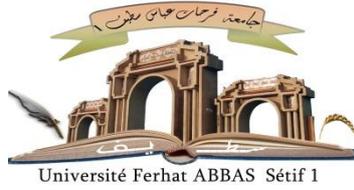


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1

Institut d'Optique et Mécanique de Précision

THÈSE

Présentée au Département d'Optique et Mécanique de Précision

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT 3ème Cycle LMD

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Optique et mécanique de précision

Option: Mécanique Appliquée

Par

ABDEDAIM Imene

THÈME

**Etude du processus étirage-pliage des tôles à revêtement
métallique et plastique**

Soutenue publiquement le 24/11/2022 devant le Jury:

SMATA Lakhdar	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
OUAKDI Elhadj	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Rapporteur
LOUAHDI Rachid	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Co-rapporteur
KESKES Boualem	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur
DEBIH Ali	MC-A	Univ. Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur
MAATI Ahmed	MC-A	Univ. Amar Telidji Laghouat	Invité

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à moi.

Remerciements

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse : Prof. Elhadj Ouakdi, qui par sa patience, son expérience et son enthousiasme, m'a donné beaucoup de conseils et de propositions tout au long de ce projet. Je le remercie de m'avoir apporté toute son expérience et ses compétences sans lesquelles ce travail n'aurait pas pu aboutir.

Je voudrais adresser mes sincères remerciements à mon co-directeur de thèse professeur Louahdi Rachid

Mes remerciements vont aussi à monsieur Maati Ahmed, maître de Conférences à l'Université de Laghouat, pour son aide précieuse.

A monsieur le professeur SMATA Lakhdar, C'est un grand honneur que vous me faites en acceptant de présider le jury de cette thèse. J'espère que vous trouverez ici le témoignage de ma reconnaissance,

de mon respect et de mon admiration pour vos qualités scientifiques, humaines et professionnelles.

*A messieurs; le Professeur **KESKES Boualem** et **DEBIH Ali** maître de Conférences à l'Université Mohamed Boudiaf M'sila, Vous m'avez honoré par votre consentement à juger ce travail. Je vous en remercie. Veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect et ma sincère reconnaissance.*

*J'adresse toute ma gratitude et sincères remerciements à mon mari **Khalil** qui m'a beaucoup soutenu tout au long de ce travail.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance aux, Mrs **Abdeelhadi Benaddi** et **Bouafia Hamza** pour leurs aide.*

Je tiens à remercier tous les membres des laboratoires d'Optique et de mécanique de précision et tous qui ont participés de près ou de loin pour la réussite de ce travail.

Résumé

Les pièces mécaniques embouties ou pliées présentent toujours des anomalies sur l'état de surface (peau d'orange) et sur le manque d'une précision dimensionnelle, causé par le retour élastique. Le retour élastique est si compliqué qu'il est difficile à simuler avec précision car il est lié à de nombreux facteurs tels que la géométrie de l'outillage, les propriétés des matériaux, le frottement et les conditions de chargement. Dans ce contexte, le retour élastique de l'essai d'étirage-plier en V et en U est étudié expérimentalement et numériquement. Le métal étudié est un acier non allié, utilisé spécialement pour la fabrication des produits d'électroménager au niveau de l'entreprise SONARIC. Il a été revêtu par différents revêtements métalliques et plastiques pour mettre en évidence l'effet de ces derniers sur la qualité de formage et sur le retour élastique. Les revêtements métalliques sont effectués par l'électrodéposition d'une couche fine de plusieurs métaux (zinc, étain, nickel et chrome). Concernant le revêtement plastique, un film plastique autocollant est placé sur les surfaces des outils (matrice et serre flanc) en contact avec l'échantillon à plier, et sur les deux faces de l'échantillon à plier lui-même. Des tôles d'acier C6 sont pré-laquées et d'autres en acier C5 ont subi des traitements de cémentation effectués à 900° pendant 3h (sans trempe). Elles sont toutes testées en étirage-plier. Ceci est nécessaire pour évaluer l'effet des revêtements plastiques et la cémentation sur le retour élastique.

L'étude des tôles à différents revêtements s'est focalisée principalement sur l'influence de différents paramètres tels que l'épaisseur du revêtement, sa rugosité, la profondeur d'étirage, la force de serrage du flan (Blank holding force-BHF), la limite d'élasticité et le module de Young de l'acier. Le pliage en V est aussi simulé en utilisant un code d'éléments finis élasto-plastiques 2D Abaqus/standard. Dans ce travail, nous montrons également que l'angle de retour élastique est plus petit pour les tôles non revêtues, un BHF plus élevé, une rugosité de surface plus élevée, une épaisseur de revêtement plus faible, une hauteur d'étirement plus faible une limite d'élasticité plus faible et un module de Young plus élevé. Une première étude comparative a été effectuée, en montrant l'influence de chacun des deux types de revêtements (métalliques, plastiques) sur le retour élastique. D'autre part, les résultats numériques ont été comparés par ceux obtenus par expérimentation.

Mots clé :

Revêtement, rugosité, étirage-plier, Contrainte, Frottement, Retour élastique.

الملخص

دائمًا ما تظهر القطع الميكانيكية المثنية تشوهات في حالة السطح (قشر البرتقال) و نقصا في دقة الأبعاد، بسبب الرجوع المرن. حيث أن هذا الأخير معقد للغاية بحيث يصعب محاكاته بدقة لأنه مرتبط بالعديد من العوامل مثل أبعاد الأدوات وخصائص المواد والاحتكاك. في هذا السياق، تمت دراسة الرجوع المرن لاختبار التمدد والانحناء على شكل V و U بشكل تجريبي ورقمي. المعدن الذي تمت دراسته عبارة عن فولاذ، يستخدم بشكل خاص في تصنيع الأجهزة الكهرومنزلية على مستوى شركة SONARIC ، وقد تم طلاؤه بطبقات معدنية وبلاستيكية مختلفة لإبراز تأثير أنواع الطلاء على الجودة. تمت عملية الطلاءات المعدنية عن طريق الطلاء الكهربائي لطبقة رقيقة من عدة معادن (الزنك والقصدير والنيكل والكروم). أما فيما يتعلق بالطلاء البلاستيكي، يتم وضع فيلم بلاستيكي ذاتي اللصق على أسطح الأدوات (القالب والمشبك الجانبي) ملامسًا للعينة المراد تنيبها، وعلى جانبي العينة المراد تنيبها نفسها. كما تم اختبار صفائح الفولاذ C6 المطلية مسبقًا، وخضعت صفائح الفولاذ C5 لعملية الكربنة التي أجريت عند 900 درجة مئوية لمدة 3 ساعات (بدون التبريد). كل أنواع الصفائح التي تم ذكرها سابقا خضعت لعملية الشد والانحناء لتقييم تأثير الدهانات على نفس ظاهرة "الرجوع المرن".

ركزت دراسة الصفائح ذات الطلاءات المختلفة بشكل أساسي على تأثير العوامل المختلفة مثل سمك الطلاء، خشونة السطح، عمق التني، قوة تثبيت الصفيحة، حد المرونة و معامل يونغ. تمت محاكاة عملية التني على شكل V باستخدام برنامج Abaqus ثنائي البعد. في هذا العمل، أظهرنا أيضًا أن قيم زاوية الرجوع المرن أصغر في الحالات التالية: الألواح غير المطلية، قوة تثبيت الصفيحة الأعلى، خشونة السطح الأعلى، سماكة الطلاء المنخفضة، عمق التني المنخفض، حد المرونة المنخفض و معامل يونغ مرتفع. كما تم إجراء أول دراسة مقارنة أظهرت تأثير كل من نوعي الطلاء (المعدني والبلاستيك ي) على الرجوع المرن. من ناحية أخرى تمت مقارنة النتائج الرقمية مع تلك التي تم الحصول عليها تجريبيًا.

الكلمات المفتاحية: الطلاء، خشونة السطح، التمدد و الانحناء، الاحتكاك، الرجوع المرن.

Abstract

Stamped or bent mechanical parts always present anomalies on the surface condition (orange peel skin) and on the dimensional precision, caused by springback. Springback is complicated, and it is hard to simulate it precisely because it is related to many factors such as tooling geometry, material properties, friction, and boundary conditions. The steel samples are coated with a thin layer of several metals (zinc, tin, nickel and chromium). This investigation takes into account the influence of various parameters such as the coating thickness, its roughness, the punch depth, the blank holding force (BHF), and the change in the material's yield strength. In this context, the springback of V and U stretch bended samples with uncoated and coated steel is experimentally and numerically investigated. The metal studied is a non-alloy steel, used especially for the manufacture of household appliances at the SONARIC Company. The steel samples are coated with different metallic and plastic coatings to highlight the effect of the coating on the quality of forming and springback. Metallic coatings are made by electroplating of a thin layer of several metals (zinc, tin, nickel and chromium). Regarding the plastic coating, a self-adhesive plastic film is placed on the surfaces of the tools (die and side clamp) in contact with the sample to be bent, and on both sides of the sample. C5 sheets are carburized at 900° for 3 hours (without quenching). Pre-lacquered and carburized steel sheets are all tested in stretch-bending to assess the effect of paints on springback. This investigation takes into account the influence of various parameters such as the coating thickness, its roughness, the punch depth, the blank holding force (BHF), and the change in the material's yield strength and Young's modulus. A self-developed two-dimensional elasto-plastic finite element code was developed using Abaqus/standard. In this work, we also show that the springback angle is smaller for uncoated sheet, higher BHF, higher surface roughness, lower coating thickness, lower stretching height, lower yield strength and higher Young's modulus. A first comparative study was carried out, showing the influence of each types of coating (metallic, plastic) on springback. On the other hand, the numerical results were compared with those obtained by experimentation.

Keywords: coating; friction; springback; stress; stretch-bending

Liste des abréviations

BHF	Force de serrage
h	Profondeur d'étirage
R_a	Rugosité
R_e/σ_s	Limite élastique
E	Module de Young
R_p	Rayon de poinçon
R_d	Rayon de matrice
V_p	Vitesse du poinçon
e/t_c	Épaisseur de revêtement
R_m	Résistance maximal
D	Dureté
C	Couple de serrage
RE	Résultats expérimentaux
RN	Résultats numériques

Table des matières

Introduction générale	1
CHAPITRE 1 : PROCÉDES DE MISE EN FORME.....	5
1.1. Introduction.....	6
1.2. Types de procédés de mise en forme	6
1.2.1. Emboutissage	7
1.2.2. Pliage.....	8
1.3. Défauts de mise en forme des tôles métalliques.....	11
1.4. Comportement mécanique des tôles destinées au formage	13
1.4.1. Comportement élasto-plastique uni-axial : Essai de traction	13
1.4.2. L'écroutissage	15
1.4.3. Courbes limites de formage (C.L.F)	16
1.4.4. Contraintes résiduelles	19
• Classification des contraintes résiduelles	20
CHAPITRE 2. RETOUR ELASTIQUE.....	22
2.1. Retour élastique	23
2.2. Influence des paramètres opératoires sur le retour élastique	24
2.2.1. Influence des paramètres du processus sur le retour élastique	25
• Influence de la restauration dynamique	25
• Influence de la force de serrage (BHF)	26
• Influence de la profondeur d'étirage	29
• Influence du frottement et de lubrification	30
• Influence de la vitesse.....	32
• Influence du recuit	33
• Influence du temps de maintien	34
2.2.2. Effet des propriétés du matériau sur le retour élastique	35
• Effet de la résistance mécanique	35
• Influence du revêtement.....	42
2.2.3. Effet de la géométrie sur le retour élastique	43
• Influence des dimensions de la tôle (épaisseur et largeur)	43
• Influence des dimensions des outillages (Rayon matrice/poinçon, jeu).....	45
• 2.3. Simulation numérique du retour élastique	48

• Influence du Nombre de points d'intégration dans l'épaisseur	49
• Influence du Nombre des éléments à travers l'épaisseur	52
• Influence du maillage et de la taille d'éléments finis	53
• Influence du type d'éléments finis	54

CHAPITRE 3 : TRAITEMENTS DE SURFACE, LUBRIFICATION ET LEURS EFFETS SUR LES PROCÉDES DE FORMAGE. 56

3.1. Introduction	58
3.2. Préparation des surfaces	58
3.3. Revêtements	59
3.4. Diversité des revêtements et traitements de surface	59
3.5. L'industrie des traitements de surfaces	60
3.5.1. Structure du marché en fonction des besoins	60
3.6. Classification des revêtements	61
3.6.1. Revêtements non métalliques	62
3.6.2. Revêtements métalliques	62
a. Techniques de revêtement métallique en milieu humide.....	63
• Dépôt chimique	63
• Dépôt par immersion dans des métaux fondus	63
• Dépôt électrolytique	64
• Définitions	64
• Principe du dépôt électrolytique	64
• Pourquoi la Préparation de surface ?	66
• La ligne de traitement de surface	67
• Le dégraissage	67
• Le décapage	68
• Le rinçage	68
• Les différents dépôts électrolytiques	68
• Le nickelage électrolytique	68
• Le chromage électrolytique	69
• L'Électrozingage	69
• L'étamage.....	70
3.6.3. Traitements thermochimiques	70
• La cémentation	71
3.7. Lubrification des tôles en formage	72

CHAPITRE 4. PROCEDURE EXPERIMENTALE..... 73

4.1. Introduction	74
4.2. Préparation des échantillons	74
4.2.1. Choix du matériau	74
4.2.2. Les traitements de surface.....	75
• L'électrodéposition	75
• La cémentation	77
4.2.3. Caractérisation des aciers utilisés	78
• Mesure des épaisseurs des couches.....	78
• Mesure de la rugosité	78
• Essai de traction	79
• Mesure de dureté	84
4.2.4. Essais d'étirage pliage	85
• Etirage-plierage en U	85
• Etirage-plierage en V	85
• Paramètre des essais	86
4.2.5. Calcul du retour élastique	88

CHAPITRE 5 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS 95

5.1. Introduction	96
5.2. Effet des traitements de surface et BHF sur le retour élastique	96
a. Les revêtements métalliques	97
b. Revêtements plastiques et peinture	109
c. Cémentation	119
5.3. Effet de l'épaisseur du revêtement sur le retour élastique	125
5.4. Effet de la profondeur d'étirage sur le retour élastique	132
a. Revêtements métalliques	132
b. Revêtements plastiques et peinture	137
c. Cémentation	141
5.5. Effet de la rugosité (R_a) sur le retour élastique	144
5.6. Effet des propriétés mécaniques sur le R.E	148
a. Effet de la limite élastique R_e	148
b. Effet du Module de Young E	152
5.7. Simulation numérique	156
References.....	164
Liste des figures	179
Liste des tableaux.....	181

Introduction générale

Dans les industries mécaniques, les produits plats (tôles) sont largement utilisés pour réaliser diverses composantes; les pièces de carrosseries d'automobiles par exemple sont principalement fabriquées à partir de tôles métalliques. Bien qu'il existe une grande variété de procédés de formage par déformation plastique des métaux, L'emboutissage reste l'un des procédés les plus utilisés. De plus à ses cadences trop élevées, il utilise presque la totalité du matériau. Ce qui rend son intérêt économique indéniable.

Les défauts résultants du formage des tôles ayant un impact économique considérable, depuis la seconde moitié du 20ème siècle leur prédiction est devenue un enjeu industriel important. Différents types de défauts peuvent impacter les propriétés mécaniques ou esthétiques des tôles embouties et le phénomène du retour élastique en fait partie.

Cependant, la corrosion est un problème majeur des produits en acier. Il existe peu d'études réalisées sur le comportement du retour élastique des tôles revêtues. L'utilisation de revêtements peut améliorer les performances des régions de surface pour la réduction du frottement, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et pour protéger les surfaces contre les dommages dans les systèmes mécaniques.

Dans l'industrie automobile et d'électroménager, l'utilisation des tôles d'acier revêtues devient de plus en plus large, en raison de leur meilleure résistance à la corrosion. De plus, elles doivent encore satisfaire aux d'autres exigences telles que la formabilité et la qualité de surface.

En générale, les films d'emboutissage sont toujours adaptés de manière optimale aux exigences de production et protègent de manière fiable les surfaces en acier contre les rayures et les marques pouvant apparaître au cours d'emboutissages légers ou

profonds. L'utilisation de ces films a aussi un effet direct sur la forme finale de l'emboutie et par conséquent sur le retour élastique.

En étudiant l'influence des différents facteurs sur le retour élastique, plusieurs chercheurs ont tenté d'obtenir une compréhension de base à ce phénomène en développant des modèles analytique et numérique.

La simulation numérique des procédés de fabrication et de mise en forme des composants mécaniques est aujourd'hui une réalité industrielle. Elle constitue ce qui convient d'appeler le formage virtuel. Plusieurs codes éléments finis généraux ou dédiés à la mise en forme (outils métiers) sont aujourd'hui mis à la disposition de l'ingénieur pour lui permettre de mettre au point et d'optimiser virtuellement les gammes de fabrication.

Ce travail vise à étudier principalement l'influence du revêtement sur le processus d'étirage-plier et par conséquent sur le retour élastique. Pour ce fait trois grandes étapes ont été suivies dans ce projet, que nous décrivons par :

Nous avons utilisé un acier non allié de types C5, conçus pour la fabrication d'électroménager. Afin d'évaluer l'influence du revêtement sur le retour élastique, une série d'électrodéposition a été faite en utilisant quatre revêtements métalliques (Chrome, Nickel, Etain et Zinc). Concernant le revêtement plastique, nous avons posé une couche d'un film plastique autocollant de trois façons différentes : Sur les parois intérieures des outils (matrice et serre flanc) en contact avec l'échantillon à plier, sur une seule face de l'échantillon à plier et sur les deux faces de l'échantillon à plier.

L'effet de la cémentation est aussi inclus dans ce travail. Où des échantillons en acier C5 ont subi des traitements de cémentation effectués à 900° pendant 3h (sans trempe). Elles sont toutes testées en étirage-plier. Ceci est nécessaire pour évaluer l'effet des revêtements plastiques et la cémentation sur le retour élastique.

Après la préparation des échantillons, une suite des essais et mesures laboratoire ont été effectués (essai de traction, microscopie, mesure de dureté, de rugosité, des épaisseurs des couches). Deux essais d'étirage-plier, en V et en U, ont ensuite été présentés, en changeant quelque paramètres opératoires tel que la force serrage et la

profondeur d'étirage. Ces essais sont réalisés à température ambiante sur deux machines de traction de type Fu 1000e et ZwickRoell dédiées à la mise en forme des tôles minces. En finalisant l'étude par le calcul du retour élastique et l'évaluation des résultats.

L'étude expérimentale présente une base de données pour effectuer une simulation numérique. Le solveur éléments finis généraliste Abaqus/Standard est retenu pour cette étude. Les lois constitutives utilisées pour représenter le comportement du matériau ont été identifiées à partir des résultats expérimentaux de traction obtenus préalablement. L'essai d'étirage-plier en V des tôles à revêtements métalliques a été simulé en faisant varier les mêmes paramètres expérimentaux. Les résultats numériques ont été élaborés et validés par comparaison à des tests expérimentaux.

Ce travail fait, l'objet de cinq chapitres, dont les trois premiers chapitres ont été consacrés à l'étude bibliographique. Le premier chapitre présente un rappel général sur les procédés de mise en forme et une phénoménologie globale liée au comportement des tôles lors de ces procédés.

Le second chapitre est réservé à une synthèse bibliographique sur l'un des problèmes majeurs de mise en forme qui est le retour élastique. En montrant l'influence de la majorité des paramètres opératoires et numériques sur ce phénomène, soutenu par les études précédentes.

Le troisième chapitre, est dédié aux procédés de traitement de surface en appuyant sur différents revêtements métalliques utilisés dans ce travail.

Le quatrième chapitre est consacré à la procédure expérimentale et numérique, commençant par le choix du matériau passant par les étapes de préparation des échantillons et l'électrodéposition, en arrivant aux essais d'étirage-plier en V et en U. Sans oublier la simulation numérique et les essais de la caractérisation et l'identification du comportement mécanique de l'acier utilisé.

Le dernier chapitre est dédié aux résultats expérimentaux et numériques de l'étude du phénomène du retour élastique des tôles revêtues. En mettant en jeu l'influence de divers paramètres sur le retour élastique. Une comparaison entre l'effet des revêtements métalliques et plastiques sur le retour élastique est faite.

Enfin, le travail est finalisé par une conclusion générale précisant ainsi les résultats obtenus et des perspectives sont mises en lumière.

CHAPITRE 1.
PROCEDES DE MISE EN FORME

1.1. Introduction

Il existe actuellement une grande variété de procédés de mise en forme par déformation plastique des métaux. L'emboutissage, le tréfilage, le filage, le forgeage et le laminage sont ainsi utilisés pour la production de composants métalliques de structure. Ces procédés présentent différents avantages en tant que moyens de fabrication :

- Cadences de production très élevées
- Réduction des coûts sur la production en grande série
- Taux de déchets faibles comparativement à l'usinage.

Les défauts issus de la mise en forme de tôles ayant un impact économique considérable, leur prédiction est depuis la seconde moitié du 20ème siècle devenue un enjeu industriel important. Différents types de défauts peuvent influencer les propriétés mécaniques ou esthétiques de tôles embouties et le phénomène du retour élastique est considéré comme l'un des défauts majeurs, qu'on va le traiter au cours du deuxième chapitre.

1.2. Types de procédés de mise en forme :

Un procédé de mise en forme consiste à déformer à chaud ou à froid, sans déchirure ni rupture, un lopin pour lui conférer une certaine géométrie, décrite par une forme et des directions spécifiées par le bureau d'étude. On met en œuvre généralement un outillage (outil + matrice), permettant de transformer la matière en pièce finale.

