées pour les améliorer et les valider :

- ✓ il serait intéressant de mettre au point un autre procédé de formage, et un autre matériau.
- ✓ A ce stade, il serait intéressant de regarder de plus près d'autres paramètres, comme la prise en compte des paramètres géométriques, le comportement réel du matériau, etc. Et aussi, il est important de faire au maximum de sembler presque tous les paramètres qui influent le retour élastique, afin de mieux prédire ce phénomène.
- ✓ De plus, une utilisation de nouvelles techniques dans le domaine d'informatique pour faire une comparaison entre les différentes méthodes d'optimisation, et pour s'assurer que cette nouvelle stratégie d'étude permet d'étudier des sensibilités plus fines aux paramètres qui contribuent de minimiser au maximum le retour élastique.

Références Bibliographiques

- [1] Haddag, B. (2007). Contribution à la modélisation de la mise en forme des toles métalliques: application du retour élastique et la localisation. Thèse de doctorat, École nationale supérieure d'arts et métiers de Metz.
- [2] Azaouzi, M. (2007). Modélisation et optimisation numérique de l'emboutissage de pièce de précision en tolerie fine. Thèse de doctorat, Institut nationale polytechnique de Lorraine-INPL Nancy.
- [3] Coër, J. (2013). Mise en forme par emboutissage en température d'un alliage d'aluminium AA5754-O. Thèse de doctorat, École doctorale SICMA, Laboratoire d'ingénierie des matériaux de Bretagne, Université de Bretagne-sud.
- [4] Gil, I., Galdos, L., Mendiguren, J., Mugarra, E., Sáenz de Argandoña, S., (2016). Influence of the pressure dependent coefficient of friction on deep drawing springback predictions, American Institute of Physics,
- [5] Patil, S.M., Magbul Hussain, S., Ravi Kumar, K., (2014). Expérimental and numerical analysis of springback in deep drawing process. Global journal of engineering science and researches, 1(7), 15-24 ,
- [6] Zein, H., El Sherbiny, M., Abd-Rabou, M., El shazly, M., (2014). Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process. Materials and design, 53, 797–808.
- [7] Kadkhodayan M., Pourhasan, R., (2010). Finite element simulation of process and springback of friction aided deep drawing using tapered blank holder divided into eight segments. Majlesi journal of mechanical engineering, 3(4).
- [8] Pourboghraat, F., Chu, E. (1995). Springback in plane strain stretch/draw sheet forming. International journal of mechanical sciences, 37(3):327,
- [9] Li, K. P., Carden, W. P., Wagoner, R. H. (2002). Simulation of springback. Int. J. Mech. Sci., 44, 103-122.
- [10] Geng, L., Wagoner, R.H. (2002). Role of plastic anisotropy and its evolution on springback. International journal of mechanical sciences.
- [11] Cho, J. R., Moon, S. J., Moon, Y. H., Kang, S. S. (2003). Finite element investigation on spring-back characteristics in sheet metal U-bending process. Journal of materials processing technology, 141(1), 109-116.
- [12] Samuel, M. (2000). Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bendings of anisotropic sheet metals. J. Mater. Process. Tech., 105, 382–393.
- [13] Yoshida, F. & Uemori, T. (2003). A model of large-strain cyclic plasticity and its application to springback simulation. Int. J. Mech. Sci., 45, 1687–1702.
- [14] Maati A. (2016). Contribution à l'étude de la déformabilité des métaux lors de la mise en forme. Thèse de doctorat. Institut d'optique et de mécanique de précision, Université Ferhat Abbas Setif 1.
- [15] Garcia-romeu, M. L., Ciurana, J., & Ferrer, I. (2007). Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work. J. Mater. Process. Tech., 191, 174-177.
- [16] Verma, R. K., & Haldar, A. (2007). Effect of normal anisotropy on springback. J. Mater. Process. Tech., 190, 300-304.
- [17] Carden, W. D., Geng, L. M., Matlock, D. K. & Wagoner, R. H. (2002). Measurement of springback. Int. J. Mech. Sci., 44 - 79-101.
- [18] Ragai, I., Lazim, D., & Nemes, J. A. (2005). Anisotropy and springback in draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study, Journal of materials processing technology, 166, 116-127.

- [19] Sun, P., Grácio, J.J., &Ferreira, J.A. (2006).Control system of a mini hydraulic press for evaluating springbackinsheet metal forming. *Journal of materials processing technology*, 176, 55-61.