Les différentes techniques existantes (**Figure 1.1**) mettent en œuvre un ou plusieurs des phénomènes suivants :

- Ecrasement de la matière
- Etirage de la matière
- Pliage de la matière

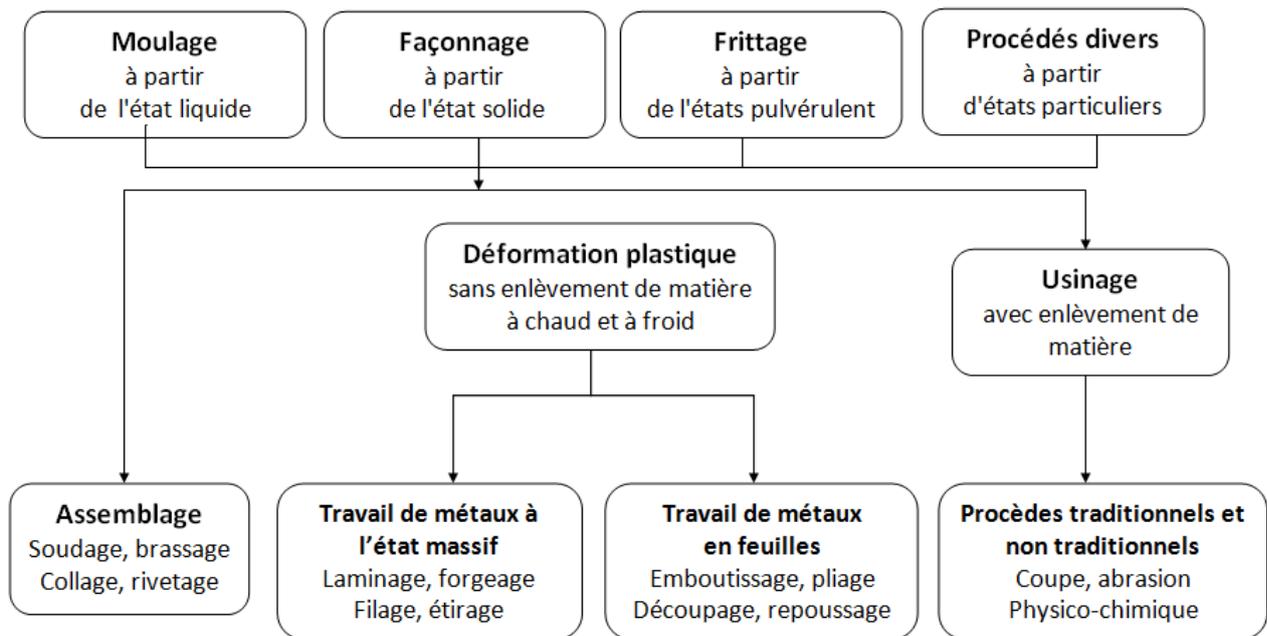


Figure 1. 1. Principaux procédés de mise en forme. (Felder, 2000)

1.2.1. Emboutissage :

L'emboutissage est un procédé de mise en forme, qui consiste à venir déformer plastiquement une tôle métallique mince (en général d'épaisseur inférieure à 3 mm) pour générer, à partir d'une surface souvent plane, une forme complexe de géométrie non développable (Figure 1.2), (Banabic, 2010; Col, 2010). Ce procédé est l'un des seuls à pouvoir tenir des cadences de production élevées tout en respectant les tolérances géométriques exigées. Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie automobile pour fabriquer les ouvrants des véhicules (portières, capot, coffre, toit ...) mais également dans les industries aéronautique, de l'électroménager, de l'emballage alimentaire, etc. (Coër, 2013)

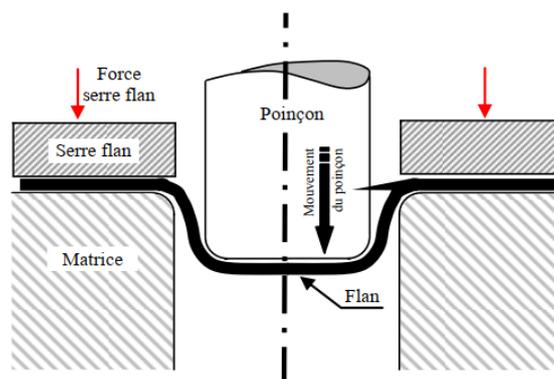


Figure 1. 2. Principaux procédés de mise en forme. (Ledoux, 2005)

En fonction de la température de formage, il existe deux techniques d'emboutissage :
- **Emboutissage à froid** qui consiste à former des pièces à la température ambiante. Cette technique présente l'avantage d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle, bonnes propriétés mécaniques des pièces embouties et un coût réduit parce qu'elle ne nécessite pas l'échauffement du flan et de la matrice. Cependant elle comporte quelques inconvénients tels que : les contraintes résiduelles qui peuvent provoquer un risque de rupture par fatigue, l'épaisseur des tôles à emboutir et les caractéristiques mécaniques sont limitées, écrouissage du matériau (risque de durcissement structurel et baisse de la ductilité). Pour la fabrication de pièces de grandes épaisseurs il est nécessaire d'effectuer cette opération en plusieurs passes. **(Bouhéliar, 1988)**.

- **Emboutissage à chaud** qui consiste à former des pièces sur des presses hydrauliques par chauffage du flan et de la matrice ce qui évite l'écrouissage et la formation des contraintes résiduelles. Cette technique facilite la déformation du matériau, mais à une cadence de production moins élevée par rapport à celle de l'emboutissage à froid. Les pièces finies sont de moins bonne qualité, que ce soit au niveau de l'état de surface ou du dimensionnement. **(Bouhéliar, 1982)**

1.2.2. Pliage

Le pliage est une opération de mise en forme à froid d'un matériau plat avec ou sans lubrification en changeant la direction de ses fibres de façon brusque suivant un angle, par dépassement de sa limite élastique, **(Ben-Elechi et al., 2006)**. Cette opération est réalisée suivant deux étapes : la conformation puis le retrait des outils. La conformation est utilisée pour atteindre des déformations irréversibles en vue de donner à la pièce les spécificités attendues (géométrie et caractéristiques mécaniques), **(Pouzols, 2011)**. Cette technique est très répandue, elle intéresse aussi bien les pièces de grandes dimensions (longerons de camions en acier E 24, épaisseur 5 mm, longueur 6 m, presse de 30 000 kN) que les petites pièces de l'industrie électromécanique (pattes de fixation laiton UZ 33, épaisseur 1 mm, sur outils à suite 120 coups/min, presse 500 kN), **(Martin, 1985)**. Les outillages sont usinés dans des aciers à hautes propriétés mécaniques. Les éléments classiques des outillages de mise en forme par

pliage sont le poinçon, la matrice et le serre-flan. Le poinçon est défini comme l'élément mobile du système, la matrice étant l'élément fixe sur lequel le flan vient se conformer et le serre-flan est un élément de retenue. Les poinçons et matrices sont généralement rayonnés pour faciliter la mise en forme et éviter les amorces de rupture.

- **Types de pliage :**

Suivant la géométrie des poinçons et matrices, trois types de pliage sont distingués : en V, en U et en L. (**Figure 1. 3**)

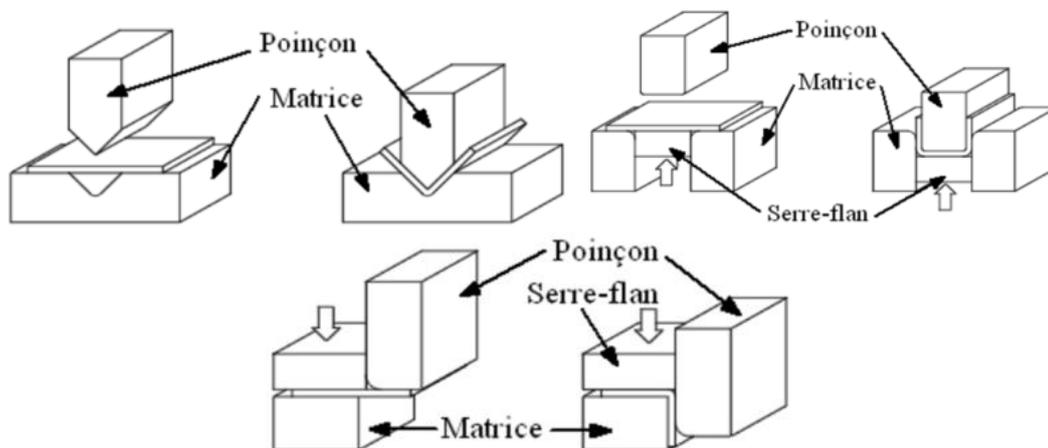


Figure 1. 3. Pliage en V, U et L. (Pouzols, 2011)

❖ Dans le cas du pliage en V, le serre-flan est inutile. La variation de l'angle du V du poinçon et de la matrice entraîne la variation de l'angle de formage de la tôle. Selon la course imposée au poinçon, le pliage est en l'air ou en fond de matrice. (**Pouzols, 2011**)

On distingue deux sortes de pliage en V :

- **Pliage en l'air**

Pendant le processus du pliage en l'air, la tôle est placée dans le vé. Le contre-vé ou poinçon descend dans le vé et donne à la tôle l'angle souhaité. L'effort de pliage cesse lorsque la tôle arrive à fond de vé. L'angle final est celui du vé, augmenté du retour élastique, environ 2 à 3°. L'angle du poinçon est généralement de 88° pour obtenir des angles de 90° à 180°. Ce mode de pliage est couramment utilisé dans le secteur de la tôlerie car les forces appliquées sont environ 5 fois moins importantes que pour du

pliage en frappe, mais le choix entre ces deux techniques se fera au cas par cas, en fonction des projets. (Ogier, 2021)

- **Pliage en frappe :**

Le pliage en frappe (ou pliage en fond de matrice) est réservé aux épaisseurs de tôle jusqu'à 2mm. Il s'agit d'un procédé comportant plusieurs phases :

- pendant la 1ère phase, la tôle subit un pliage en l'air jusqu'à ce que ses bords touchent les faces du vé.
- pendant la 2ème phase (la frappe), le pli épouse le profil de l'outillage et la tôle subit un matriçage : elle obtient le même angle que l'outillage.
- Enfin, la tôle fait l'objet d'un écrouissage élevé au niveau du pli. C'est à ce niveau que le métal atteint des valeurs d'élasticité les plus importantes qui donnent au pli une raideur particulière. Après pliage, le pli ne se rouvre pas comme en pliage en l'air quand les deux outils libèrent la tôle. On a coutume de dire alors que le pliage en frappe « brise » l'élasticité de la tôle. Il faut bien sûr entendre qu'il brise les effets de l'élasticité rémanente de la tôle. Le pliage en frappe a pour objectif de supprimer l'effet retour élastique. Il nécessite une force très importante et permet d'obtenir des angles précis. (Ogier, 2021)

La plupart des entreprises n'utilisent pas le pliage en l'air, car la tôle n'est pas contrainte par un outillage, ce qui a pour conséquence un retour élastique important. (Pouzols, 2011)

- ❖ **Le pliage en U** comprend un serre-flan mobile qui bloque la matière sous le poinçon et évite donc les glissements de la tôle lors de la mise en forme entre les deux blocs matrices.
- ❖ **Le pliage en L** ou en tombé de bord (**Figure 1.4**) consiste à plier un flan en porte-à-faux à 90° maintenu entre la matrice et le serre-flan.

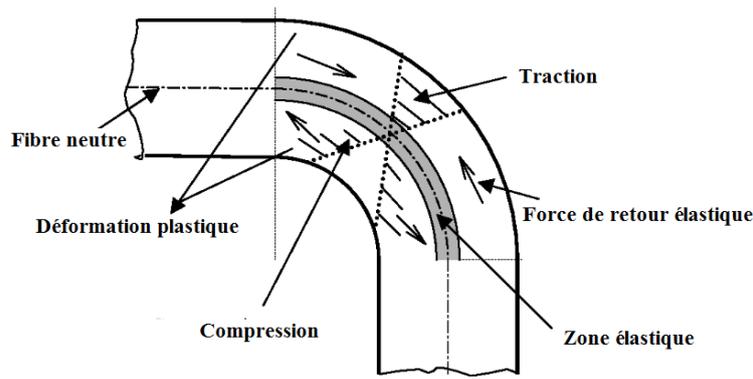


Figure 1. 4. Schéma de l'état de contrainte dans l'épaisseur du flan en flexion.
(Delfina, 2003)

Le flan peut se représenter comme un ensemble de fibres contigües dans son épaisseur. Les fibres proches de la surface intérieure se raccourcissent tandis que celles proches de la surface extérieure s'allongent. L'état de contrainte correspondant est donc de la compression pour les fibres proches de la surface intérieure et de la traction pour les fibres proches de la surface extérieure. La fibre qui délimite ces deux états de contrainte est appelée fibre neutre. Sa position dans le flan est importante pour le calcul du retour élastique.

1.3. Défauts de mise en forme des tôles métalliques

Au cours des opérations de mise en forme des tôles métalliques et parfois postérieurement, divers défauts peuvent apparaître sur les pièces, (**Figure 1. 5, 1.6**) Ces défauts peuvent être classés en deux catégories : les défauts globaux et les défauts locaux, que nous définissons comme suit :

- Un défaut global concerne la géométrie finale de la pièce. Deux phénomènes sont essentiellement à l'origine de ces défauts : le retour élastique et le plissement.
- Un défaut local concerne des zones plus ou moins réduites de la pièce, où une diminution nette de l'épaisseur, voire rupture, peut apparaître. La striction localisée en est un exemple. D'autres phénomènes plus rares, comme la rupture différée en est un autre. (**Haddag, 2007**)

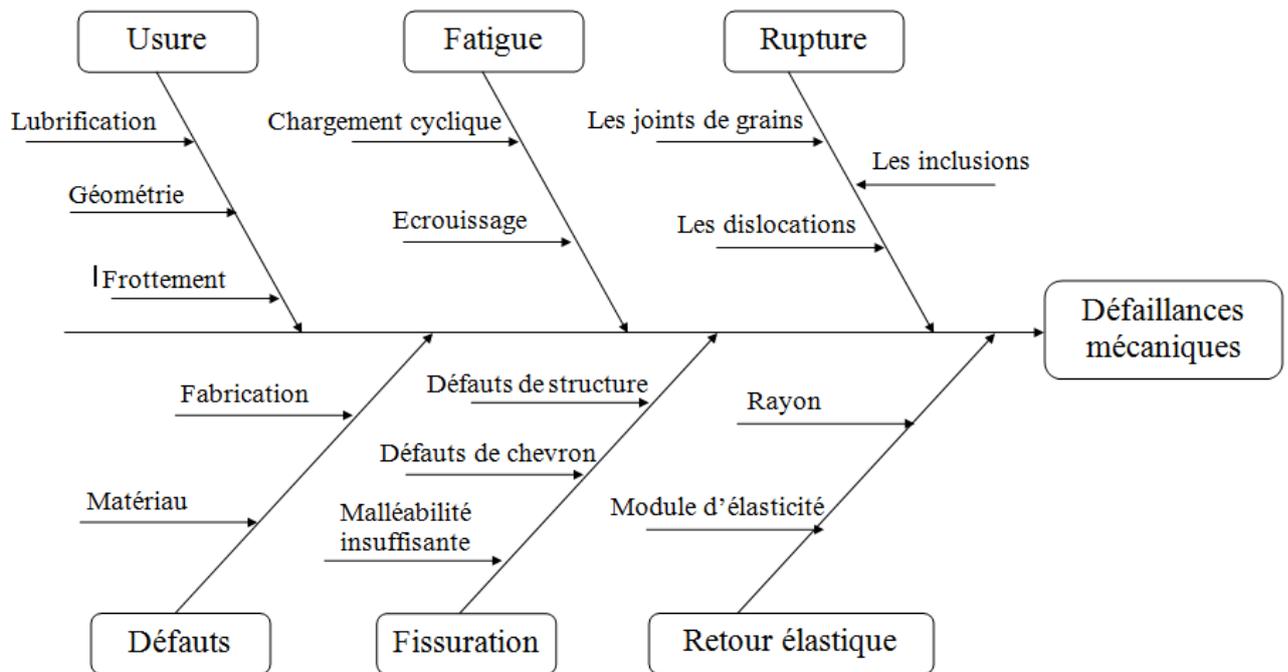


Figure 1. 5. Diagramme d'Ishikawa pour les défaillances mécaniques. (Lepadatu, 2006)

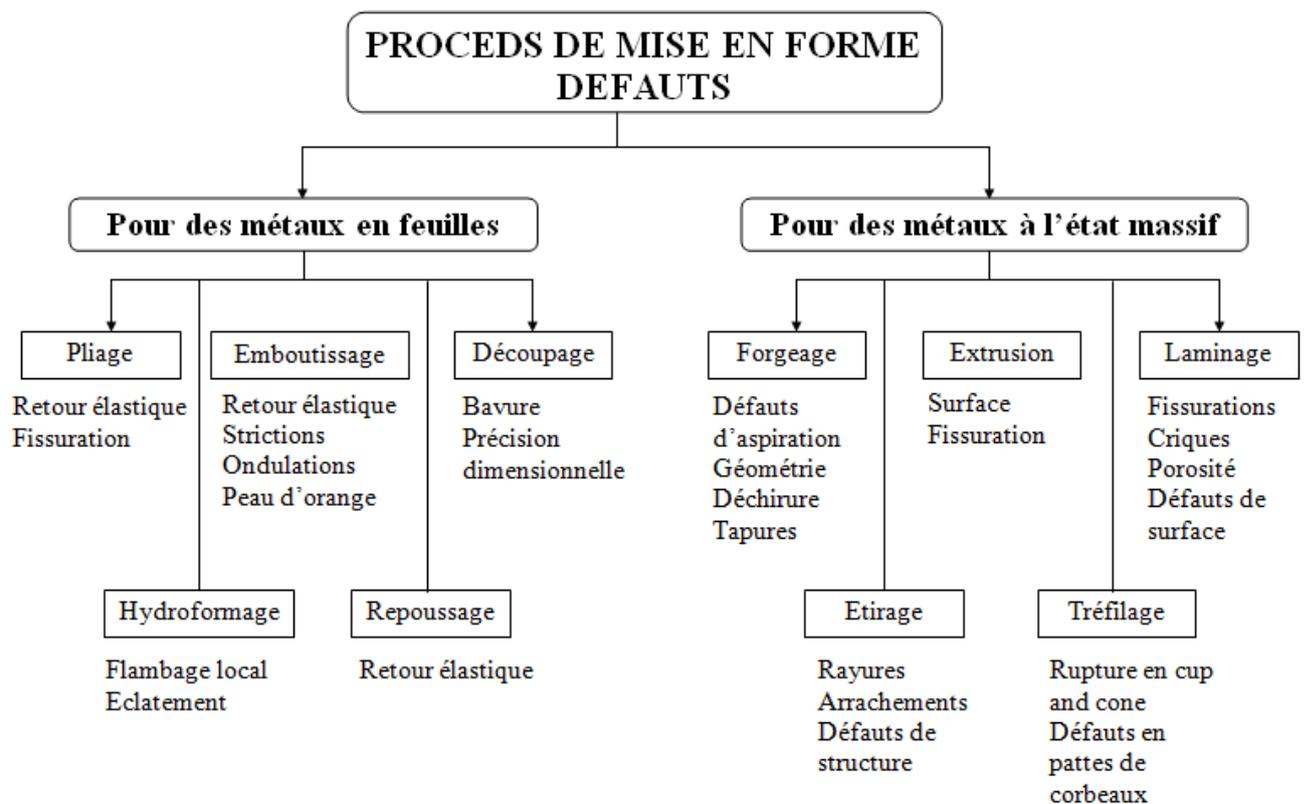


Figure 1. 6. Les principaux défauts pour les procédés de mise en forme. (Lepadatu, 2006)

1.4. Comportement mécanique des tôles destinées au formage:

Le comportement élasto-plastique des solides est mis en évidence à travers des essais de caractérisation mécaniques. Ces essais sont réalisés sur des éprouvettes dont la géométrie permet de remonter au champ de contrainte dans au moins une zone de cette éprouvette, qu'on appelle la zone utile. L'essai le plus simple à mettre en œuvre, et le plus utilisé, est l'essai de traction.

1.4.1. Comportement élasto-plastique uni-axial : Essai de traction

L'essai de traction consiste à tirer sur une barre, et permet d'extraire la courbe contrainte-déformation unidimensionnelle du matériau illustrée sur la **Figure 1.7**. On observe au cours d'un chargement monotone croissant que la courbe présente deux phases :

Première phase : Elle est définie par $\sigma < \sigma_0$. La relation entre σ et ε est linéaire. Si le chargement n'a pas dépassé la limite de contrainte σ_0 , la décharge repassera par le même chemin :

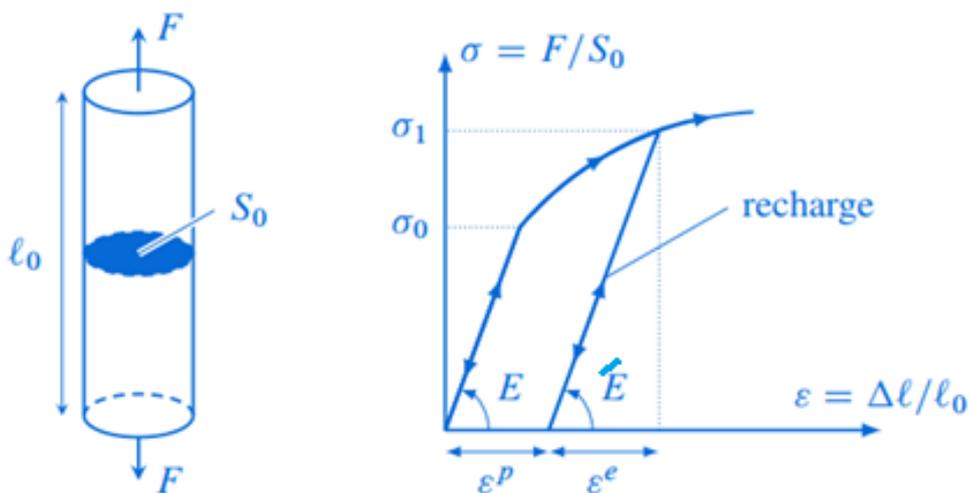


Figure 1. 7. Essai de traction

Il y a *réversibilité*; c'est la définition de l'élasticité. La relation de comportement s'écrit alors :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Où E est le module d'Young, identifié comme la pente de la droite.

Seconde phase : Elle est caractérisée par $\sigma > \sigma_0$. Le matériau gagne le domaine plastique. Pour observer l'irréversibilité liée au comportement plastique, il est nécessaire d'effectuer une décharge de l'éprouvette. La décharge effectuée à partir d'une contrainte σ_1 supérieure à la limite d'élasticité initiale σ_0 ne se fait pas suivant la courbe de charge mais suivant une droite de pente E : c'est de nouveau un comportement élastique et réversible. On identifie donc une partition *additive* de la déformation uniaxiale en parties élastique et plastique :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$$

Où ε^e est la déformation élastique, réversible (récupérable à la décharge), liée à la contrainte au travers de la loi d'élasticité et où ε^p est la déformation plastique, irréversible ou résiduelle. Si on recharge l'éprouvette après la décharge qui nous a permis d'identifier une déformation irréversible, la plasticité redémarre à σ_1 (effet lié à la réversibilité de la décharge-recharge); en conséquence, la limite d'élasticité est passée de σ_0 à σ_1 : on a *écrouit* le matériau. L'écrouissage se traduit par le fait que la limite d'élasticité dépend de la déformation plastique.

Si la décharge se poursuit jusqu'à repasser en plasticité, cette fois-ci en compression, on observe généralement qu'elle s'effectue à $\sigma_2 > \sigma_0$. Aussi, l'écrouissage du matériau en traction a modifié la limite d'élasticité en compression : c'est l'effet *Bauschinger* illustré sur la **figure 1.8**. Cet effet n'intervient qu'après un premier chargement. La plasticité rompt la symétrie traction-compression. Ce type de comportement est principalement observé pour les matériaux métalliques. (Heuzé, 2015)

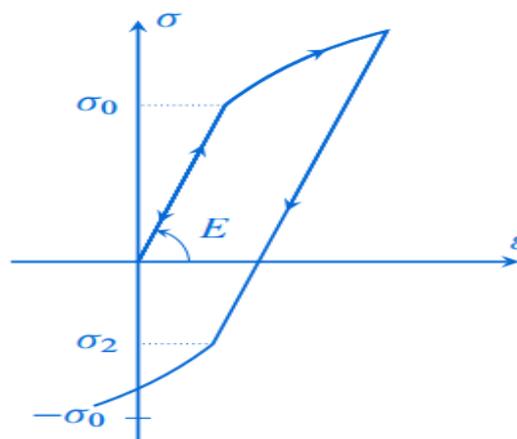


Figure 1. 8. Effet Bauschinger

1.4.2. L'écrouissage :

L'écrouissage est un durcissement du matériau suite à une déformation à froid, lors de celui-ci de nombreux défauts sont introduits en particulier une forte densité de dislocations, l'énergie interne du matériau écroui est supérieure à celle du matériau non écroui et l'écrouissage induit une nouvelle orientation préférentielle du matériau et une nouvelle texture. De plus, il augmente la résistance à la rupture ainsi que la limite élastique qui se rapproche de la résistance à la rupture.

Du point de vue macroscopique, l'écrouissage d'un métal ou d'un alliage conduit à une augmentation de ses propriétés mécaniques (la dureté, de la résistance à la traction, et de la limite d'élasticité), et une diminution de l'allongement à la rupture et l'aptitude à la déformation.

- **Coefficient d'écrouissage :**

Le coefficient d'écrouissage est mesuré à partir de la courbe vraie, calculée à partir de la courbe conventionnelle de traction, en se servant de la relation **d' Holloman**. Cette loi a été proposée pour rendre compte de la forme de la courbe de traction vraie et elle est valable uniquement pour les métaux doux. Elle est de la forme :

$$\sigma_v = k \cdot \varepsilon_v^n$$

Où n représente le coefficient d'écrouissage, σ_v représente la contrainte vraie et ε_v représente la déformation vraie, le coefficient d'écrouissage est calculé à partir de tracé de courbe rationnelle en coordonnées logarithmique. (Sen et al., 2020; Zazi, 2011)

$$\ln \sigma_v = \ln k + n \cdot \ln (\varepsilon_v)$$

Dans ce cas le coefficient d'écrouissage « n » se calcule à partir de deux points de cette courbe en se servant de la relation :

$$n = \frac{d \ln \sigma_v}{d \ln \varepsilon_v}$$

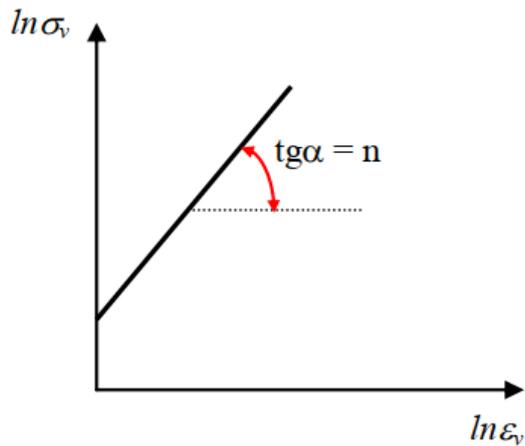


Figure 1. 9. Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques.

(Taâmallah, 2012)

Le coefficient d'écrouissage caractérise la déformation rationnelle répartie (homogène) que peut subir un matériau et l'aptitude à répartir uniformément cette déformation. Ce coefficient dépend du matériau et du traitement qu'il a subi. En général on a :

$$0,1 \leq n \leq 0,4$$

Si $n = 0,1$: le matériau a une faible consolidation ;

Si $n = 0,4$: le matériau a une forte consolidation ;

Si $n = 0$: Le matériau ne subit aucune consolidation, C'est donc que ce matériau est parfaitement plastique. **(Taâmallah, 2012)**

1.4.3. Courbes limites de formage (C.L.F) :

La courbe limite de formage est un concept utile pour caractériser la formabilité des tôles métalliques, elle est principalement utilisée comme un paramètre dans l'analyse par éléments finis pour contrôler où le matériau dépasse le niveau de la formabilité. Elle est également utilisée dans les ateliers pour analyser les problèmes réels et potentiels de formage des tôles ou de comparer la formabilité de différents matériaux.

Dans le but de décrire de manière quantitative les déformations maximales admissibles par le matériau pour divers modes de sollicitation. **(Keeler, 1965) et (G.M. Goodwin, 1968)**, ont introduit la notion de cette courbe limite de formage (CLF). Il s'agit de la

frontière séparant les zones de réussite et d'échec d'une pièce emboutie sur le diagramme des déformations principales de surface de la tôle. (Incandela, 2007).

La détermination expérimentale des courbes limites de formage consiste à reproduire à l'aide d'essais de laboratoire tous les types de déformations susceptibles d'entraîner la striction localisée et la rupture en emboutissage. Ces types de déformation sont compris entre deux modes extrêmes : l'expansion et la traction uniaxiale. (Incandela, 2007). La **Figure 1.10** présente l'allure classique d'une courbe limite de formage typique d'une tôle métallique destinée à l'emboutissage.

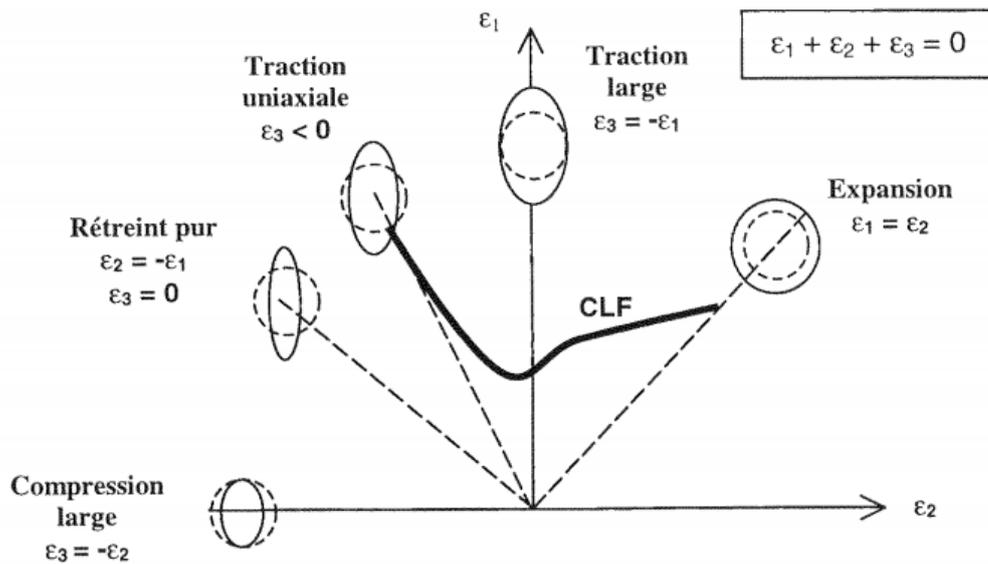


Figure 1. 10. Courbe limite de formage typique d'un acier pour emboutissage. (Arab & Javadimanesh, 2013).

Différents modes de déformation sont sollicités en emboutissage, ces différents types de déformations simples se succèdent et/ou se combinent lors d'une opération réelle d'emboutissage. Par convention, tout type de déformation peut être dessiné par un point sur le diagramme $\epsilon_1 = f(\epsilon_2)$ où ϵ_1 est la déformation principale dans le plan de la tôle et ϵ_2 la déformation secondaire perpendiculaire à la déformation principale (Figure 1.10). La valeur de la déformation dans l'épaisseur est obtenue à partir de la loi de conservation du volume ($\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$).

Les différentes déformations possibles sur un embouti peuvent être situées entre:

- l'expansion : cette déformation a lieu au niveau du nez du poinçon, l'expansion est d'autant plus importante que le métal est bloqué sous le serre-flan. Le cas typique est la formation d'un godet hémisphérique.
- la traction large : ce type de déformation se situe sur les parois verticales de l'embouti (jupe), il est généré par les tensions exercées par la tôle.
- la traction uniaxiale : cela correspond à ce qui se passe sur une éprouvette de traction. Les zones sollicitées ainsi sur l'embouti sont situées entre celles déformées en traction large et celles en rétreint.
- le rétreint: cette déformation a lieu sous le serre-flan. Il résulte d'un écoulement de matière sous le serre-flan pour alimenter les parois en métal : la zone sous le serre-flan subit un épaissement alors que la tôle s'amincit en paroi. Un godet à fond plat se déforme en rétreint pur.

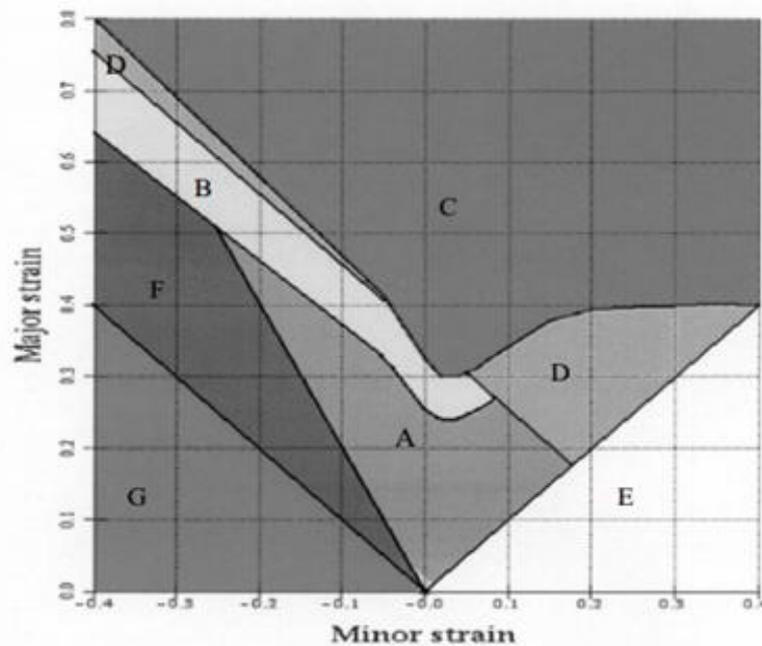


Figure 1. 11. Diagramme de limite de formage, distinguant différents domaines.

(Arwidson, 2005)

La courbe limite de formage est celle qui forme la limite inférieure de la zone C, elle décrit le niveau d'effort que le matériau réel peut supporter jusqu'au défaut, ce dernier peut être un plissement ou une fissuration. Après un principe de base l'expérience à

assurer que le composant ne cassera pas si le niveau de contrainte ne devrait pas excéder 80% du niveau de la courbe limite de formage. Les différentes zones dans le diagramme de la **Figure 1. 11** sont :

- A. Des capacités de formage du matériau.
- B. Danger de la rupture ou de fissuration.
- C. Le matériau est fissuré
- D. Amincissement fort.
- E. déformation plastique insuffisante Risque du retour élastique.
- F. Tendance au plissement. G. plis entièrement développés.

1.4.4. Contraintes résiduelles :

On définit les contraintes internes résiduelles comme étant les efforts internes qui subsistent dans les pièces mécaniques lorsque ces dernières ne sont soumises à aucun effort extérieur. Les contraintes internes proviennent des procédés de fabrication (trempe, mise en forme, soudage ...). Elles influent sur la durée de vie des composants mécaniques en accélérant ou en retardant l'apparition de fissures et de la déformation. Ainsi le comportement mécanique et la durée de vie des structures mécaniques soumises à des chargements variés (mécanique, thermique et chimiques) dépendent de l'état des contraintes induites dans le matériau.

D'après la définition de (**Mura, 1987**), les contraintes résiduelles sont des contraintes internes auto-équilibrantes qui existent dans un corps solide qui n'est soumis à aucune forces ou contraintes externes et qui se trouve en condition de température uniforme. En général ces contraintes sont dues à la présence de la déformation plastique, source d'incompatibilité locale engendrée par trois origines physiques fondamentales : l'écoulement plastique, la variation de volume et la contraction ou dilatation thermique. Ces incompatibilités sont compensées par des déformations plastiques qui engendrent des contraintes internes. Les sources de ces contraintes peuvent provenir de déformations aux échelles macroscopiques ou microscopiques, (**Hirschi, 1999**).

- **Classification des contraintes résiduelles :**

Les contraintes résiduelles sont classifiées en trois ordres, liés à l'échelle à laquelle on considère le matériau, proposés il y a quelque années par Macherauch:

- a. **Contraintes résiduelles du 1^{er} ordre (σ_I , macro)** homogènes sur un très grand nombre des domaines cristallins du matériau (plusieurs grains). Les forces internes liées à ces contraintes sont en équilibre dans chaque section et les moments liés à ces forces sont nuls autour de tout l'axe.
- b. **Contraintes résiduelles du 2^{ème} ordre (σ_{II} , méso)** sont homogènes sur de petits domaines cristallins du matériau (un grain ou une phase), les forces internes liées à ces contraintes sont en équilibre dans un assez grand nombre de grains.
- c. **Contraintes résiduelles du 3^{ème} ordre (σ_{III} , micro)** sont homogènes sur les plus petits domaines cristallins du matériau (quelques distances interatomiques). Les forces internes liées à ces contraintes sont en équilibre dans de très petits domaines. En général il est très difficile de séparer les contraintes du 2^{ème} et du 3^{ème} ordres, et le terme micro-contraintes définit la somme des deux derniers ordres. Dans le cas des matériaux réels, l'état des contraintes résiduelles résulte de la superposition des contraintes des 3 ordres, **(Peng, 2006)**. Les contraintes résiduelles peuvent être introduites volontairement dans un composant pour améliorer ses performances, ou involontairement comme résultat de procédés de fabrication. En général, les contraintes résiduelles sont essentiellement d'origine mécanique (usinage, grenailage, laminage à froid etc.), thermique (trempe, traitement au laser), thermomécanique (laminage à chaud, forgeage, soudage etc.), thermo-chimique (cémentation, nitruration, carbonitruration etc.) et chimiques (dépôts en solution aqueuse). **(Da Silva et al., 1995)** Les moyens de détermination des contraintes résiduelles utilisées actuellement sont destructifs ou semi destructifs, coûteux et complexes à mettre en œuvre, **(Zazi,2011)**.

d. Restauration dynamique :

Lorsque un métal pur ou bien un alliage est écroui par déformation à froid (ex: le laminage à froid), il subit une modification de ses propriétés microstructurales, physiques, mécaniques et chimiques, une partie du travail de déformation est conservée sous forme de contraintes internes résiduelles, ou bien sous forme d'énergie potentielle conduisant à une multiplication de défauts structuraux (ponctuels, linéaires, de surface).

La restauration est un traitement de stabilisation des matériaux, il s'effectue à une température allant de $(0,2-0,3) T_f$, (T_f est la température de fusion), ce traitement est défini comme un traitement de stabilisation, qui permet la suppression d'une partie importante des contraintes internes résiduelles et des défauts de structure sans modification apparente de la structure (les grains initiaux demeurent la base de la macrostructure), (**Zazi, 2011**).

CHAPITRE 2.

RETOUR ELASTIQUE

2.1. Retour élastique :

Une fois les opérations d'emboutissage effectuées, il est rare que la pièce produite conserve exactement la forme et les dimensions que les outils lui ont données. Le retour élastique caractérise la différence entre les dimensions finales de la pièce produite et les dimensions des outils ayant servis à sa fabrication.

Selon (Chatti, 2009; Saravanan, et al., 2018; Sun et al., 2006), il résulte des hétérogénéités de contraintes apparaissent entre les deux parois (intérieure et extérieure) de la tôle dans les zones pliées et ceci juste après décharge. Quand le métal se déforme dans la région plastique (Figure 2.1), la contrainte totale se décompose en deux parties, la partie élastique et la partie plastique. Après le repli du poinçon et la cession des contraintes, il se produit le phénomène du retour élastique. Il demeure une déformation permanente et les dimensions seront hors tolérance qui peut créer des problèmes dans l'assemblage, (Baseri et al., 2011). Ceci est dû au glissement irréversible de certains plans cristallographiques les uns par rapport aux autres, (Jiang et al., 2010). L'estimation de l'amplitude de ce retour est difficile, car elle dépend de nombreuses variables et facteurs, liés au matériau, à la géométrie de la pièce et aux conditions limites. (Meslameni & Salem, 2018)

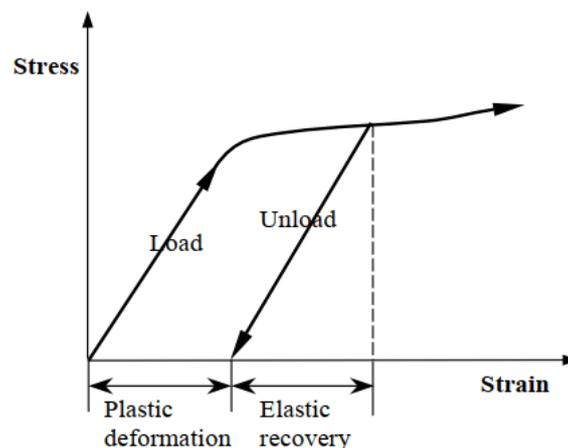


Figure 2. 1. Phénomène du retour élastique. (Delfina, 2003)

Lors de l'arrêt de la charge, ces contraintes se redistribuent pour obtenir un nouvel équilibre dans la pièce. La pièce « s'ouvre », (Figure 2.2) Ainsi, pour paramétrer le

retour élastique, les grandeurs représentatives sont soit des variations angulaires, soit des rayons de courbure, (Sniekers, 1996).

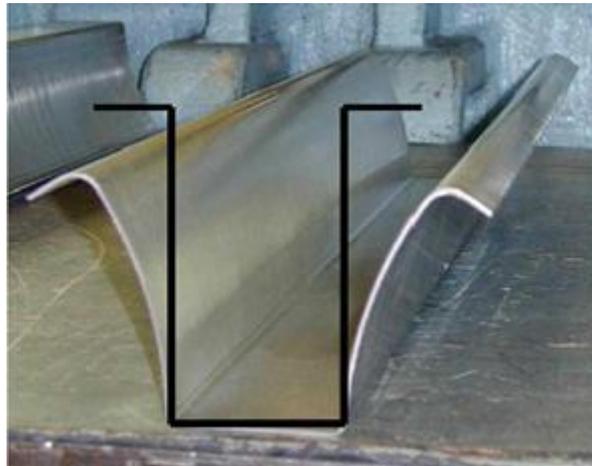


Figure 2. 2.Exemple d'ouverture d'une pièce en U après retour élastique.
(Carbonniere, 2009)

2.2. Influence des paramètres opératoires sur le retour élastique :

Durant le processus d'emboutissage on distingue trois types de paramètres influents ce procédé et par conséquent le retour élastique qui est le but de ce chapitre. Ces paramètres sont illustrés sur le **Tableau 2. 1** :

Processus	Outils	Matière
<ul style="list-style-type: none"> • Type de presse • Effort de serrage • Vitesse d'emboutissage • Température • 	<ul style="list-style-type: none"> • Rayons de matrice • Rayon poinçon • Lubrification • Profondeur d'étirage • 	<ul style="list-style-type: none"> • Limité d'élasticité • Module de Young • Ecrouissage • Anisotropie • Revêtement •

Tableau 2. 1. Paramètres influant le retour élastique. (Carbonniere, 2009)

Pour emboutir une tôle métallique, différents paramètres (physiques, techniques et métallurgiques) doivent être étudiés et pris en considération pour la réussite de sa mise en forme, ceci est très important pour la conception et la production des outils.

2.2.1. Influence des paramètres du processus sur le retour élastique :

- **Influence de la restauration dynamique :**

La restauration dynamique est un facteur qui ne peut être important que si la température est plus ou moins élevée. Ce facteur peut être pris en considération si on utilise une technique expérimentale pour échauffer les outils de formage (matrice et poinçon).

Les études de (Yanagimoto & Oyamada, 2007), sur l'acier ainsi que celles de (Zheng et al., 2016), (Figure 2.3), sur le titane ont approuvé que le retour élastique décroît d'une façon remarquable quand la température augmente plus de 750K. Cela est expliqué par le fait qu'après relâchement de l'éprouvette, l'angle du pliage fait un très petit retour élastique à cause de la ductilité et la diminution de la résistance mécanique qui sont causées par le phénomène de restauration dynamique.

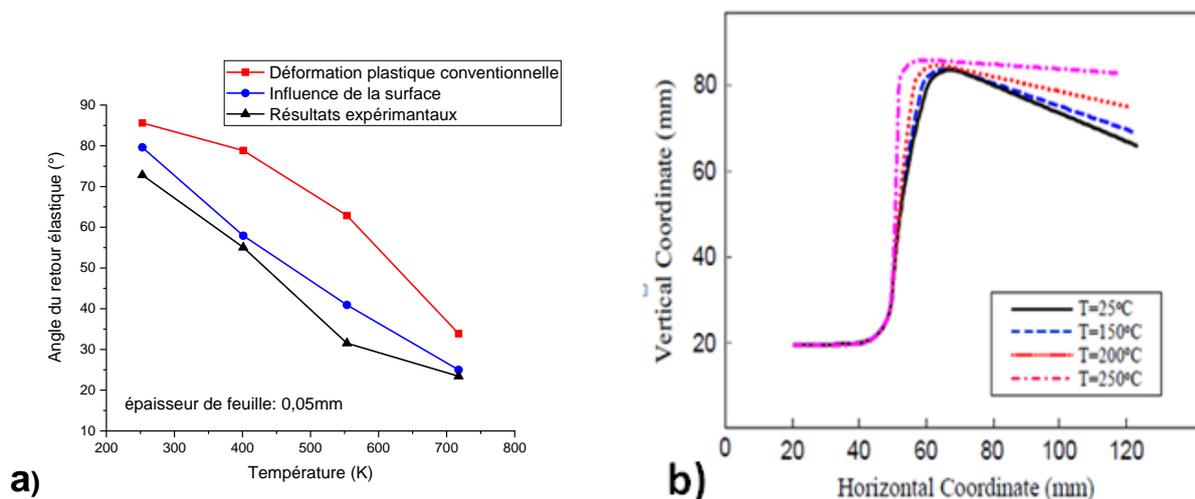


Figure 2. 3. Variation du retour élastique en fonction de la température du pliage.

a) (Zheng et al., 2016) b) (Kim & Koç, 2008)

En utilisant des éprouvettes en aluminium, (Moon et al., 2003) ont trouvé que la combinaison d'une matrice chaude et un poinçon froid peut réduire à 20% la moyenne du retour élastique, en comparaison à un pliage à température ambiante. (Figure 2.4)

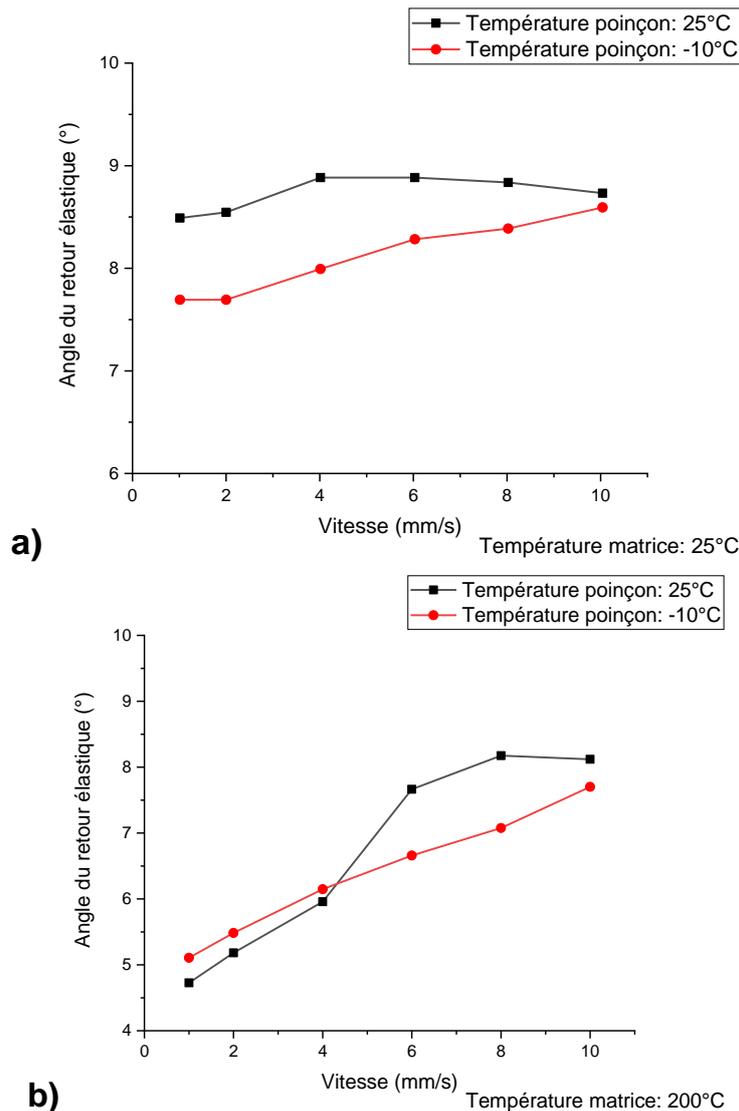


Figure 2. 4. Effet de la température des outils sur la variation du retour élastique.