- [20] Mori, K., Akita,K., &Abe, Y. (2007).Springbackbehaviour in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo press.*international journal of machine tools & manufacture* 47, 321-325.
- [21] Panthia, S.K., Ramakrishnanb, N.,Meraj, A.,Shambhavi, Singh,S., &Goela, M.D. (2010). Finite element analysis of sheet metal bending process to predict the springback. *Materials and design*, 31, 657-662.
- [22] Wagoner, R.H., Lim, H., & Lee, M.G. (2013).Advanced issues in springback, *International Journal of Plasticity*. 45, 3-20.
- [23] Fei, D., & Hodgson, P. (2006). Experimental and numerical studies of springback in air v-bending process for cold rolled TRIP steels. *Nuclear engineering and design*, 236, 1847-1851.
- [24] Hai, Y. Y. (2009). Variation of elastic modulus during plastic deformation and its influence on springback. *Materials and design*, 30, 846-850.
- [25] Tekaslan, Ö.,Seker, U., & Özdemir, A. (2006). Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies. *Materials and design*, 27, 251-258.
- [26] Hilditch,T.B., Speer, J.G., & Matlock, D.K. (2007).Influence of low-strain deformation characteristics of high strength sheet steel on curl and springback in bendunder-tension tests. *Journal of materials processing technology*, 182, 84-94.
- [27] Firat, M. (2007). U-channel forming analysis with an emphasis on springback deformation. *Materials and design*, 28, 147-154.
- [28] Dongjuan, Z., Zhenshan, C., Xueyu, R., &Yuqiang, L. (2006). Sheet springback prediction based on non-linear combined hardening rule and Barlat89's yielding function. *Computational materials science*, 38, 256-262.
- [29] Oliveira, M. C., Alves, J.L., Chaparro, B.M., & Menezes, L.F. (2006). Study on the influence of work-hardening modeling in springback prediction. *International journal of plasticity*, 32, 826-846.
- [30] Jiang, C., Han, X., Liu, G.R., &Li,G.Y. (2007). The optimization of the variable binder force in U-shaped forming with uncertain friction coefficient. *Journal of materials processing technology*, 182, 262-267.
- [31] Yanagimoto,J., & Oyamada, K. (2007). Mechanism of springback-free bending of high-strength steel sheets under warm forming conditions. *Annals of the CIRP*, 56(1).
- [32] Vasudevan, D., Srinivasan, R., & Padmanabhan, P. (2011). Effect of process parameters on springback behaviour during air bending of electrogalvanised steel sheet. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 12(3), 183-189.
- [33] Vorkov, V., Aerens, R.,Vandepitte, D., Joost, R., & Duflou. (2014). Springback prediction of high-strength steels in large radius air bending using finite element modeling approach. *Procedia engineering*.
- [34] Buang, M. S., Abdullah, S. A., &Saedon, J. (2015). Effect of die and punch radius on springback of stainless steel sheet metal in the air V-die bending process. *Journal of mechanical engineering and sciences*, 8, 1322-1331.
- [35] Krinninger, M., Opritescu, D., Golle, R., & Volk, W. (2016). Experimental investigation of the influence of punch velocity on the springbackbehaviorand the flat length in free bending. *Procediacirp*, 41, 1066-1071.
- [36] Karağaç, İ. (2017). The evaluation of process parameters on springback in V-bending using the flexforming process. *Materialsresearch*, 20(5), 1291-1299.

- [37] Ozturk, F., Toros, S., Kilic, S., & Bas, M. H. (2009). Effects of cold and warm temperatures on springback of aluminium-magnesium alloy 5083-H111. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*, 223(4), 427-431.
- [38] Sarıkaya, O. T. (2008). Analysis of heat treatment effect on springback in v-bending. *Thèse de master*.
- [39] Verma, R. (2016). Effect of elevated temperature on mechanical behaviour and springback of aluminum alloy brazing sheets. *Thèse de master, University of Waterloo*.
- [40] Wan-Nawang, W. A., Qin, Y., & Liu, X. (2015). An experimental study on the springback in bending of w-shaped micro sheet-metal parts. In *MATEC web of conferences*, 21.
- [41] Gite, R.E., Phad, K.S., & Bajaj, D.S. (2016). Springback effect analysis of bracket using finite element analysis. *International advanced research journal in science, Engineering and technology*, 3(1), 246-255.
- [42] Slota, J., & Jurčišin, M. (2012). Experimental and numerical prediction of springback in V-bending of anisotropic sheet metals for automotive industry. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowski ej. Mechanika*, (84 [284], nr 3), 55-68.