(Moon et al., 2003)

(Khamneh et al., 2016) ont fait un essai de fluage à chaud sur des échantillons en aluminium trempé après chauffage à une température de 480° pendant 50min, l'étude a résulté d'un retour élastique inversement proportionnel à la température du processus, car l'augmentation de la température du processus augmente les propriétés mécaniques, mais diminue le temps qu'il prend pour que les propriétés atteignent des valeurs maximales.

- **Influence de la force de serrage (BHF) :**

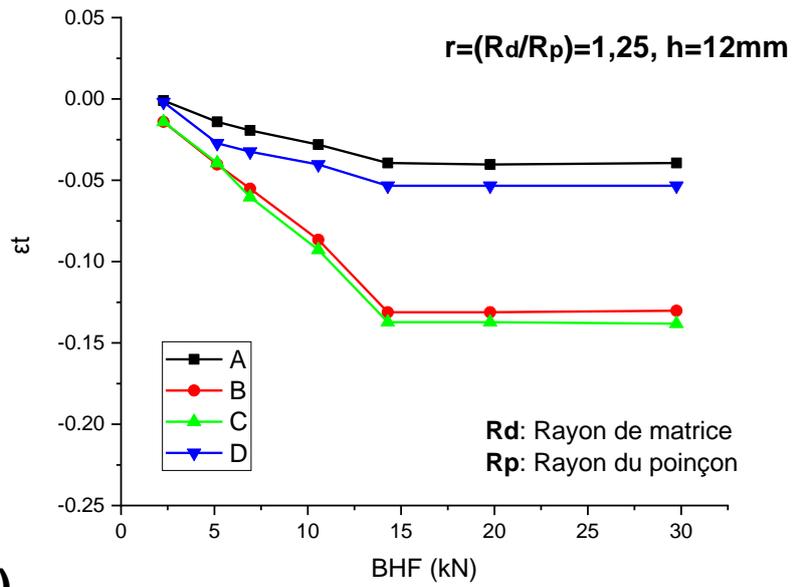
L'effort de serre-flan permet le maintien de la tôle sur la matrice tout au long de sa mise en forme. Son rôle principal reste néanmoins d'éviter le plissement et minimiser

le retour élastique du métal au cours de l'emboutissage. Si le serrage appliqué est trop faible, le plissement et le retour élastique apparaissent. Mais si le serrage est trop important, alors le flan qui s'est épaissi en raison du rétreint, se bloque entre le serre-flan et la matrice, et se déchire. (**Agrawal et al., 2007; Yoshihara et al., 2005**).

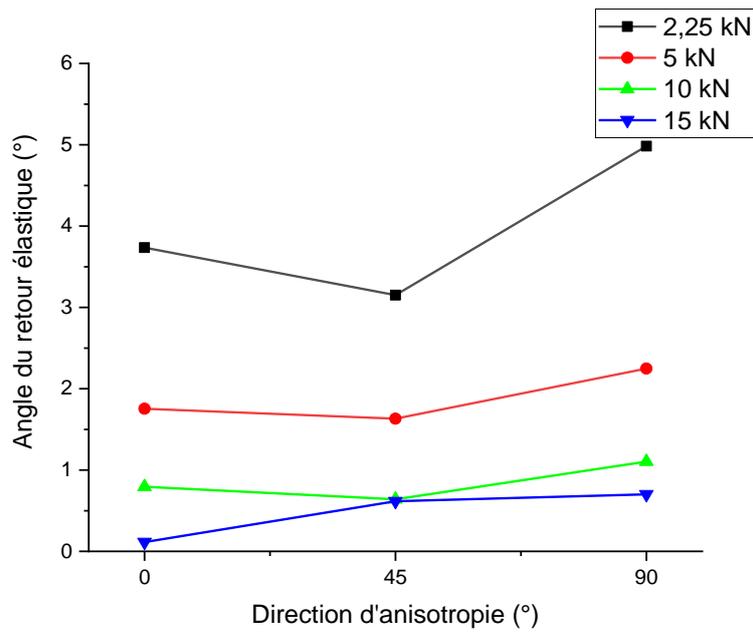
Il faut donc trouver un compromis, tout en notant que plus l'effort de serre-flan est important, plus l'effort d'emboutissage est grand. A l'heure actuelle, de nombreuses études sont menées afin d'étudier son influence sur ces phénomènes physiques.

(**Reddy et al., 1970**), en utilisant la technique de Taguchi en emboutissage profond d'aluminium, ont conclu que le paramètre le plus significatif c'est la force de serrage avec 56.98%.

La simulation faite par (**Wei et al., 2009; Papeleux & Ponthot, 2002; Anggono et al., 2011 et Spathopoulos & Stavroulakis, 2020**), en utilisant la méthode de l'élément fini, en sus des travaux expérimentaux de (**Huang et al., 2018; Ma et al., 2018; Erdin & Atmaca, 2016; Ouakdi et al., 2012; Kim & Koç, 2008; Ragai et al., 2005 et Lee & Yang, 1998**), (**Figure 2.5**), ont montré, à travers des essais réalisés sur l'aluminium et l'acier, que l'augmentation de la force de serrage de serre flan (BHF) permet la diminution du retour élastique. En effet, pour un serrage du flan plus élevé, les tensions sont plus fortes ; ce qui produit des contraintes uniformes sur toute l'épaisseur de la partie tendue et le moment de flexion sera ainsi réduit, (**Figure 2.6**). Ces observations sont aussi appuyées par les travaux réalisés par (**Chen & Koç, 2007**), sur les aciers à haute résistance.



a)



b)

Figure 2. 5. Influence de la force de serrage sur le retour élastique. (A-D représentent les différents points dans la zone de pliage).

a) (Ouakdi et al., 2012) b) (Erdin & Atmaca, 2016)

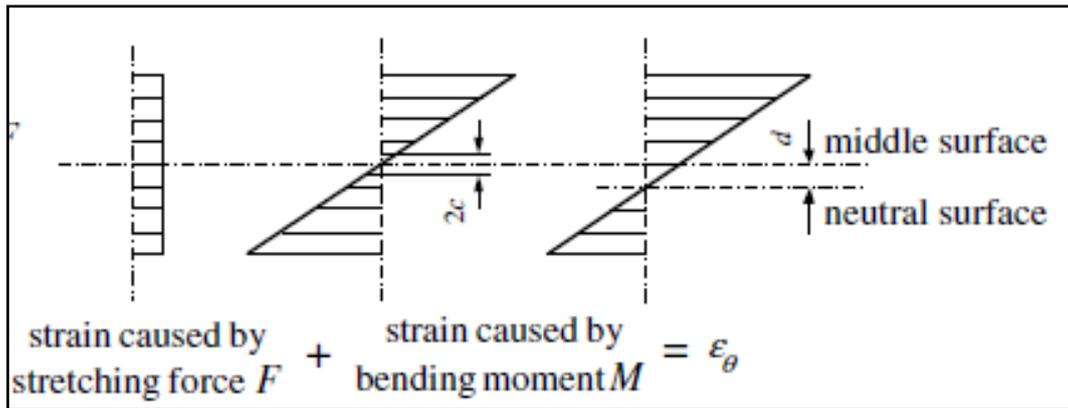


Figure 2.6. Schéma d'étirage-plierage. (D. Zhang et al., 2007)

La distribution des contraintes sur l'épaisseur sous une BHF faible est montrée sur la figure (Figure 2.7).

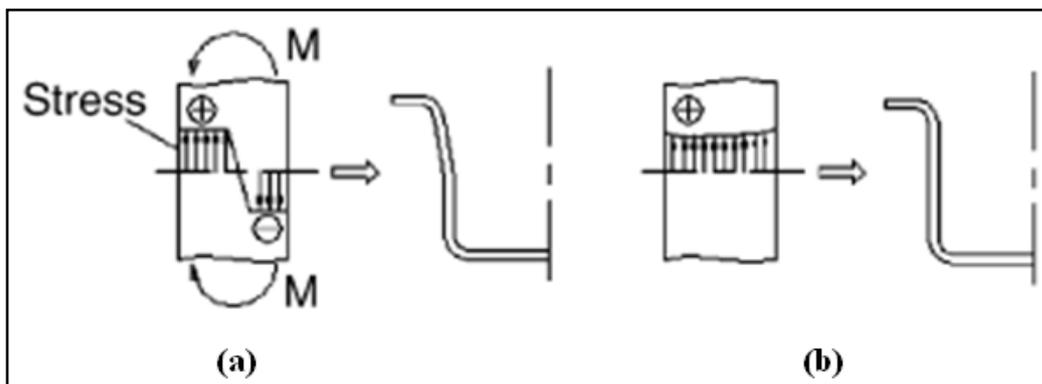
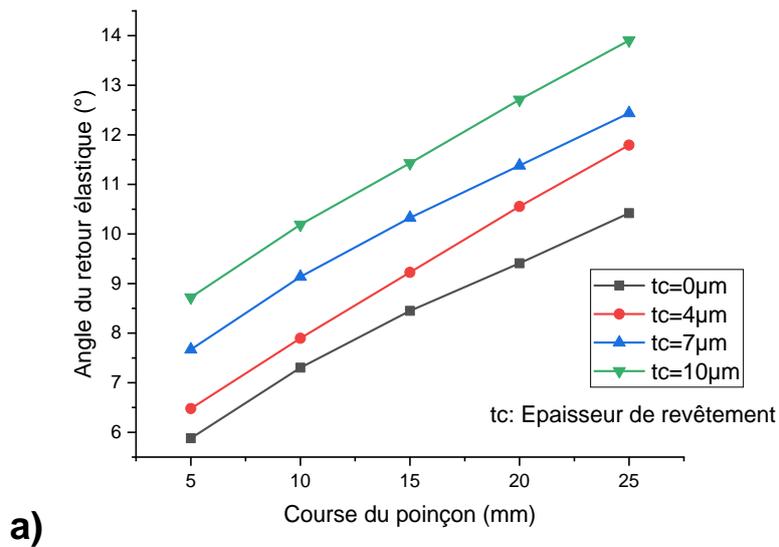


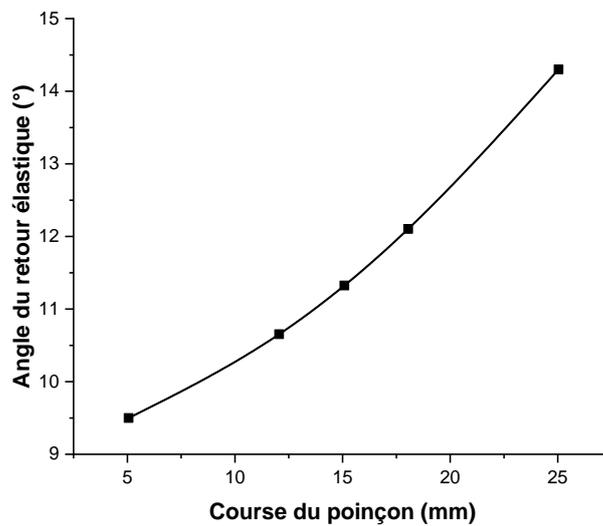
Figure 2. 7. Répartition des contraintes normales à travers l'épaisseur dans les deux cas : a) Faible BHF, (b) BHF élevée. (G. Liu et al., 2002)

- **Influence de la profondeur d'étirage :**

La course du poinçon est considérée parmi les plus importants facteurs affectant le retour élastique (Buang et al., 2015). Selon (Srinivasan et al., 2013; Vasudevan et al., 2011), (Figure 2.8), en utilisant des tôles d'acier galvanisé, l'angle du retour élastique est proportionnel à la profondeur d'étirage. Par contre les résultats de (Ouakdi et al., 2012), sur l'aluminium, ont bien montré que le retour élastique diminue d'une manière non linéaire avec la course du poinçon.



a)



b)

Figure 2. 8. Effet de la profondeur d'étirage sur le retour élastique.

a) (Vasudevan et al., 2011)

b) (Srinivasan et al., 2013)

- **Influence du frottement et de lubrification :**

Un autre paramètre influant est le coefficient de frottement. Ce dernier dépend essentiellement des matériaux en contact les uns avec les autres. Il influe sur le procédé de manière identique à elle de l'effort de serre-flan. Plus le coefficient de frottement est important, plus l'effort d'emboutissage est grand. De plus, si le coefficient atteint des valeurs trop élevées, il entraîne un risque de rayure ou de grippage de la tôle, voire même de déchirure du flan. L'une des principales difficultés

qu'on rencontre durant l'opération d'emboutissage est la maîtrise du coefficient de frottement. Pour cela, une couche de lubrifiant est déposée généralement sur chacune des faces du flan, évitant ainsi un frottement sec trop important, (Grèze, 2009). (Carden et al., 2002; Kadkhodayan & Pourhasan, 2009 et Li et al., 2002) ont procédé à des expériences pour la simulation du retour élastique. Ils ont découvert que l'augmentation du coefficient du frottement (matrice et éprouvette) provoque une diminution remarquable de l'angle du retour élastique. Ceci est montré pratiquement aussi par (Kim & Koç, 2008; Samuel, 2000; D. Zhang et al., 2007), en exerçant des essais sur l'aluminium et l'acier inoxydable. Par contre (Sulaiman et al., 2012; D. Zhang et al., 2007), ont trouvé que le frottement entre l'éprouvette et le poinçon augmente le retour élastique.

Les travaux de (Panthi et al., 2010), (Figure 2.9), ainsi que les simulations faites par (Andersson & Holmberg, 2002; Carden et al., 2002 et Palaniswamy et al., 2004), ont étudié l'effet de la lubrification entre la matrice, le poinçon et l'éprouvette en utilisant différents coefficient de frottement, ils ont constaté que le frottement a un effet négligeable sur le retour élastique.

D'autre part, (Choudhury & Ghomi, 2014), ont effectué des essais de pliage en V sur des tôle en aluminium avec et sans lubrification. Les résultats trouvés ont montré que le retour élastiques est avéré augmenter avec la lubrification.

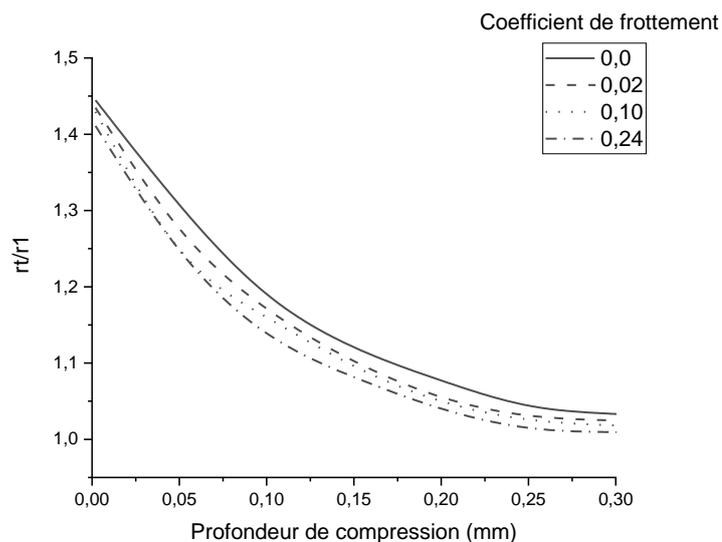


Figure 2. 9. Effet des conditions de lubrification sur le retour élastique.(Panthi et al., 2010)

- **Influence de la vitesse :**

En ce qui concerne la vitesse d'emboutissage, elle doit être choisie de manière à ce que la durée de l'emboutissage ne soit pas trop importante. Elle ne doit pas non plus être trop élevée pour éviter le risque de déchirure du flan. En général, plus la vitesse du poinçon est grande, plus l'effort d'emboutissage est grand. Mais il arrive cependant que certains matériaux présentent la particularité de s'adoucir avec la vitesse de déformation, ce qui conduit à une diminution de l'effort d'emboutissage. **(Xia et al., 2004).**

De plus, **(Azaouzi, 2007)**, a fait une série de simulation numérique avec différentes vitesses (allant de 0.1 jusqu'à 30 m/s), où il a constaté que le retour élastique diminue avec l'augmentation de la vitesse du poinçon. Ceci est expliqué par le fait que l'augmentation de la vitesse engendre une concentration de contrainte plus importante au niveau du sommet des plis. Donc, il est clair qu'il y a une plastification plus importante de la tôle avec l'augmentation de la vitesse et par conséquent le retour élastique de celle-ci devient de moins en moins important. Ces constatations sont aussi assurées par les travaux de **(Joannic, 1998)**. Par contre, **(Kim & Koç, 2008; Mori et al., 2005)**, ont montré sur une géométrie en "V", en utilisant l'aluminium, que le niveau du retour élastique est faiblement affecté par la vitesse de mise en forme. Ceci laisse à penser que les grandes déformations plastiques générées localement dans la tôle par la pointe de l'outil ne sont pas affectées par la vitesse du poinçon. **(Azaouzi, 2007).**

De plus l'étude faite par **(Laurent et al., 2018)**, en déformant à chaud des éprouvettes cylindrique en alliage d'aluminium à durcissement structurelle, montre que l'utilisation d'une faible vitesse de poinçon à température élevée est désavantageuse car la production des précipitations dynamiques entraînent le changement de la microstructure initiale, qui contribue à l'augmentation des forces de formage et du retour élastique. Ceci est en concordance avec les résultats obtenus par **(Kiswanto et al., 2017)** en faisant des essais de micro pliage « en V » des éprouvettes en acier. Néanmoins, **(Srinivasan et al., 2013, 2014)**, en effectuant des essais de pliage libre sur l'acier galvanisé, ont découvert que le retour élastique accroît avec la vitesse du poinçon. **(Figure 2.10)**. D'après **(W. Wang et al., 1996)**, la raison c'est que la vitesse

du poinçon a un effet sur le frottement. Quand elle augmente, le coefficient de frottement décroît et le retour élastique sera plus élevé, (Meinders et al., 2005). Ces résultats sont confirmés par (Kim & Koç, 2008 et Narayanasamy & Padmanabhan, 2009).

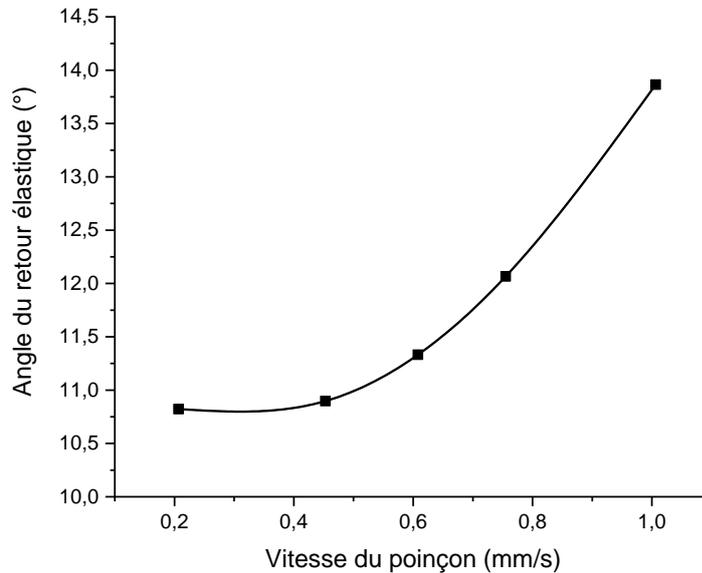


Figure 2. 10. Influence de la vitesse du poinçon sur retour élastique. (Srinivasan et al., 2013)

- **Influence du recuit :**

Afin d'étudier l'effet du recuit sur le retour élastique, (Erdin & Atmaca, 2016) ont utilisé des plaques d'aluminium cuites à 120°C pour 20min, et des plaques standards. Ils ont constaté que le recuit fait une diminution notable sur le retour élastique, (Figure 2.11). Ceci est aussi confirmé par (Z. Zhang et al., 2016). Ceci est expliqué par la diminution de la résistance mécanique et la limite élastique en particulier.

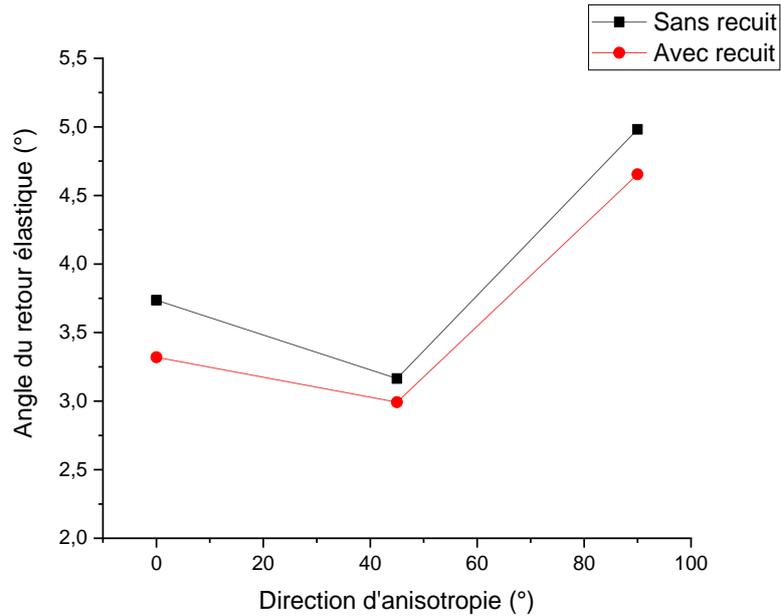


Figure 2. 11. Effet du recuit sur le comportement du retour élastique. (Erdin & Atmaca, 2016)

- **Influence du temps de maintien :**

Le temps de maintien du pliage a aussi un impact significatif sur le comportement du retour élastique. D'après les résultats de (Wan-Nawang et al., 2015), du pliage en W sur des micro échantillons (épaisseur de 50 à 100 μm) d'acier inoxydable, l'augmentation du temps de maintien diminue le retour élastique, (Figure 2.12).

Ceci est aussi conclu par (Karaağaç et al., 2020; Kiswanto et al., 2017; Nakagawa et al., 2018). Par contre, à travers l'étude pratique et la modélisation faites par (Meslameni & Salem, 2018) sur le pliage en l'air des tôles en acier inoxydable et en aluminium de différentes épaisseurs, ils ont conclu que le temps de maintien n'a pas une grande influence sur le retour élastique.

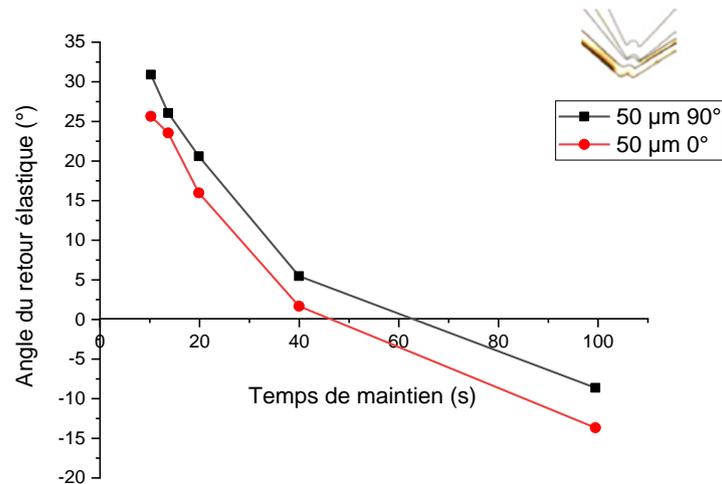


Figure 2. 12. Effet du temps de maintien sur le retour élastique. (Wan-Nawang et al., 2015)

2.2.2. Effet des propriétés du matériau sur le retour élastique :

Lors du pliage des métaux, le retour élastique est influencé par leurs propriétés mécaniques telles que le module de Young, la limite élastique, l'anisotropie et l'écrouissage cinématique (Effet Bauschinger), (Panthi et al., 2010).

- **Effet de la résistance mécanique :**

Le module de Young est un nombre qui mesure la résistance d'un objet ou d'une substance déformé élastiquement. Il est considéré comme la rigidité d'un matériau et c'est une propriété fondamentale de tous les matériaux, (Hamdi et al., 2017). L'effet du module d'Young, du comportement du matériau et de la microstructure sur le retour élastique ont été étudiés par de nombreux chercheurs dans différents processus de fabrication.

Afin de mettre en évidence l'effet du module de Young (E) sur le retour élastique, (Karanjule et al., 2018) ont fait des expériences d'étirage à froid sur des tubes en acier de différentes teneurs en carbone (faible, moyenne et haute) et les résultats obtenus convergent vers la diminution du retour élastique avec l'augmentation du module de Young. Les mêmes constatations ont été faites par (Alhammadi et al., 2018), en réalisant leurs essais sur aluminium, laiton et l'acier inoxydable, (Figure

2.13). Les auteurs ont expliqué que l'effet est dû principalement à l'aspect physique de la déformation plastique (mouvement et réarrangement des dislocations au cours de la déformation). Ceci revient principalement à la faible déformation élastique restituée après décharge dans le cas des métaux rigides.

(Azaouzi, 2007) a simulé trois matériaux ayant différentes limites d'élasticité et un même module de Young où il a constaté que l'augmentation de la résistance mécanique du matériau provoque l'augmentation de son retour élastique. Ces observations sont aussi appuyées par les travaux de (G. Wang et al., 2020), sur des éprouvettes en alliages d'aluminium sous différentes températures.

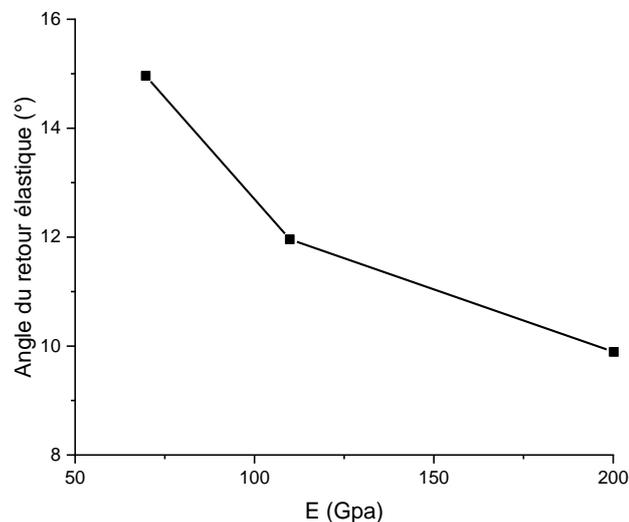


Figure 2. 13. Effet du module de Young sur le retour élastique. (Alhammadi et al., 2018)

En plus des simulations faites par certains auteurs (Fei & Hodgson, 2006; Jiang et al., 2010; Morestin & Boivin, 1996), les travaux de (Zhan et al., 2016), sur différents matériaux, ont montré que l'augmentation du module de Young provoque une diminution d'angle du retour élastique $\Delta\theta$. (Figure 2.14)

De plus les travaux de (Alhammadi et al., 2018), basés sur trois matériaux (aluminium, laiton et l'acier inoxydable), ont approuvé que l'augmentation de la limite élastique du matériau fait accroître le retour élastique, car pour une déformation donnée, la contrainte devient plus importante, ce qui corrèle parfaitement avec le l'idée du moment fléchissant, (G. Wang et al., 2020).

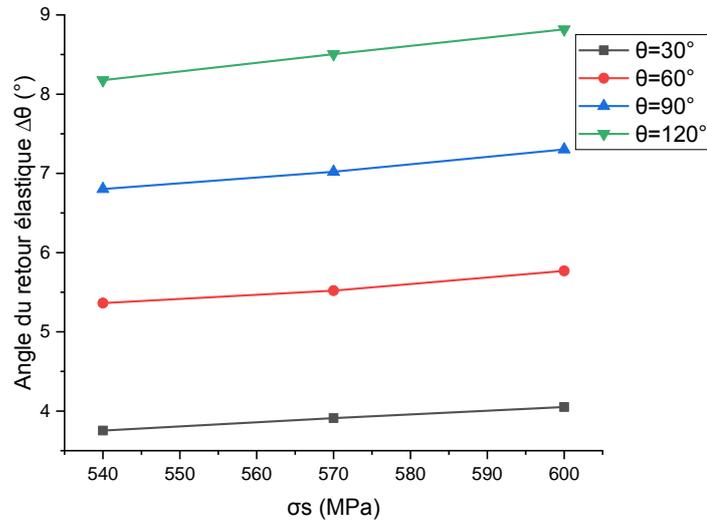


Figure 2. 14. Effet de la limite d'élasticité sur le retour élastique. (Jiang et al., 2010)

- **Influence de l'anisotropie sur le retour élastique :**

Du fait que les tôles métalliques sont obtenues généralement par le procédé de laminage, elles exhibent souvent une texture qui leur procure une anisotropie initiale de plasticité. Ainsi, l'orientation de la direction de laminage de la tôle dans le dispositif de mise en forme peut avoir une influence directe sur le retour élastique. En effet, ceci induit des différences entre les contraintes d'écoulement atteintes lors de la mise en forme et influe directement sur le retour élastique, (Almeida et al., 2020; Trzepiecinski & Lemu, 2017). Plusieurs travaux sont faits pour évaluer ce paramètre. Deux modèles ont été présentés par (Tan et al., 1995) pour décrire l'effet de l'anisotropie sur cinq matériaux dans les trois directions (0° , 45° et 90°). (Figure 2.15)

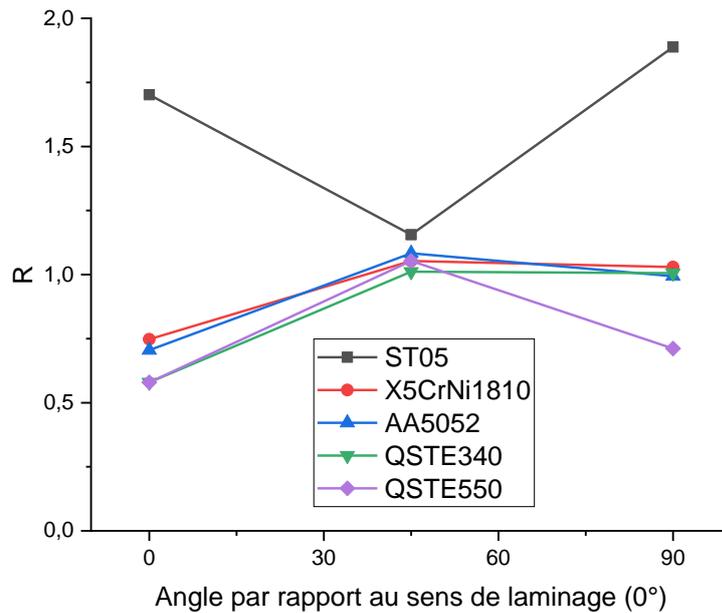


Figure 2. 15. Variation du coefficient d'anisotropie (R). (Tan et al., 1995)

De plus les travaux de (Erdin & Atmaca, 2016) sur des plaques plates en aluminium recuit et non recuit dans un essai de pliage en V des trois directions (0°, 45°, 90°), ils ont constaté que la valeur la plus élevée du retour élastique est dans la direction 90° et la plus basse est celle de 45°.

Les travaux de simulation (Verma & Haldar, 2007), ont montré que le retour élastique est plus grand pour une anisotropie supérieure ou inférieure à 1. Il est aussi petit pour les matériaux isotropes (R=1).

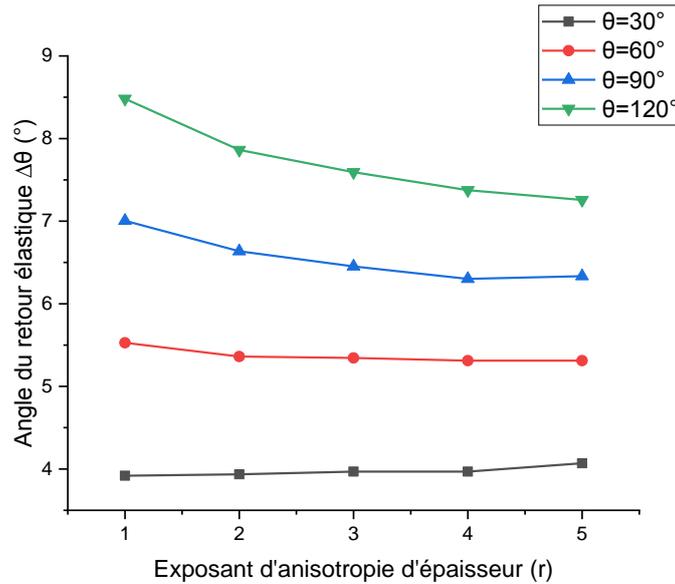


Figure 2. 16. Effet du coefficient d’anisotropie sur le retour élastique.(**Jiang et al., 2010**)

(**D. Zhang et al., 2007**), ont trouvé que le retour élastique augmente linéairement avec le coefficient de l’anisotropie r . De même, (**Jiang et al., 2010**) ont montré, à travers leurs travaux faits sur le titane, que l’angle du retour élastique $\Delta\theta$ diminue en fonction de l’augmentation du coefficient d’anisotropie r et l’angle de pliage θ . (**Figure 2.16**)

De même, les travaux expérimentaux et de simulation sur l’acier inoxydable faits par (**Azaouzi, 2007**) ont prouvé que la longueur L finale de l’embouti est la même dans les deux directions 0° et 90° , alors que l’inclinaison de celle-ci à 45° par rapport au sens de laminage engendre une réduction de la longueur de 0.05 mm.

- **Influence d’effet Bauschinger :**

En formage, les changements de trajets de déformation impliquent des mécanismes d’écrouissage beaucoup plus complexes qui influent directement sur l’état local de chaque point matériel de la pièce et ainsi sur l’état global. Un des effets de changement de trajets de déformation les plus connus est l’effet Bauschinger. Après avoir déformé du fer en traction, Bauschinger a constaté que la limite d’élasticité était atteinte en compression pour une valeur inférieure à la limite d’élasticité en traction. Ce phénomène est l’exemple typique de l’anisotropie induite par écrouissage et de

nombreux travaux ont été consacrés à sa modélisation jusqu'à nos jours, (**Figure 2.17**), (**Haddag, 2007**).

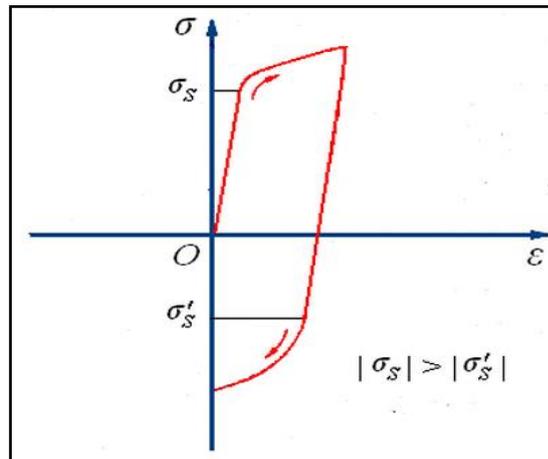


Figure 2. 17. Mise en évidence du phénomène Bauschinger (écrouissage cinématique) à travers un essai cyclique. (**Haddag, 2007**)

(**Gau & Kinzel, 2001**) ont pris en considération l'effet de Bauschinger pour prédire le retour élastique. Pour ce faire, ils ont mis au point un dispositif pour réaliser un chargement cyclique et plier l'éprouvette dans les deux sens, (**Figure 2.18**). Trois aciers et un alliage d'aluminium ont été testés. Il ressort, dans cette étude, que l'effet Bauschinger n'a que très peu d'influence sur le retour élastique dans le cas des trois aciers testés, mais il y a un effet cumulatif dans le cas de l'alliage d'aluminium. En effet, chaque inversion de chargement, la valeur du retour élastique augmente et par conséquent, l'effet Bauschinger ne peut être négligé dans l'étude des alliages d'aluminium. [B: bending. (pliage)/ BR: bending, reverse-bending). Ils ont conclu que l'influence de l'effet Bauschinger est plus significative pour l'aluminium que pour l'acier. Ceci est confirmé par les travaux pratique de (**Sumikawa et al., 2016**) et de simulation de (**Lin & Chen, 2019**). Les travaux de (**Gau & Kinzel, 2001**) renforcent cette interprétation.

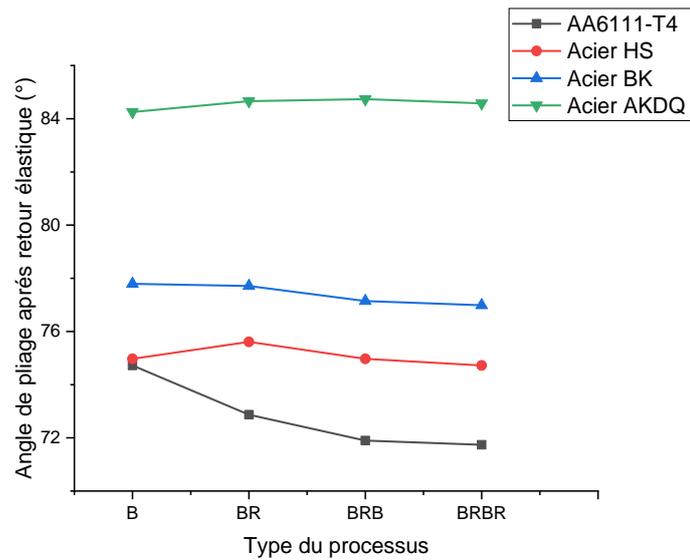


Figure 2. 18. Effet Bauschinger sur le retour élastique. (Gau & Kinzel, 2001)

La plupart des recherches précédentes faites par (Bate & Wilson, 1986; Pourboghrat et al., 1998; Z. T. Zhang & Hu, 1998) ont ignoré l'effet Bauschinger sur le retour élastique, néanmoins il a une influence significative sur les contraintes internes, quand l'échantillon subit des déformations cycliques compliquées durant le processus de pliage, (Gau & Kinzel, 2001).

- **Influence du coefficient d'érouissage :**

Dans leurs travaux de pliage sur des tubes en titane, (Zhan et al., 2016) ont constaté que l'exposant d'érouissage a un peu d'impact sur le retour élastique. Ceci est affirmé par la simulation faite par (Pham et al., 2019) sur différents type d'aluminium.

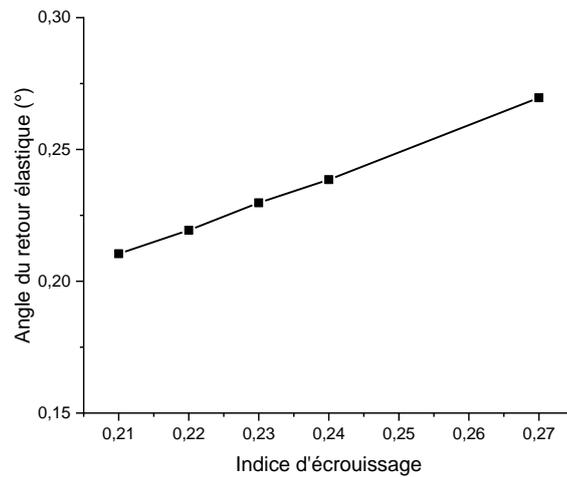
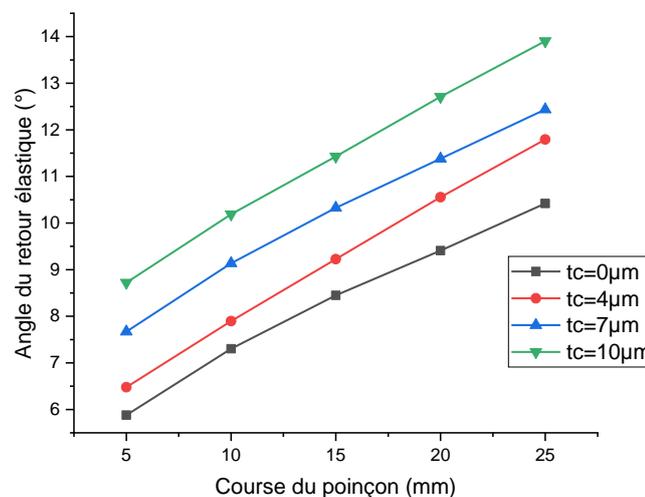


Figure 2. 19. Effet du coefficient d'écroissage sur le retour élastique. **(Pritima & Padmanabhan, 2018)**

Dans leurs travaux sur des tôles d'acier revêtues en nickel, **(Pritima et Padmanabhan, 2018; Srinivasan et al., 2013)** ont conclu que plus le coefficient d'écroissage augmente plus le retour élastique augmente aussi. Ceci est dû à l'augmentation de la résistance à la déformation plastique. **(Figure 2.19)**

- **Influence du revêtement :**

Jusqu'à nos jours, il y a peu d'études faites sur le comportement du retour élastique des tôles revêtues. **(Vasudevan et al., 2011)** ont élaboré des travaux pour montrer l'effet de ce paramètre.



a)

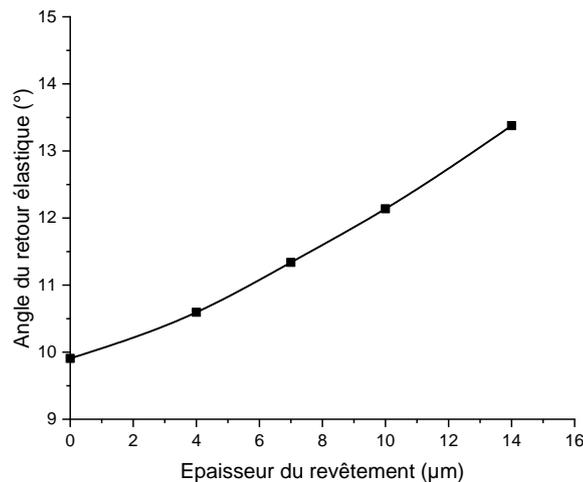


Figure 2. 20. Evolution du retour élastique en fonction de l'épaisseur du revêtement.

a) (Vasudevan et al., 2011), b) (Srinivasan et al., 2013)

En utilisant des éprouvettes en acier revêtues par le nickel, (Vasudevan et al., 2011) ont conclu que le revêtement a une forte influence sur le retour élastique. Ce dernier augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche. (Figure 2.20). Ceci est dû à l'effet du frottement du revêtement durant le processus du pliage. Plus la couche est plus épaisse plus le frottement diminue et devient la source de l'augmentation du retour élastique. Ces résultats sont aussi affirmés par les travaux de (Chan & Wang, 2001) sur le cuivre revêtu en nickel et de (Gupta & Payal, 2016; Srinivasan et al., 2013), sur l'acier galvanisé.

2.2.3. Effet de la géométrie sur le retour élastique :

La géométrie des outils constitue certainement le problème le plus important et le plus délicat à traiter.

- **Influence des dimensions de la tôle (épaisseur et largeur) :**

Le retour élastique est sensible à l'épaisseur et à la largeur de l'éprouvette. L'étude faite par (Pritima & Padmanabhan, 2018) sur des tôles en acier revêtues en nickel, ainsi que la simulation faite sur l'aluminium par (Ho et al., 2004), a montré que le retour élastique diminue avec l'augmentation de la largeur de l'éprouvette, (Figure 2.21).

Les travaux de (Leu, 2016; J. G. Liu et al., 2011; Ouakdi et al., 2012; Srinivasan & Karthik Raja, 2019; Toros et al., 2011), effectués sur l'aluminium, le cuivre, l'acier, le titane et d'autres alliages, ainsi que la méthode (basé sur un algorithme génétique), ont montré que le retour élastique est inversement proportionnel à l'épaisseur de l'éprouvette, (Figure 2.22). En effet, plus l'épaisseur augmente, plus les fibres extérieures s'éloignent de la ligne moyenne, le pliage de ces fibres provoque des déformations importantes et le retour élastique est moindre.