- [43] Shah, J. R., Sharma, S. K., & Patel, B. C. (2011). Investigating springback effect in U-Die bending process by varying different parameters. In *Nirma university. International conference on engineering*. Institute of technology, Nirma university, Ahmedabad, 1-6.
- [44] Younis, K. M., Hamad, A., & Mansor, K. K. (2013). Study the optimization parameters for springback phenomena in U-die bending. *Engineering and technology journal*, 31(9 Part (A) Engineering).
- [45] Abed, A. H. (2012). The effect of hold time on the spring back phenomenon in a V-Dies bending process. *Engineering and technology journal*, 30(19).
- [46] Abed, A. H. (2013). Determination of the optimal Spring-back parameters using Taguchi method. *Al-Qadisiyah journal for engineering sciences*, 6(1), 53-61.
- [47] Ahirwar, R. K., & Jain, A. K. (2017). Experimental study of wear in sheet metal during various forces. *International journal of research-GRANTHAALAYAH*, 5(2), 162-167.
- [48] Lu, H., & Huang, W. (2012). The Influence of compressive pressure in the thickness direction on springback for aluminum alloy. In *advanced materials research*, 472, 736-739.
- [49] Choudhury, I. A., & Ghomi, V. (2014). Springback reduction of aluminum sheet in V-bending dies. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*, 228(8), 917-926.
- [50] Kartik, T., & Rajesh R, Effect of punch radius and sheet thickness on spring-back in V-die bending, *Advances in natural and applied sciences*. 11(8), 178-183.
- [51] Wenjuan, L., Qiang, L., Feng, R., Zhiyong, L., & Hongyang, Q. (2007). Springback prediction for sheet metal forming based on GA-ANN technology. *Journal of materials processing technology*, 187-188, 227-231.
- [52] Kazan, R., Fırat, M., & Tiryaki, A. E. (2009). Prediction of springback in wipe-bending process of sheet metal using neural network. *Materials and design*, 30, 418-423.
- [53] De Vin, L. J. (2000). Curvature prediction in air bending of metal sheet. *Journal of materials processing technology*, 100, 257-261.
- [54] Lang, L., Danckert, J., & Nielsen, K.B. (2004). Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure - Part I: Experimental observations of the forming process of aluminium alloy. *Journal of materials processing technology*, 148, 119-131.

- [55] Sene, N. A. (2010). Etudes expérimentales et numériques de la micro-formabilité des matériaux métalliques de faible épaisseur. Thèse de doctorat, université de Savoie.
- [56] Keeler, S.P.(1965). Determination of the forming limits in automotive stamping. *Sheet metal industries* 42, 683-703.
- [57] Seo, K. Y., Kim, J. H., Lee, H. S., Kim, J. H., & Kim, B. M. (2018). Effect of constitutive equations on springback prediction accuracy in the TRIP1180 cold stamping. *Metals*, 8, 18.
- [58] Burchitz, I.A. (2008). Improvement of springback prediction in sheet metal forming. Netherlands institute for metals research.
- [59] Lee, M.G., Kim, D., Kim, C., Wenner, M.L., & Chung, K. (2005). Springback evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non quadratic anisotropic yield functions, part III: applications. *International journal of plasticity*, 21, 915-953.
- [60] Oliveira, D.A., Worswik, M.J., Grantab, R., Williams, B.W., & Mayer, R.(2006). Effect of forming process variables on the crashworthiness of aluminum alloy tubes. *International journal of impact engineering*, 32, 826-846.
- [61] Neto, D. M., Oliveira, M. C., Santos, A. D., Alves, J. L. Menezes, L.F. (2017). Influence of boundary conditions on the prediction of springback and wrinkling in sheet metal forming. *International journal of mechanical sciences*, 122, 244-254.
- [62] Noder, J., Dicecco, S., Butcher, C., & Worswick, M. (2017). Finite element simulation of non-isothermal warm forming of high-strength aluminum alloy sheet. *Proceedings of the 20th international ESAFORM conference on material forming*.
- [63] Yanagimoto, J., & Oyamada, K. (2006). Springback-free isothermal forming of high-strength steel sheets and aluminum alloy sheets under warm and hot forming conditions. *ISIJ Int.*, 46 (9), 1324-1328.
- [64] Hino, R., Goto, Y., & Yoshida, F., (2003). Springback of sheet metal laminates in draw-bending, *J. Mater. Process. Tech.*, 139, 341-347.