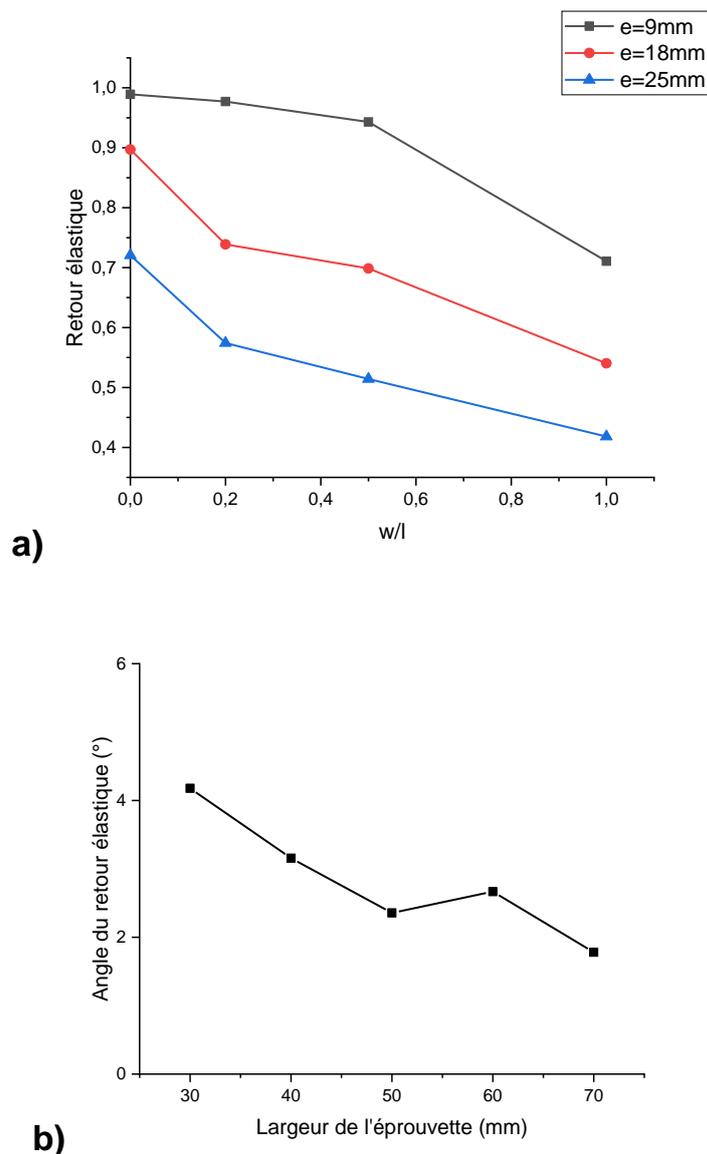


Figure 2. 21. a) Effet du rapport Largeur/longueur sur le retour élastique. (Ho et al., 2004)

b) Effet de La largeur sur le retour élastique. (Pritima & Padmanabhan, 2018)

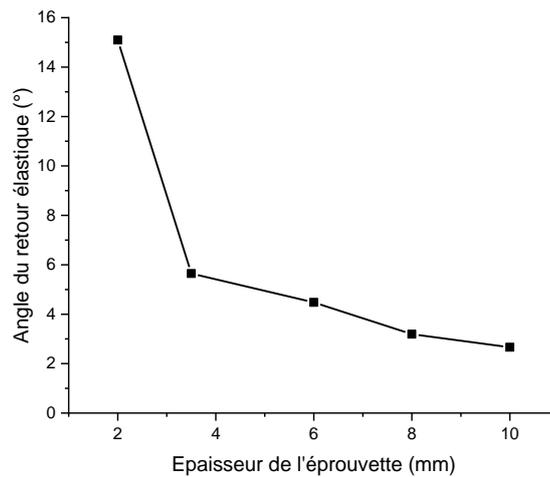


Figure 2. 22. Effet de l'épaisseur de la tôle sur le retour élastique, (Alhammadi et al., 2018)

- **Influence des dimensions des outillages (Rayon matrice/poinçon, jeu) :**

Avant toute considération géométrique, l'aspect de la pièce après fabrication est une préoccupation importante. Les outils ne doivent ni marquer la pièce ni l'endommager ou la fragiliser. Dès lors, l'état de surface des outils est primordial. Si l'on considère maintenant l'aspect géométrique, un mauvais dimensionnement des outils entraîne une mauvaise géométrie finale de la pièce emboutie : forme inadéquate, dimensions hors côtes, etc. Cependant, les défauts de géométrie des pièces conçues ne reposent pas uniquement sur le type du matériau utilisé, mais aussi sur le dimensionnement des outils (Grèze, 2009).

les travaux de (Alhammadi et al., 2018; Ankėnas & Barauskas, 2006; Srinivasan et al., 2013; Srinivasan & Karthik Raja, 2019), sur des différents matériaux, montrent qu'une large ouverture de matrice entraîne plus de retour élastique qu'en une plus petite, (Figure 2.23). L'augmentation de cette ouverture implique un moment fléchissant plus élevé est par conséquent un retour élastique élevé.

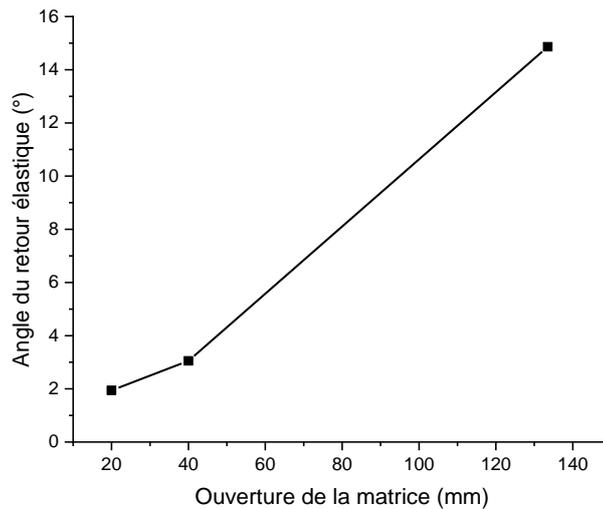


Figure 2. 23. Effet de l’ouverture d la matrice sur le retour élastique.(**Alhammad** **et al., 2018**)

Les travaux de (**Ouakdi et al., 2012**), ont montré que le retour élastique $\Delta\theta$ est négatif (spring-go) lorsque le rayon de courbure (R_d/R_p) est grand. De même, (**Verma & Haldar, 2007**), ont montré que, en diminuant plus le rayon de pliage, il y ‘aura une augmentation de l’effort de pliage, une croissance de la déformation plastique et une diminution du retour élastique. Il a été montré, aussi dans certains travaux de (**Bahloul, 2002; Srinivasan et al., 2013; Suyuti et al., 2019**), réalisés sur l’acier, que la diminution du rayons de poinçon, et celle du rayon de courbure de la matrice font une diminution importante du le retour élastique.

A travers ses travaux expérimentaux et de simulation, faits sur l’aluminium dans une direction de 90° par rapport au sens de laminage, (**Bahloul, 2002**), a montré que plus le rayon de courbure de la matrice et du poinçon diminue plus le retour élastique diminue. Ceci peut être expliqué par le fait qu’avec la force verticale appliquée par le poinçon, une grande déformation nécessite un rayon de courbure réduit pour déformer l’éprouvette. De plus un rayon du poinçon plus élevé implique une répartition de force sur une grande zone élastique, ce qui augmente le retour élastique. (**Srinivasan et al., 2013**). Cela est aussi confirmé par les travaux de (**Srinivasan & Karthik Raja, 2019**),

réalisés sur le cuivre et l'aluminium, de (Srinivasan et al., 2013) pratiqués sur l'acier galvanisé et ceux de (Buang et al., 2015) testés sur l'acier inoxydable, (Figure 2.24).

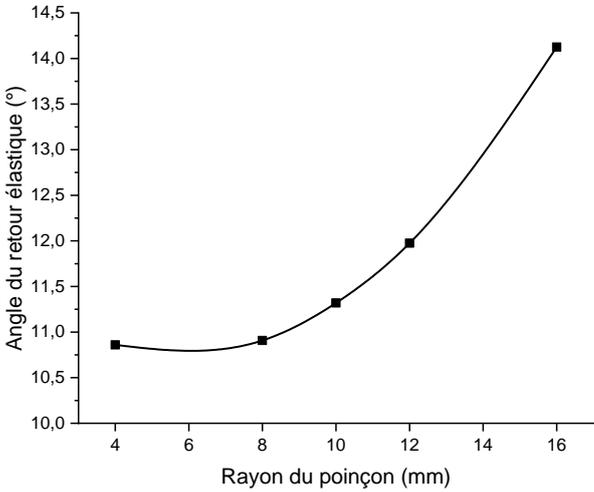


Figure 2. 24. Variation du retour élastique en fonction du rayon du poinçon. (Srinivasan et al., 2013)

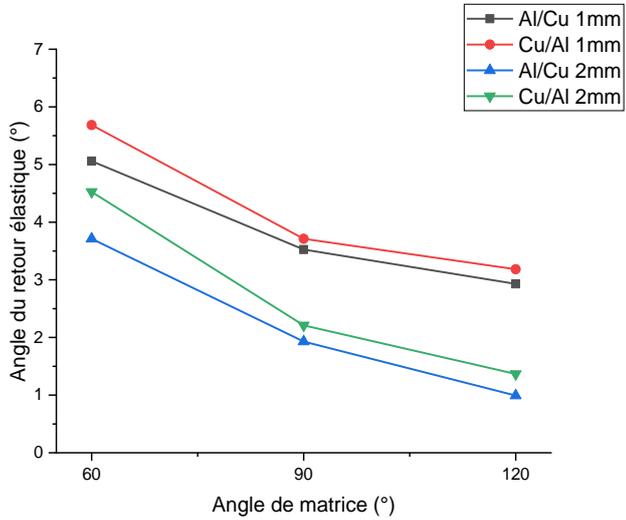


Figure 2. 25. Influence de l'écart de la matrice sur le retour élastique. (Srinivasan & Karthik Raja, 2019)

Par contre (Bruni et al., 2007; Ouakdi et al., 2012), ont montré qu'un grand rayon de courbure de la matrice diminue sensiblement le retour élastique notamment si un faible effort de serrage est appliqué. (Figure 2.25, 2.26)

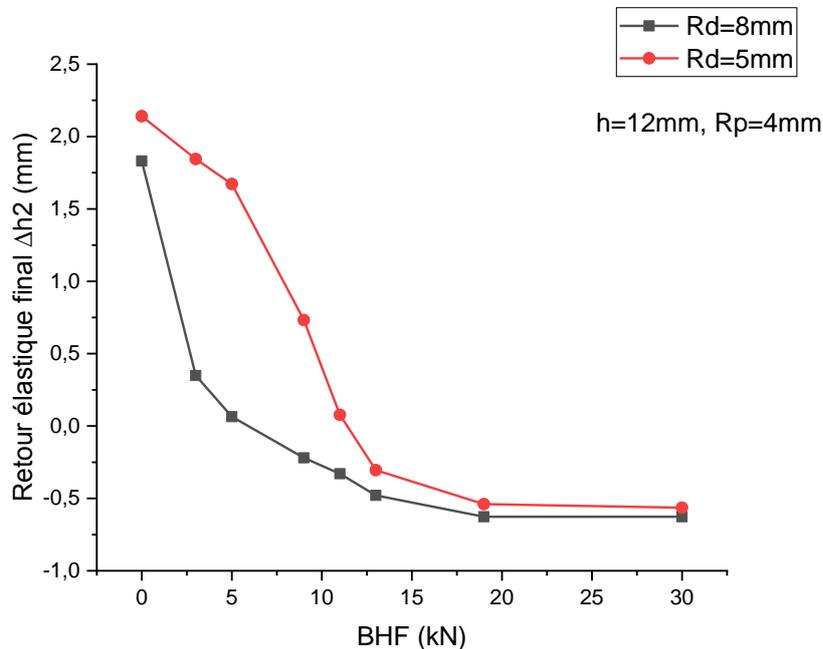


Figure 2. 26. Variation du retour élastique en fonction du rayon de la matrice. (Ouakdi et al., 2012)

2.3. Simulation numérique du retour élastique :

En étudiant l'influence des différents facteurs sur le retour élastique, plusieurs chercheurs ont tenté d'obtenir une compréhension de base de ce phénomène en développant des modèles analytique et numérique.

La simulation numérique des procédés de fabrication et de mise en forme des composants mécaniques est aujourd'hui une réalité industrielle. Elle constitue ce qui convient d'appeler le formage virtuel. Plusieurs codes éléments finis généraux ou dédiés à la mise en forme (outils métiers) sont aujourd'hui mis à la disposition de l'ingénieur pour lui permettre de mettre au point et d'optimiser virtuellement les gammes de fabrication. Ces codes, avec l'aide de maillage adaptatif, permettent de simuler aisément divers phénomènes thermomécaniques ; transfert thermique, écoulement plastique écrouissable en grandes déformations, contact-frottement, retour

élastique.... Cependant, d'autres phénomènes jouant un rôle important lors du formage par grandes déformations plastiques ne sont pas encore pris en compte dans les codes industriels de calcul des structures. **(Rajhi et al., 2009)**

(Xia et al., 2004) ont constaté par exemple que les simulations de déchargement pour l'évaluation du retour élastique sont très sensibles aux paramètres numériques tels que le type et la taille des éléments du maillage, le nombre de points d'intégration,..etc,**(Maati, 2016)**.

En utilisant les technologies de simulation améliorée (méthode des plans d'expériences et méthode des éléments finis), **(Chen & Koç, 2007)** ont mené diverses études sur le formage des pièces de structure automobile en tenant compte de l'écroutissage cinématique et de l'effet Bauschinger, les résultats de simulation ont montré une amélioration significative de la prédiction du retour élastique par rapport à l'expérience. **(Tabourot et al., 2013)** ont montré que les incertitudes liées à la caractérisation du comportement élastique peuvent entraîner des variations significatives des résultats de simulations numériques. **(Hosford & Caddell, 2007)** ont exigé l'introduction des phénomènes relativement fins pour disposer d'une description qui délimite cette incertitude. Il y' a alors un intérêt à accroître le nombre de variables des modèles pour raffiner la description du comportement élastoplastique des tôles minces métalliques, **(Meslameni & Salem, 2018)**.

De nombreuses recherches expérimentales ont été faites pour mieux comprendre les phénomènes mécaniques influençant le retour élastique. Ces essais ont permis d'enrichir les bases de données numériques et de développer des modèles de comportement plus performants pour la description du retour élastique. Cependant, certains paramètres numériques, comme le type d'élément fini ou le nombre de points d'intégration dans l'épaisseur, ne dépendent pas à priori du comportement du matériau mais ils ont une réelle influence sur la prédiction du retour élastique.

- **Influence du Nombre de points d'intégration dans l'épaisseur :**

Depuis plusieurs années, de nombreuses études de simulation ont été développés pour déterminer le nombre de points d'intégration à placer dans l'épaisseur de la tôle. Ce nombre est un facteur très important pour le calcul du retour élastique, **(Wagoner &**

Li, 2007). Dans la littérature, on trouve que la précision du calcul du retour élastique diminue considérablement, lorsque le nombre de points d'intégration est inférieur à 5.

(Andersson & Holmberg, 2002) ont varié le nombre de points d'intégration à travers l'épaisseur de (3, 5, 7 et 10). Ceci résulte d'un petit ou négligeable effet sur le retour élastique.

D'après **(Arwidson, 2005)**, lorsque le nombre de points d'intégration varie de 5 à 9 (pour les éléments de coque), le résultat conduit à une meilleure concordance avec la pratique. Ceci s'accorde aussi avec les résultats d'autres auteurs.

En 2004, **(Xu et al., 2004)** ont étudié la sensibilité du retour élastique aux différents facteurs introduits lors de la simulation du procédé de pliage en U en dynamique explicite. Comme exemple, ils ont analysé l'influence du nombre de points d'intégration à travers l'épaisseur et de la taille des éléments et la vitesse du poinçon sur l'exactitude et l'efficacité du retour élastique simulé. Ils ont démontré à travers les simulations numériques que le retour élastique est sensible au nombre de points d'intégration dans l'épaisseur lorsqu'on utilise des éléments coques. **(Vorkov et al., 2014)** ont effectué un certain nombre de calculs pour obtenir l'influence du nombre de points d'intégration sur la précision de la solution. Les résultats de ces calculs sont indiqués à la **figure 2. 27**. La solution converge rapidement au résultat expérimental pour des points d'intégration compris entre 7 à 15 (intervalle caractérisé par des erreurs inférieures à 5%). La différence totale d'erreur est d'environ 0,8 %. Toutefois, le temps de calcul pour le modèle de coque est inférieur à 3 minutes, et le calcul peut être effectué même avec 31 points d'intégration sans augmentation énorme du temps de calcul.

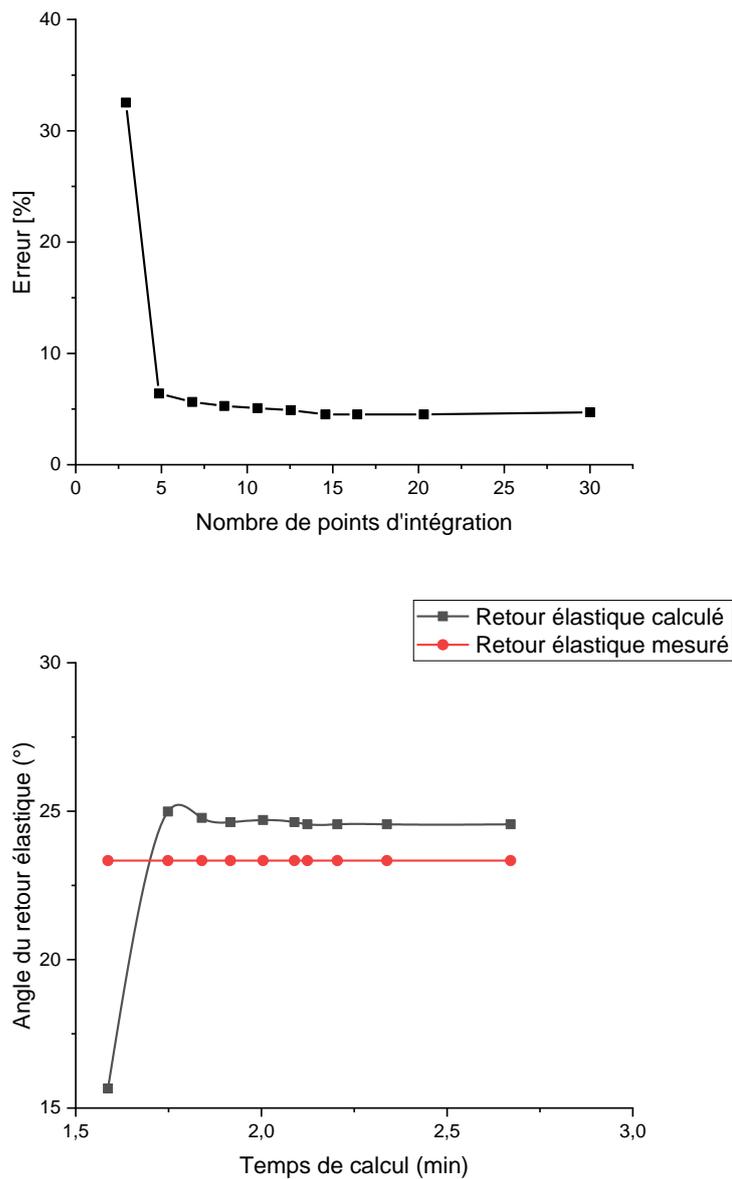


Figure 2. 27. Effet du nombre d'intégration et le temps de calcul sur le retour élastique,(Vorkov et al., 2014)

De plus, (Trzepiecinski & Lemu, 2017) ont effectué une analyse numérique d'un pliage en l'aire en V avec la méthode d'élément finis (FEM) basé sur le programme d'ABAQUS. Les auteurs ont utilisé deux types d'intégration (Gauss' et Simpson). Ceci résulte qu'un nombre de points d'intégration plus élevé décroît le coefficient du retour élastique K . (Figure 2.28)

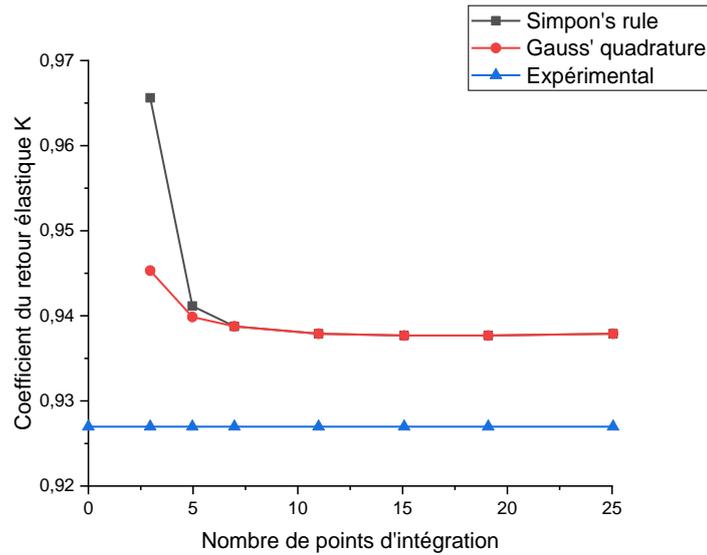


Figure 2. 28. Effet du nombre de points d'intégration sur la valeur du coefficient du retour élastique pour Gauss'et Simpono. (Trzepiecinski & Lemu, 2017)

- **Influence du Nombre des éléments à travers l'épaisseur :**

Un autre paramètre numérique a une influence non négligeable sur le retour élastique, il s'agit du nombre d'éléments finis à travers l'épaisseur de la pièce. Chaque élément fini possède un point d'intégration de Gauss au milieu du quadrangle. Cela veut dire que le nombre des points d'intégration correspond bien au nombre des éléments finis à travers l'épaisseur. Selon (Vorkov et al., 2014), l'augmentation du nombre d'éléments finis à travers l'épaisseur augmente considérablement le temps de calcul, **Figure 2.29**, cependant la solution converge en fonction de la valeur mesurée du retour élastique. Pour chaque nombre, le temps de calcul approximatif a été mesuré et représenté avec l'angle du retour élastique calculé. L'angle de rappel réel est donné à titre de référence.

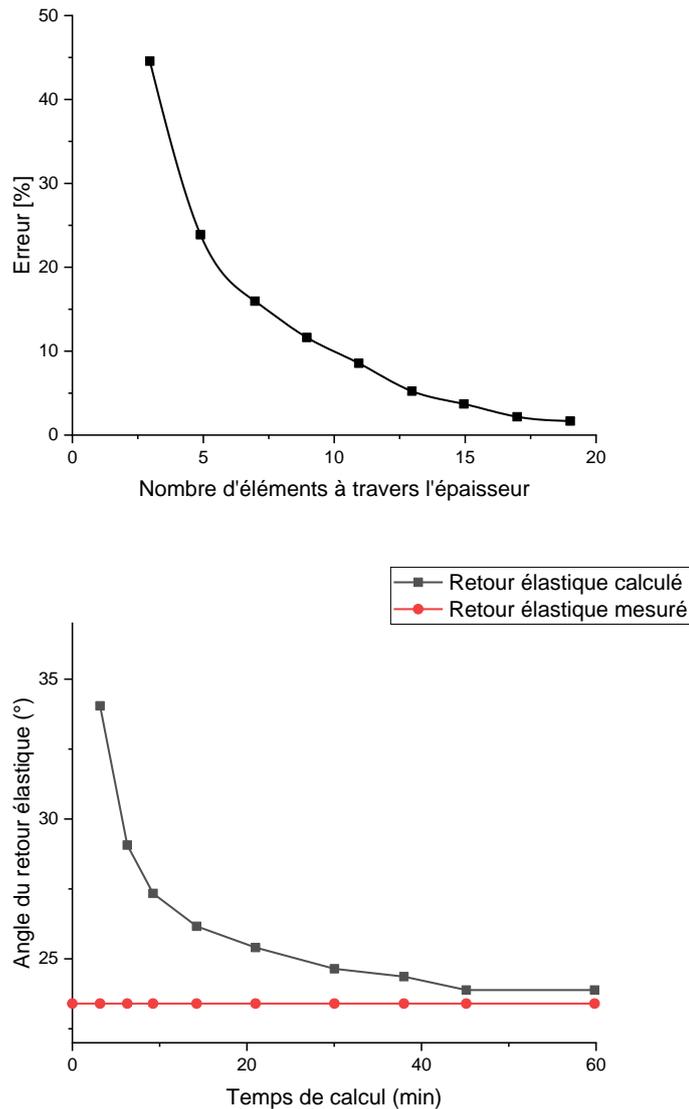


Figure 2. 29. Effet du nombre d'éléments finis à travers l'épaisseur sur le retour élastique.(Vorkov et al., 2014)

- **Influence du maillage et de la taille d'éléments finis :**

La taille de mail est un paramètre qui a une importance toute particulière dans le cas de modélisations dans lesquelles il y a du contact entre la pièce et les outils de mise en forme. Afin d'obtenir un calcul correcte de l'état de contrainte de déformation, le maillage doit être étudié pour que le nombre d'éléments en contact avec le rayon de la matrice soit suffisant, (Grèze, 2009).