- [65] Wang, J.F., Wagoner, R.H., Matlock, D.K., & Barlat, F. (2005). Anticlastic curvature in draw-bend springback. *International journal of solids and structures*, 42(5-6), 1287-1307.
- [66] Nguyen, V. D., Adragna, P. A., & Lafon, P. (2014). Predicting the effects of material and process parameters on springback by fem numerical simulation in sheet metal forming. *10th International conference on modeling, optimization and simulation - MOSIM14, - Nancy – France*.
- [67] Demeri, M.Y., Lou, M., & Saran, M.J. (2000). A benchmark test for springback simulation in sheet metal forming. *Society of Automotive Engineers, Inc.*, 01-2657.
- [68] Greze, R., Manach, P. Y., Laurent, H., Thuillier, S., & Menezes, L. F. (2010). Influence of the temperature on residual stresses and springback effect in an aluminium alloy. *Int. J. Mech. Sci.*, 52, 1094-1100.
- [69] Laurent, H., Coër, J., Manach, P. Y., Oliveira, M. C., & Menezes, L. F. (2015). Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al-Mg alloy. *Int. J. Mech. Sci.*, 93, 59-72,
- [70] Hockett, B. J. E. (1975). Large strain – Eformation of polycrystalline metals at low. *J. Mech. Phys. Solids*, 23, 87-98.
- [71] Laurent, H., Grèze, R., Manach, P. Y., & Thuillier, S. (2009). Influence of constitutive model in springback prediction using the split-ring test. *International journal of mechanical sciences*, 233-245.

- [72] Batoz, J.L., Naceur, H., &Guo, Y.Q. (2005). Approche inverse pour la modélisation et l'optimisation du procédé d'emboutissage et fonctionnalités du logiciel Fast Stamp. 17 Congrès français de mécanique, Troyes, Septembre.
- [73] Fang, Z., Lu, H., Wei, D., Jiang, Z., Zhao, X.,& Wu, D. (2014). Numerical study on springback with size effect in micro V -bending. *Procedia engineering*, 81 (C), 1011-1016.
- [74] Adnan, M. F.,Abdullah, A.B. & Zahurin, S. (2017). Effect of annealing, thickness ratio and bend angle on springback of AA6061-T6 with nonuniform thickness section. *MATEC web of conferences* , 90, 0100
- [75] Venkatachalam, G. (2012). Influence Of hole size, Hole shape and hole pattern on spring-back effect n perforated sheet metals using FEM. *International journal of engineering science and technology*, 4 (06).
- [76] Erdin, M. E., &Atmaca, A. (2016). Effects of holding force on the springback behavior of annealed aluminum plates. *Procedia engineering*, 149, 56-61.
- [77] Lee, M.G., Kim, D., Kim, C., Wenner, M.L., Wagoner, R.H., & Chung, K. (2005). Spring-back evaluation of automotive sheets based on combined isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions. *International journal of plasticity*, 391-393.
- [78] Zhou, X. (1999). Numerical prediction of springback in U-Channel forming of aluminum tailor welded blanks. Thèse master of engineering, Ottawa-Carleton institute for mechanical and aerospace engineering, carleton university, Canada.
- [79] Kadkhodayan, M., Zafarpaandeh, I. (2009). An investigation into the influence of blankholder force on springback in U-Bending. *Archives of metallurgy and materials*, 54(4).
- [80] Marciniak, Z. & Dunan,J. (1991). *Mechanics of sheet metal forming*. Edward Arnold.
- [81] Livatyali, H., & Altan, T. (2001). Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods: Part I. Experimental investigations. *Journal of materials processing technology*, 117(1-2), 262–268.
- [82] Özdemir, M. (2017). Mathematical modeling of the effect of different parameters on spring back in sheet metal formability process. *American journal of engineering research (AJER)*, 6(10), 198-205.
- [83] Trzepiecinski, T.,&Lemu, H. G.(2017). Prediction of springback in V-die air bending process by using finite element method. *MATEC web of conferences* 121, 03023.
- [84] Gupta, T. R., Payal, H. S.(2017). Effect of die and punch geometry on spring back in air bending of electrogalvanized CR4 Steel. *International journal of applied engineering research*, 12(11), 2792-2797.
- [85] Gupta, T. R. (2017). Effect of tooling parameters on bending force in air bending of CR4 steel. *International journal of theoretical and applied mechanics*, 12(3), 375-388.