D'après ces études effectuées sur la sensibilité des résultats à la taille de l'élément fini, (Azaouzi, 2007) a considéré qu'une taille égale à peu près à la moitié de l'épaisseur

initiale de la tôle permet d'obtenir une bonne précision des résultats. De plus, il a remarqué que le retour élastique devient de plus en plus important au fur et à mesure que la taille des éléments finis diminue. Un maillage plus fin permet mieux de prendre en compte les effets de tension et de flexion dans l'embouti et par conséquent on aura une prédiction plus précise du retour élastique. Selon **(Li et al., 1999)**, une meilleure prédiction du retour élastique est obtenue si la simulation est faite avec une méthode de calcul implicite.

En utilisant le code d'INSA de Lyon, **(Carbonniere, 2009)** a simulé un essai en U en utilisant trois types d'éléments finis (S3,DKT12 et Q442 γ) avec différents maillages pour quatre tailles d'éléments finis : 1, 2, 3 et 4 mm. Il a constaté que le retour élastique reste quasiment constant et est très proche de la réalité quelle que soit la taille du maillage pour les éléments S3 et DKT12. Avec l'élément Q442 γ , le retour élastique se dégrade fortement lorsque le maillage devient grossier. **(Figure 2.30)**

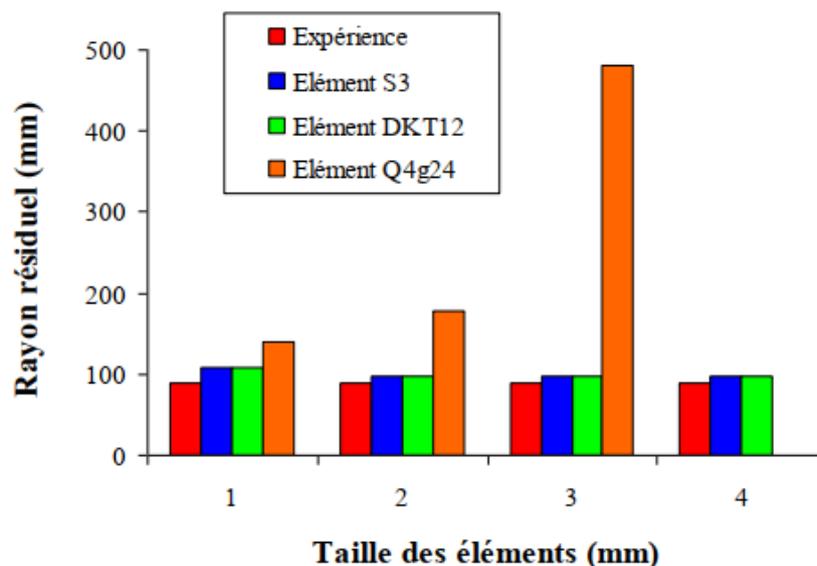


Figure 2. 30. Comparaison expérimentale/numérique du rayon résiduel avec différents éléments pour différentes tailles de maille.**(Carbonniere, 2009)**

- **Influence du type d'éléments finis :**

D'après l'étude théorique faite par **(Burchitz, 2005)**, Il existe deux procédures de solution principales pour la simulation du formage de la tôle : dynamique explicite et statique implicite.

La sensibilité du retour élastique à ces procédures a été étudiée par plusieurs chercheurs. La procédure habituelle consiste à utiliser la méthode explicite dynamique pour la simulation du formage et la méthode implicite pour l'analyse de retour élastique. De plus, de bons résultats de simulation du retour élastique ont été rapportés après avoir utilisé l'analyse (explicite seulement ou implicite seulement) pour les étapes de formation et de déchargement. Alors pour **(Li et al., 1999)**, une meilleure prédiction du retour élastique est obtenue si la simulation est faite avec une méthode de calcul implicite.

CHAPITRE 3.

**TRAITEMENTS DE SURFACE,
LUBRIFICATION ET LEURS EFFETS
SUR LES PROCEDES DE FORMAGE**

3.1. Introduction :

Grâce aux réponses toujours plus précises qu'ils apportent à des situations industrielles toujours plus diversifiées et exigeantes, les traitements de surfaces sont devenus incontournables et la solution la plus efficace pour la compensation des problèmes tribologiques. Les revêtements modifient les systèmes tribologiques, améliorent la résistance à l'usure des surfaces et prolongent la durée de vie des composants concernés. Au cours des dernières décennies, de nombreux revêtements et méthodes de dépôt ont été développés avec succès et utilisés pour réduire la friction ou / et pour protéger les surfaces contre les dommages dans les systèmes mécaniques. **(Luo, 2009)**

À ces fonctions essentielles, il faut en ajouter un certain nombre d'autres qui conditionnent l'utilisation des pièces dans l'environnement où elles vont travailler :

- l'amélioration de l'aspect
- l'amélioration des caractéristiques de glissement
- la soudabilité
- l'isolation aux rayonnements
- l'anti-oxydation à haute température

et qui doivent être résolues si l'on veut atteindre les objectifs de fiabilité et de rentabilité exigés par l'industrie, **(Guillais, 2008)**.

3.2. Préparation des surfaces :

Pour tous les concepts industriels et du point de vue physique, la surface des produits constitue l'interface entre la pièce et son environnement. Elle est soumise à de multiples sollicitations qui peuvent être d'ordre :

- Mécanique : résistance à l'usure, au choc et à la déformation.
- Chimique : résistance à la corrosion électrochimique ou à haute température.
- Optique, thermique, électrique et électronique. **(Normand, 2001; Terrat & Cartier, 2000)**. **(Figure 3.1)**

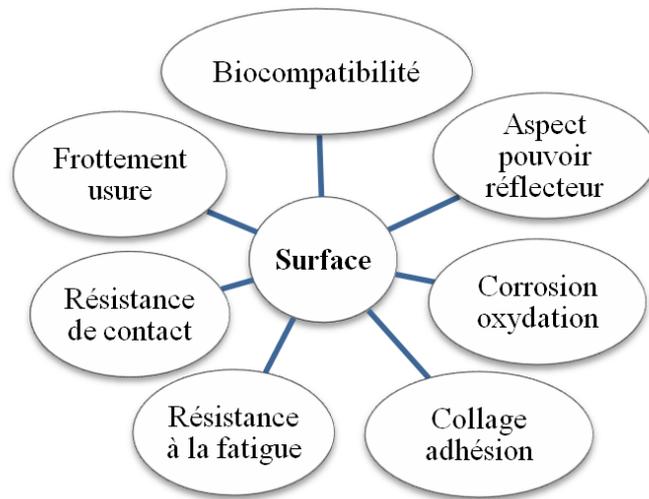


Figure 3. 1. Les propriétés fonctionnelles d'une surface. (Lévêque, 2013)

3.3. Revêtements :

le revêtement est un terme qui désigne toute couche de métal obtenue sur une surface par un procédé de recouvrement, tel que la surface du métal les modifications du matériau de base à l'interface négligeable et la couche superficielle du métal résultat de ce traitement est presque homogène pour que la qualité de la couche soit définie par son épaisseur.

3.4. Diversité des revêtements et traitements de surface :

De nos jours, il existe plusieurs types de traitements de surface appliqués par différentes techniques en vue de la protection des surfaces fonctionnelles, (Figure 3.2). Deux grandes classes d'opérations doivent être distinguées suivant que la surface modifiée résulte d'un procédé de traitement dans la masse (traitement de surface) ou d'un matériau d'apport appliqué sur un substrat (revêtement).

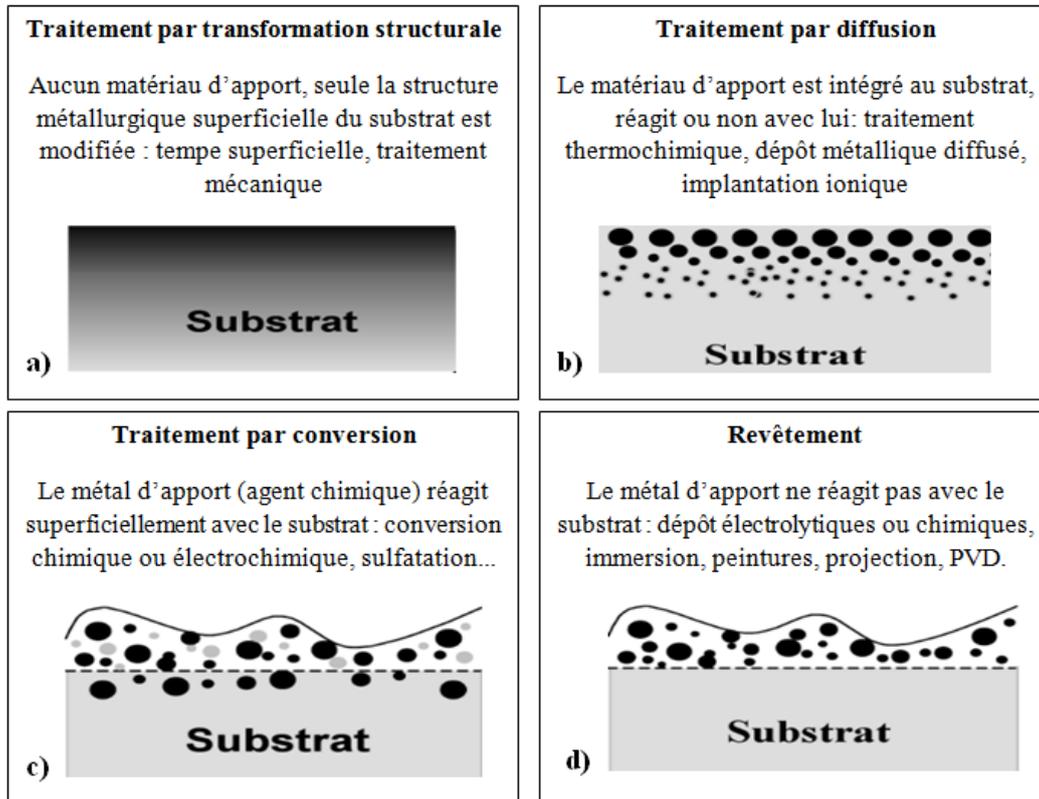


Figure 3. 2. Principaux modes d'élaboration revêtement-traitement de surface d'après Guillaus.(Normand, 2001)

3.5. L'industrie des traitements de surfaces :

3.5.1. Structure du marché en fonction des besoins :

Une surface est faite pour satisfaire des propriétés d'emploi données. C'est la raison pour laquelle on est souvent amené à pratiquer un (ou des) traitement pour anoblir la surface et lui conférer une fonctionnalité spécifique. **(Figure 3.3)**

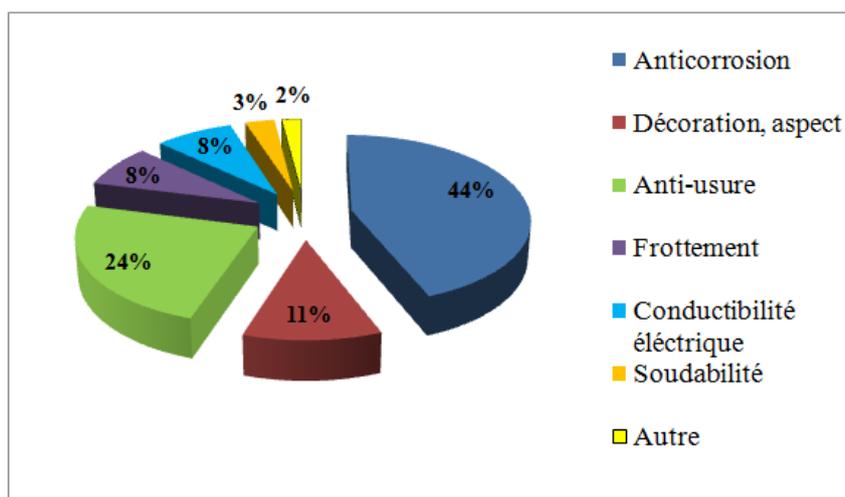


Figure 3. 3. Domaines d'utilisation des revêtements et traitements de surface.(**EL Kacimi & Ebn Touhami, 2013**)

3.6. Classification des revêtements :

Le revêtement est l'une des techniques de traitement de surface la plus utilisée, il consiste à déposer une couche (métallique ou plastique de quelques Å à quelques microns) sur une surface, obtenue par un procédé de recouvrement, tel que la surface de la matière d'apport soit assez homogène et les modifications du matériau de base à l'interface négligeable pour que la qualité de la couche soit définie par une épaisseur. Cela signifie qu'un revêtement ne réagit pas (ou presque pas) avec le substrat, et que la séparation entre le substrat et le dépôt est bien nette. **Figure 3.2**

Cette technique constitue actuellement un des moyens essentiels pour améliorer les propriétés fonctionnelles des métaux : résistance à la corrosion, à l'oxydation, à la fatigue sous toutes ses formes (fatigue mécanique, fatigue thermomécanique, fatigue de surface), au frottement et à l'usure sans oublier l'aspect, (**Lévêque, 2013**).

Les qualités recherchées peuvent être très différentes selon l'application considérée et la destination de l'utilisation de la pièce.

Actuellement, l'industrie présente de différents procédés et techniques de dépôt de revêtement, parmi lesquels on distingue les revêtements non métalliques (minéraux ou organiques), et les revêtements métalliques, comme indique le schéma de la **figure 3.4**.

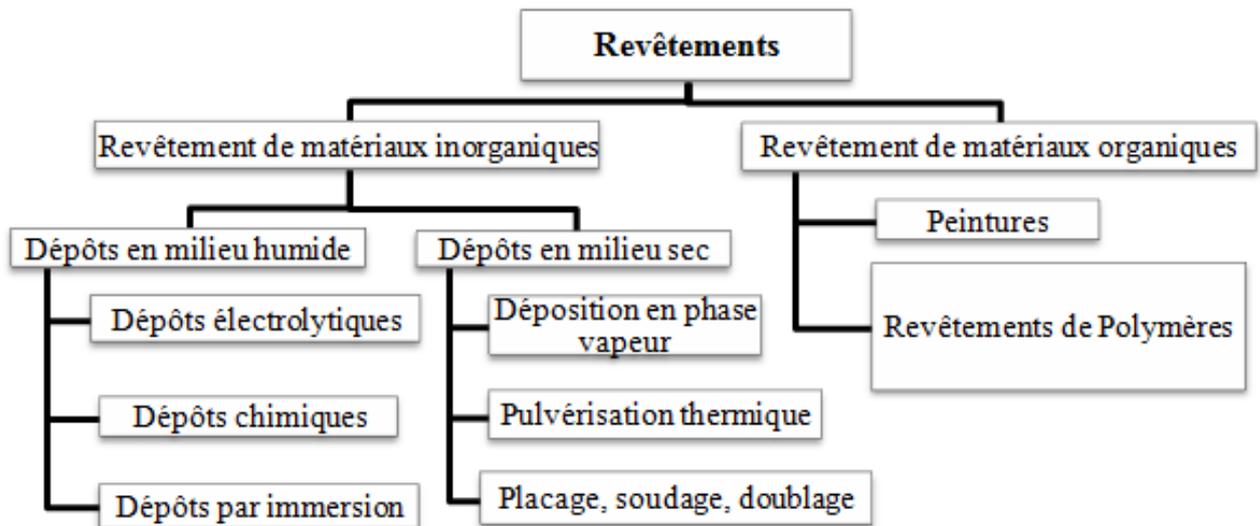


Figure 3. 4. Classification des revêtements. (Ashby et al., 2001)

3.6.1. Revêtements non métalliques :

Les revêtements non métalliques (organiques ou minéraux), forment une barrière plus ou moins imperméable entre le matériau et le milieu. Ils doivent posséder certaines caractéristiques comme la grande adhérence, la stabilité chimique, l'élasticité élevées et la bonne résistance à l'usure. Ils représentent les peintures, les revêtements plastiques (thermoplastiques ou thermodurcissables : Rilsan, Téflon, etc.), les graisses, l'émail, etc.

3.6.2. Revêtements métalliques :

Un revêtement métallique est une couche de métal sur une surface, obtenue par un procédé de recouvrement tel que la structure du métal d'apport soit assez homogène et les modifications du matériau de base à l'interface assez négligeables, pour que la qualité de la couche soit définie par une épaisseur. En outre leur effet anti-corrosion, remplissent souvent une fonction décorative. On les utilise aussi comme protection contre l'usure. Il existe deux types de revêtements métalliques ceux plus nobles que le substrat cathodique et ceux moins nobles que le substrat anodique. Le métal protecteur étant :

- électro-déposé : Zn, Cd, Ni, Sn, Cr...
- déposé par immersion dans un bain fondu : Zn, Sn, Pb, Al,
- déposé par voie chimique : Ni,
- plaqué : acier inoxydable, Ni, Ti..., (Chevalier, 2012; Colombié, 2008)

- **Revêtement anodique :**

Dans le cas des aciers, le zinc, le cadmium et l'aluminium forment des revêtements moins nobles que l'acier. Dans le cas d'un revêtement de zinc par exemple, l'acier constitue la cathode de la pile, c'est donc le zinc qui est attaqué. L'acier est protégé cathodiquement par le zinc qui est moins noble que lui (protection cathodique), (Bensaada et al., 2015)

- **Revêtement cathodique :**

Dans le cas d'un revêtement de plomb, d'étain, de nickel, de cuivre, d'argent, d'or, de rhodium ou de platine, on dit qu'ils forment des revêtements plus nobles, donc constituent la cathode et l'acier est considéré comme l'anode. Dans le cas du revêtement de l'acier par le nickel, l'acier constitue l'anode de la pile et le nickel la cathode, (Bensaada et al., 2015).

En réalité, un métal qui ne s'oxyde pas spontanément à l'air est dit « noble ». On peut donc classer les métaux du plus noble au moins noble :

Au > Ag > Cu > Pb > Sn > Ni > Cd > Fe > Cr > Zn > Al > Ti > Mg > Na > Li

a. Techniques de revêtement métallique en milieu humide:

Selon le type de matériau à protéger et le matériau de revêtement envisagé, différentes techniques de mise en place peuvent être utilisées. On va concentrer sur le dépôt électrolytique.

- **Dépôt chimique :**

C'est un dépôt d'un métal ou d'un alliage par réaction chimique ou électrochimique à la surface du métal de base dans un bain approprié sans source de courant électrique extérieur. Exemples : dépôts chimiques de nickel, de cuivre, d'étain, d'argent

- **Dépôt par immersion dans des métaux fondus :**

L'opération consiste à immerger le métal à protéger dans un bain de métal protecteur fondu, il se forme un dépôt dont l'épaisseur dépend de la durée d'immersion. Pour l'électrolyse, le dépôt présente toujours une certaine porosité, on est donc conduit à effectuer des dépôts d'épaisseur suffisante pour qu'il n'y ait pas continuité entre les

ports. Cette méthode est utilisée en particulier pour le dépôt galvanisation, étamage, plombage, aluminage.

- **Dépôt électrolytique :**

C'est une opération qui consiste à recouvrir un métal de base par décomposition chimique de certaines substances en fusion ou en solution, produite par un courant électrique continu. Comme: l'argentage, chromage, cuivrage, étamage, nickelage, zingage...etc. L'ensemble des techniques des dépôts électrolytiques est aujourd'hui désigné par le terme général (galvanoplastie).

b. Définitions :

- **L'électrodéposition :** C'est l'obtention d'un dépôt ou d'une pièce mince par électrolyse
- **L'électrolyse :** C'est l'opération qui décompose une solution par un courant électrique, utilisée pour déposer une ou plusieurs couches métalliques sur une surface métallique.
- **L'électrolyte :** C'est le bain d'électrodéposition, une substance conductrice contient des ions mobiles. Elle se compose de : H_2O + source de M^{n+} + sel de conduite + additifs. Les additifs ont pour améliorer les qualités (brillance, dureté, adhérence...) du revêtement réalisé.

c. Principe du dépôt électrolytique :

Le principe de réalisation d'un dépôt électrolytique est simple : Les deux électrodes (anode (soluble ou insoluble) et cathode) sont plongées dans un liquide conducteur choisi en fonction du dépôt désiré (électrolyte). Le métal à déposer (joue le rôle d'une anode) et la pièce à recouvrir (joue le rôle d'une cathode) sont placés dans un bac à électrolyse où circule un courant électrique (utilisé comme force motrice), (**Figure 3.5**).

Par l'application d'un courant, le courant passe à travers la solution.

- Lorsque l'anode est **insoluble**, la composition du bain varie de façon continue au cours de l'électrolyse, la substance dissoute est décomposée en deux groupements simples ou complexes de charge électrique opposée appelés ions. Par passage du courant, il y a transport des ions vers les électrodes ; l'ion positif se dirige vers la

cathode, d'où son nom de cation (ion hydrogène, ions métalliques, etc.) et l'ion négatif ou anion vers l'anode. Arrivés aux électrodes, ces ions se déchargent et s'y déposent. (Kayas, 2020)

- Lorsque l'anode est **soluble**, le métal de l'anode s'oxyde sous forme d'ions dans l'électrolyte, qui migrent vers la cathode où ils sont réduits à nouveau sous forme métallique pour former un dépôt métallique solide à la cathode.