- [86] kumar, S.,Sardana, D., Rajpara, M. P., & Patel, S. S. (2015). Study of springback analysis in air bending process after different heat treatment of aluminium 6063 alloy. *Ijarse*, 4 (01).
- [87] Maske, N. A., & Sawale, J. K. (2013). Taguchi approach for investigation of springback effect in aluminum sheet, *Int. J. Mech. Eng. & Rob.*
- [88] Abu Khadra, F., & El-Morsy, A. W. (2016). Prediction of springback in the Air bending process using a kriging metamodel, *engineering. Technology & applied science research*, 6, 5, 1200-1206.
- [89] Chen, F. K., &Ko, S. F. (2006). Deformation analysis of springback in L-bending of sheet metal. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 18(1-2).

- [90] Salvi, H., Mestry, S., & Kavatkar, T. V. (2016). Experimental investigation for minimization of spring back in L bending using Taguchi design of experiments. *International journal for innovative research in science & technology*, 2(09), 2349-6010,
- [91] Wagoner, R. H. (2005). Sheet springback, in *continuum scale simulation of engineering materials*, 42, 758-774.
- [92] Baba, A., & Tozawa, Y. (1964). Effect of tensile force in stretch-forming process on the springback. *Bull. JSME*, 7, 835-843.
- [93] Schilp, H., Suh, J., & Hoffmann, H. (2012). Reduction of springback using simultaneous stretch-bending processes. *Int J Mater Form*, 5, 175-180.
- [94] Karafillis, A. P., & Boyce, M. C. (1992). Tooling design in sheet metal forming using springback calculations. *Int. J. Mech. Sci.*, 34(2), 113-131.
- [95] Gan, W., & Wagoner, R. H. (2004). Die design method for sheet springback. *Int. J. Mech. Sci.*, 46, 1097-1113.
- [96] Weiher, J., Rietman, B., Kose, K., Ohnimus, S. & Petzoldt, M. (2004). Controlling springback with compensation strategies. In *AIP conference proceedings* 712, 712(1).
- [97] Lingbeek, R., Hu, J., Ohnimus, S., Petzoldt, M., & Weiher, J. (2005). The development of a finite elements based springback compensation tool for sheet metal products. *J. Mater. Process. Tech.*, 169, 115-125.
- [98] Zhang, Z., Ma, R., Wang, C., & Zhao, J. (2019). Research on springback control in stretch bending based on iterative compensation method. *Mathematical problems in engineering*,
- [99] Kadkhodayan, M., & Zafarparandeh, I. (2008). On the relation of equivalent plastic strain and springback in sheet draw bending. *International journal of material forming*, 1(1), 141-144.
- [100] Ling, Y. E., Lee, H. P., & Cheok, B. T. (2005). Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal. *Journal of materials processing technology*, 168(2), 296-302.
- [101] Gan, W. & Wagoner, R. H. (2004). Die design method for sheet springback. *International journal of mechanical sciences*, 46(7), 1097-1113.
- [102] Waluyo, A.S., Agus, D. A., Badrul, O., & Kamaruzaman, J. (2014). An alternate method to springback compensation for sheet metal forming. *The scientific world journal*, 301271.
- [103] Cinar, Z., Asmael, M., Zeeshan, Q., & Safaei, B. (2021). Effect of springback on A6061 sheet metal bending: A review, *Jurnal Kejuruteraan*, 33(1), 13-26.
- [104] Moon, Y. H., Kang, S. S., Cho, J. R., & Kim, T. G. (2003). Effect of tool temperature on the reduction of the springback of aluminum sheets. *J. Mater. Process. Tech.*, 132, 365-368.
- [105] Kim, H., & Koc, M. (2008). Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions. *J. Mater. Process. Tech.*, 204, 370-383.
- [106] Ozturk, F., Toros, S., Kilic, S., & Bas, M. H. (2009). Effects of cold and warm temperatures on springback of aluminium-magnesium alloy 5083-H111. In *Proc. IMechE*, 223, 427-431.
- [107] Greze, R., Manach, P. Y., Laurent, H., Thuillier, S., & Menezes, L. F. (2010). Influence of the temperature on residual stresses and springback effect in an aluminium alloy. *Int. J. Mech. Sci.*, 52, 1094-1100
- [108] Takata, K. (2013). Warm forming of aluminum alloys.
- [109] Wang, A. et al. (2016). Springback analysis of AA5754 after hot stamping: experiments and FE modelling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 89, 5-8, 1339-1352.

- [110] Goupy, J. (1999). Plan d'expériences pour surface de réponse. Dunod, Paris, ISBN 2-10-005765-0.
- [111] Bradley, N. (2008). The response surface methodology. Thèse de Master, Department of mathematical science Indiana. University of South Bend.
- [112] Montgomery, Douglas, C. (2005). Design and analysis of experiments: Response surface method and designs. New Jersey: John Wiley and sons, Inc.
- [113] Pouzols, V. (2011). Optimisation d'opérations industrielles de pliage par la méthode des éléments finis, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France.
- [114] Naceur, H., Guo, Y.Q., Ben-Elechi, S.(2006). Response surface methodology for design of sheet forming parameters to control springback effects. Computers and structures, 84, 1651-1663.
- [115] Bahloul, R., Ben-Elechi, S. (2005). Optimisation of springback predicted by experimental and numerical approach by using response surface methodology. Journal of materials processing technology.
- [116] Bahloul, R., Ben Ayed, L., & Potiron, A. (2010). Comparison between three optimization methods for the minimization of maximum bending load and springback in wiping die bending obtained by an experimental approach. Int J Adv Manuf Technol, 48, 1185-1203
- [117] Lepadatu, D., Kobi, A., Baguenard, X., & Jaulin, L.(2009). Springback of stamping process optimization using response surface methodology and interval computation. QTQM, 6(4), 409-421
- [118] Abu Qudeiri, J., Abu khadra, F., Umer, U., Mohamed, H. (2014). Response surface metamodel to predict springback in sheet metal air bending process. ICACTE.
- [119] Vahdati, M., & Mahdavinjad, R. A. (2015). Statistical analysis and optimization of factors affecting the spring-back phenomenon in UVaSPIF process using response surface methodology. Int J advanced design and manufacturing technology, 8(1).
- [120] Ferreira, E., Maia, A., Oliveira, M.C., Andrade-Campos, A. & Menezes, L.F. (2015). Optimization strategies and statistical analysis for springback compensation in sheet metal forming. XIII International conference on computational plasticity.
- [121] Buang, M. S., Abdullah, S. A., Saedon, J. (2015). Optimization of springback prediction in U-Channel process using response surface methodology. International journal of mechanical and mechatronics engineering, 9(7).
- [122] Rafizadeh, H., Azimifar, F., Foode, P., Foudeh, M. R., & Keymanesh, M. (2017). Wrinkling prediction in deep drawing by using response surface methodology and artificial neural network. Transactions of famena XLI-2.
- [123] Alghtani, A., Brooks, P.C., Barton, D.C., & Toropov, V.V. (2018). Optimisation of important factors influencing spring-back after sheet metal forming, International journal of applied engineering research, 13(22), 16027-16035.
- [124] Ramadass, R., Sambasivam, S., & Thangavelu, K. (2019). Selection of optimal parameters in V-bending of Ti-Grade 2 sheet to minimize springback. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering 41, 21.
- [125] Reddy, P. V., Krishnudu, D. M., Pranavi, U. & Ramulu, P. J. (2019). Optimization of the forming parameters in U-Bending for punch force and springback using Taguchi method. Advances in computational methods in manufacturing.
- [126] Özdemir, M. (2020). Optimization of springback in air V bending processing using Taguchi and RSM method, Mechanika, 26(1), 73-81.
- [127] GULER, K. (1949). L'aluminium et ses alliages Fabrication-Emploi, Suisse.

- [128] Salerno, R. B. M. (2008). Aluminum structure design and fabrication guide.
- [129] Campbell, F.C. (2008). Elements of metallurgy and engineering alloys, chapitre 26, 487-508.
- [130] The Aluminum Association, site web: www.aluminum.org.
- [131] Hosford, W. F., Caddell, R. M. (2011). Metal forming. Mechanics and metallurgy. 4^{ème} édition, Cambridge university press.
- [132] International Standard Iso 6892-1 ISO, Matériaux métalliques -Essai de traction-Partie 1: Méthode d'essai à température ambiante, 1^{ère} édition, 2009.
- [133] Soualem, A. (2013). A detailed experimental study of the springback anisotropy of three metals using the stretching-bending process. International journal of mechanical and mechatronics engineering, 7(1), 144-147.
- [134] Kellermann et Klein, <http://www.technocalcul.com/FR/kellermanklein.html>
- [135] Liu, Y., Wang, L., Zhu, B., Wang, Y., & Zhang, Y. (2018). Identification of two aluminum alloys and springback behaviors in cold bending. Procedia Manufacturing, 15, 701-708.