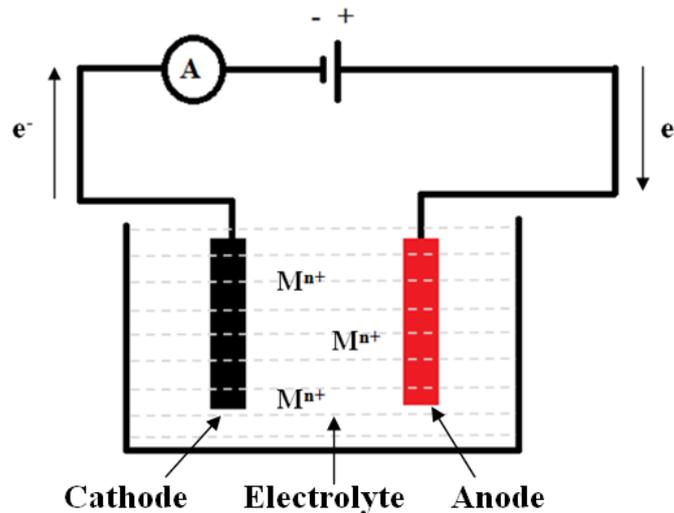


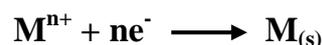
Figure 3. 5. Schéma d'une cellule électrolytique

Les électrons assurant la réaction de réduction proviennent de la cathode. Au cours de la déposition, il faut veiller à ce que la source des ions métalliques à réduire soit en quantité suffisante dans l'électrolyte. Le phénomène est régi par les équations suivantes :

A l'anode : l'oxydation de l'anode conduit à la libération d'ions métalliques en solution permettant ainsi d'éviter l'appauvrissement de la solution en cations métalliques au cours du temps



A la cathode: se produit la réduction de l'ion métallique suivant la demi-réaction



Où **M** est le métal considéré

Le procédé d'électrodéposition peut se décomposer en plusieurs étapes, qui sont illustrées sur la **Figure 3.6.**

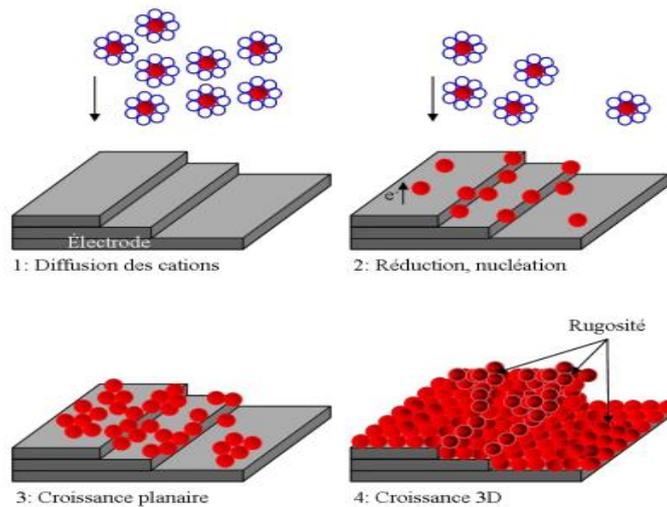


Figure 3. 6. Schéma des principales étapes du procédé d'électrodéposition.

(Allemand, 2011)

- **Pourquoi la Préparation de surface ?**

La préparation de surface est une phase indispensable avant le traitement proprement dit. Avant de subir un traitement de surface, un matériau métallique est généralement oxydé et couvert d'huiles ou de graisses. Il faut donc procéder à un nettoyage préalable afin d'obtenir une interface physiquement et chimiquement propre, apte à recevoir convenablement le traitement de surface, (Depetris-wery & Ayedi, 2007). La qualité du traitement ou du revêtement, son adhérence notamment, dépend essentiellement de la qualité de la préparation de la surface, (Chevalier, 2012). La qualité du nettoyage est donc déterminante et doit agir sur l'ensemble des souillures présentes à la surface du métal, (Figure 3.7). Ces souillures sont les suivantes :

- **La graisse et les huiles** : éliminées par dégraissage.
- **La rouille et calamine** : elles font partie des oxydes, ces derniers s'éliminent par décapage.

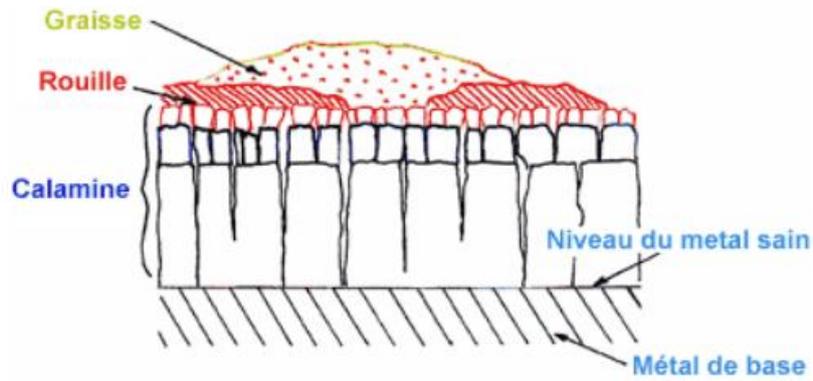


Figure 3. 7. Etat de surface d'une pièce non préparée.(Michaud, 2020)

d. La ligne de traitement de surface :

Une ligne de traitements de surface est une succession des opérations de dégraissage et décapage séparés par des rinçages. (Figure 3.8)

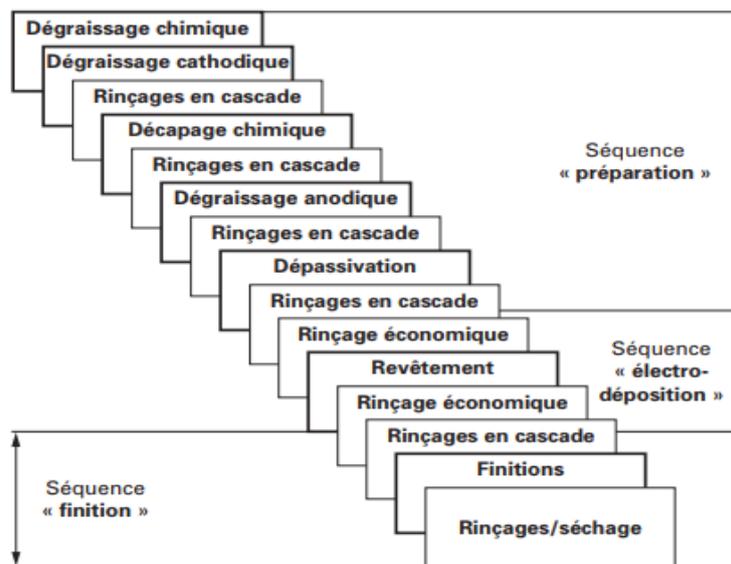


Figure 3. 8. Exemple type d'une ligne industrielle de traitement de surface (revêtement électrolytique).(Depetris-wery & Ayedi, 2007)

- **Le dégraissage :**

Le dégraissage est un traitement chimique ou électrolytique, Il a pour rôle de rendre la surface physiquement propre afin d'assurer le bon déroulement des opérations ultérieures et par là même, de garantir la qualité du produit fini. Il doit éliminer les

souillures organiques : graisses, huiles, cires, pâtes, ainsi que les particules minérales ou métalliques qui y sont incluses. **(Deruelle, 2008)**

- **Le décapage :**

Le dégraissage laisse la pièce exempte de traces d'huiles ou de corps gras mais après cette opération, il reste encore des oxydes en surface, de la calamine, des sulfures... . Pour cela on va vers le décapage pour éliminer les oxydes présents à la surface du métal, sans attaquer celui-ci. Il peut s'agir d'un décapage avant traitement ou avant revêtement métallique ou organique (peinture, plastique). Ce décapage devra être d'excellente qualité et il peut être de façon chimique, électrochimique, mécanique ou thermique. **(Benaben & Durut, 2008)**

- **Le rinçage :**

Après émergence d'un bain de traitement, le matériau métallique traité est recouvert d'un film de solution « concentrée » dont l'épaisseur dépend des caractéristiques de la solution (concentration, viscosité, température, tension superficielle ...) mais également de celles du matériau (forme géométrique, rugosité ...).

Cette opération a pour but d'arrêter la réaction et de débarrasser les produits chimiques présents à la surface de la pièce afin d'éviter la pollution des bains. Il joue le rôle d'une barrière antipollution entre deux opérations consécutives.

e. Les différents dépôts électrolytiques :

- **Le nickelage électrolytique :**

Actuellement, le nickelage est un processus de finition de surface polyvalent et important sur le plan commercial, il est souvent utilisé pour son aspect décoratif, fonctionnel et sa résistance à la corrosion. Il améliore l'aspect, les performances et augmente la durée de vie des métaux.

Le nickelage électrolytique est similaire aux autres procédés d'électrodéposition utilisant des anodes métalliques solubles. Dans l'électrolyte le courant circule entre deux électrodes immergées dans une solution aqueuse conductrice de sels de nickel.

L'écoulement du courant continu amène l'une des électrodes (l'anode) à dissoudre et l'autre électrode (la cathode) à être recouvert de nickel. Le nickel en solution est présent sous forme d'ions divalents chargés positivement (Ni^{2+}). Quand le courant circule, les ions positifs réagissent avec deux électrons ($2e^-$) et sont convertis en nickel métallique (Ni^0) à la surface de la cathode. L'inverse se produit à l'anode où le nickel métallique est dissous pour former des ions divalents chargés positivement qui entrent dans la solution, (**Di Bari, 2011**). Ceci s'effectue suivant les équations suivantes :

- $Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2e^-$ (Dissolution du nickel à l'anode)
- $Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$ (Dépôt du nickel à la cathode)
- **Le chromage électrolytique :**

Le chromage est un procédé de revêtement par électrolyse permettant de déposer du chrome métallique sur les surfaces à traiter pour leur accorder les propriétés de ce métal. Il existe le chromage décoratif et le chromage dur, pour lesquelles, la couche déposée se diffère par son épaisseur, (**Tableau 3.1**)

Procédés électrolytiques	Chromage décor [5]	Dépôt électrolytique sur une sous couche [CrO ₃] = 250 g/L [H ₂ SO ₄] = 2,5 g/L Différents additifs T°C = 30 et 60 °C Jc = 10 et 30 A/dm ² Anode en Plomb	Sous couche de nickel Epaisseur : 0,1 à 10µm Plus ou moins fissurés (selon température et densité de courant) Couleurs : gris métallique Aspect : Brillant	Brillance Résistance à la corrosion avec sous couche de nickel
	Chromage Dur [5]	[CrO ₃] = 250 g/L [H ₂ SO ₄] = 2,5 g/L T°C = 30 et 70°C Jc = 30 et 60 A/dm ²	Epaisseur : 10 à 500µm Microfissuré Microdureté : 800 à 1000 HV Couleur : gris Aspect : la brillance va dépendre des conditions opératoires	Dureté élevée Résistance à l'usure Faible coefficient de frottement Bonne résistance à la corrosion (en milieu huilé)

Tableau 3. 1. Différents procédés de traitement de surface à base de chrome. (**Del Pianta, 2017**)

- **L'Électrozingage :**

Le zingage électrolytique occupe une position dominante dans le domaine de la galvanoplastie par le tonnage de métal électro-déposé. Il est appliqué pour résister d'abord à la corrosion avant toute considération esthétique ou fonctionnelle. C'est un

procédé simple d'utilisation et économiquement compétitif. Il consiste à provoquer, par électrolyse, le dépôt d'une fine couche de zinc sur un objet métallique afin de le protéger. Le zinc n'est pas un métal inoxydable, mais son oxyde (ZnO), a la propriété d'être imperméable à l'air. Une fois oxydé en surface, il protégera donc les couches internes de zinc et bien entendu le métal recouvert. Il est réalisé par électrolyse d'une solution aqueuse contenant des sels métalliques et non métalliques dont la nature dépend de l'application envisagée et des propriétés souhaitées du revêtement. La grande variété des caractéristiques des dépôts obtenus suivant la formulation et les conditions de dépôt rend ce revêtement anticorrosion incontournable dans de nombreuses applications : tôles destinées à l'automobile ou à l'électroménager, de la vis M3 jusqu'au chariot de supermarché.

- **L'étamage:**

L'étamage est un procédé de traitement de surface qui consiste à appliquer une couche d'étain sur une pièce métallique. Il est réalisable en phase aqueuse, soit par voie électrolytique, soit par voie chimique. L'étamage électrolytique est aujourd'hui largement utilisé pour le revêtement de demi-produits sous forme de tôle mince d'acier, en vue de fabriquer principalement des conteneurs alimentaires, tels que boîtes de conserve, canettes de boissons diverses, (Corvée, 1999). Les revêtements d'étain résistent bien aux acides organiques des milieux alimentaires et, comme les sels d'étain ne sont pas toxiques, l'étamage est particulièrement indiqué pour la protection des métaux dans les industries alimentaires. Ces revêtements possèdent, en outre, une assez bonne résistance à la corrosion atmosphérique.

L'étamage facilite l'assemblage par soudure aux alliages étain-plomb, ce qui justifie leur emploi avant soudage ou avant application d'alliages antifricition.(Endlé & Aubrun, 1989)

3.6.3. Traitements thermochimiques :

Il existe toute une gamme de traitements thermochimiques dans la mesure que ceux-ci s'effectuent avec changement de la composition chimique d'une certaine épaisseur de la couche superficielle afin de donner des propriétés particulières aux pièces traitées.

On les définit comme suit: « traitement consistant à chauffer une pièce jusqu'à la température donnée dans un milieu solide, liquide ou gazeux, qui dégage facilement l'élément de diffusion à l'état atomique, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir. Un traitement thermochimique change non seulement la structure de l'acier, mais aussi la composition chimique des couches superficielles, ce qui permet de modifier dans de plus larges limites ses propriétés. »

En clair, lorsqu'on a besoin d'une dureté superficielle plus élevée et une ductilité encore plus grande, on utilise les traitements thermochimiques. Cette modification se fait par l'insertion de divers gaz en fonction des types de traitements désirés : carbone, azote, ammoniac, oxyde de carbone, méthane, etc

Il existe plusieurs traitements thermochimiques de l'acier :

- La cémentation.
- La nitruration.
- La cyanuration et carbonisation.
- La métallisation par cémentation.

On s'intéresse dans cette partie par la cémentation

- **La cémentation :**

Aujourd'hui la technique de cémentation a été toutefois très largement utilisée dans l'industrie de série, notamment l'industrie automobile.

Le traitement de cémentation appliqué aux aciers est un traitement thermochimique superficiel d'enrichissement en carbone réalisé en phase austénitique (généralement 900 à 980°C). Il est destiné à obtenir après refroidissement un durcissement superficiel par trempe. Appliquée sur un acier à faible teneur en carbone, la cémentation est un moyen de durcissement superficiel permettant d'assurer une forte mise en précontrainte de compression de la surface et une bonne résistance à l'usure grâce à l'obtention d'une martensite à haute teneur en carbone, tout en garantissant à cœur une bonne ductilité grâce à l'obtention d'une martensite à bas carbone (la transformation du cœur sera, selon la trempabilité de l'alliage et la section de la pièce à traiter, totale

ou partielle). Les profondeurs de diffusion du carbone seront pratiquement limitées à **4 μm** pour des raisons économiques évidentes. Les fortes profondeurs seront réservées aux pièces de mécanique lourde, les profondeurs les plus courantes variant de 0,3 à 2,5 mm.

3.7. Lubrification des tôles en formage :

L'utilisation des lubrifiants pendant et après la mise en forme est très variée. Le lubrifiant doit être présent à l'interface métal-outil. Il a de diverses fonctions parmi eux :

- Diminution des forces et des énergies de mise en forme qui entraîne une réduction du coefficient de frottement.
- Refroidissement de l'outillage
- Réduire l'échauffement du métal
- Obtention d'un état de surface désiré : ordinaire ou brillant, non rayé, lisse, ...
- Minimiser l'usure de l'outillage et augmente leur durée de vie. (**Felder, 2006**)

CHAPITRE 4.
PROCEDURE EXPERIMENTALE

4.1. Introduction :

Le présent chapitre contient des procédures expérimentales des essais d'étirage-plier en V, en U et des préparations des échantillons. La mesure expérimentale du retour élastique a été effectuée en prenant en considération quelques paramètres qui ont un impact direct sur le retour élastique. Parmi ces paramètres, on retiendra surtout : le revêtement, la profondeur d'étirage, la force de serrage, la limite élastique, le module de Young et la rugosité. Ce travail expérimental constitue donc une base de données pour exécuter une simulation numérique du procédé considéré.

4.2. Préparation des échantillons :

4.2.1. Choix du matériau :

Le matériau faisant l'objet de ce travail est un acier non allié de types C5 et C6, conçus pour la fabrication d'électroménager (cuisinières, machine à laver, lave-vaisselle et chauffages à gaz), et elles sont obtenues par l'Usine SONARIC de Mila et Brandt de Sétif.

Dans le cadre des essais de laboratoire, la détermination de la composition chimique par spectrométrie d'émission optique à source étincelle est un essai rapide et simple à mettre en œuvre pour connaître la nature d'une pièce. Cette technique est par ailleurs très couramment utilisée dans l'industrie. La spectrométrie étincelle repose sur le principe de l'émission d'énergie lumineuse produite par un échantillon métallique à la surface duquel on applique un courant.

Cette technique est effectuée au niveau du laboratoire BCR de Ain El Kebira en utilisant des échantillons rectangulaires d'acier C5 et C6 de 128*10mm de dimensions, dont leur compositions chimiques sont représentés dans le **Tableau 4.1**.

Acier C5										
Eléments	C	Si	Mn	Cr	Cu	Al	Ni	B	N	Fe
(%)	0.05	0.01	0.16	0.01	0.10	0.03	0.03	0.002	0.017	99.61
Acier C6										
Eléments	C	Si	Mn	Cr	Cu	Al	Ni	P	S	Fe
(%)	0.062	0.015	0.2	0.03	0.07	0.07	0.02	0.007	0.015	99.48

Tableau 4. 1. Composition chimique des aciers C5 et C6 respectivement

4.2.2. Les traitements de surface:

a. L'électrodéposition :

Afin de mettre en évidence l'effet du revêtement sur le retour élastique, nous avons électrodéposé différentes couches métalliques sur les échantillons d'acier C5. Les dépôts du Nickel et de Chrome sont effectués à l'usine BCR de Ain El Kebira, alors que ceux d'Etain et de Zinc sont réalisés au niveau d'usine AMC de El Eulma. Les étapes et les paramètres du processus d'électrodéposition sont représentés dans les **figures 4.1, 4.2 et 4.3**. Chaque revêtement est caractérisé par un bain spécifique dont ses paramètres sont illustrés dans le **Tableau 4.2**.

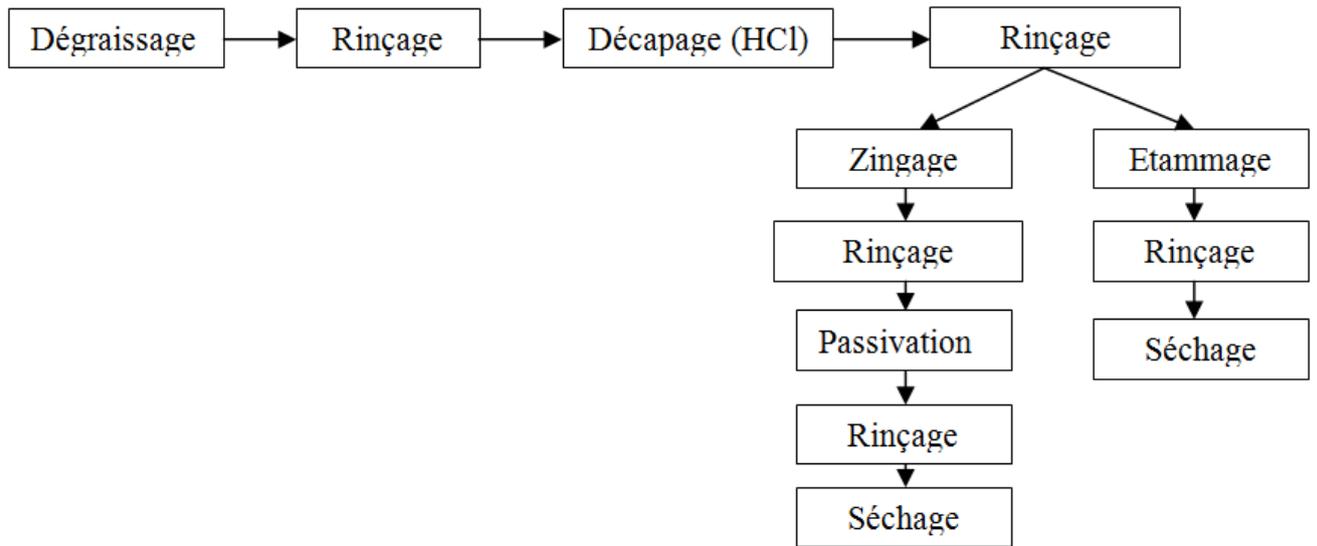


Figure 4. 1. Les paramètres de zingage et d'étamage.

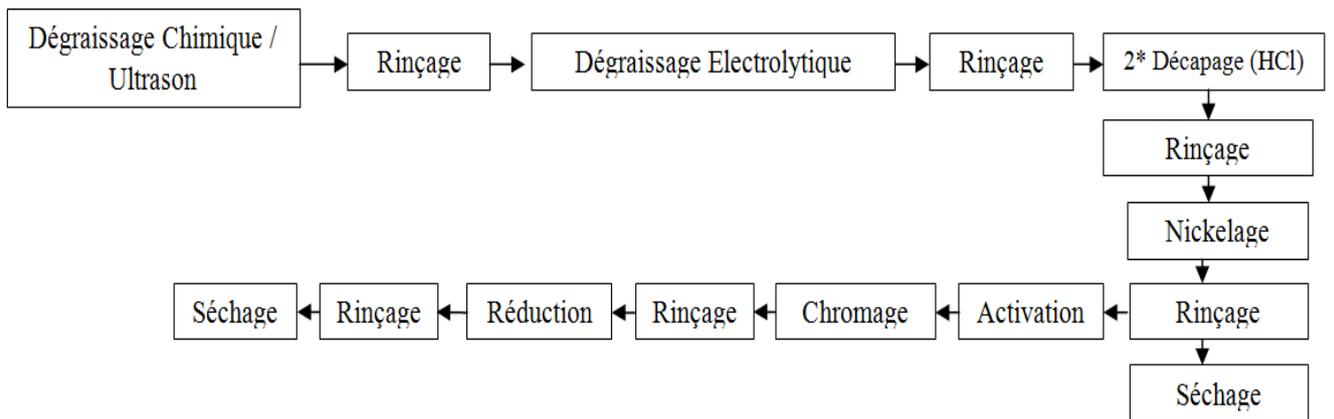


Figure 4. 2. Les paramètres de nickelage et chromage





Figure 4. 3. Le processus d'électrodéposition.

Revêtements Electrolytique	Anode	Bain	pH	T(°C)
Nickel	Nickel pure	(WATT bath) NiCl ₂ (70.21g/l) NiSO ₄ (287.68g/l) H ₃ BO ₃ (46.98g/l)	4,2-4,8 (4,7)	50-65 (59°C)
Chrome	Plomb	SO ₄ (1.09g/l) CrO ₃ (222g/l)	/	35-40 (37°C)
Zinc	Zinc Pure 99,9%	ZnCl ₂ (84g/l) KCl (130-200g/l) H ₃ BO ₃ (25g/l)	4,5 à 5,2 (4.8)	20-50 (30°C)
Etain	Etain pure	SnSO ₄ (15-25g/l) H ₂ SO ₄ (120-190g/l)	< 1	25-25

Tableau 4. 2. Les paramètres du processus d'électrodéposition

b. La cémentation :

D'une manière pratique, les pièces sont placées dans des caisses en acier convenablement espacées les unes des autres et recouvertes d'une couche de ciment

de 3 mm d'épaisseur. Une fois pleine, la caisse est fermée par un couvercle et portée dans un four de température de cémentation (900°C) pendant 3 heures. Les pièces cémentées restent dans le four jusqu'au refroidissement totale.

4.2.3. Caractérisation des aciers utilisés :

Afin de caractériser le comportement mécanique des matériaux utilisé, soumis à des forces extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations, on a recours à un certain nombre d'essais.

a. Mesure des épaisseurs des couches:

Les mesures des épaisseurs des différents revêtements sont effectuées à l'aide d'un Couloscope S utilisant la méthode coulométrique (dissolution anodique). Cet appareil mesure pratiquement n'importe quel revêtement métallique, y compris les multicouches, sur un substrat métallique ou non. Il est utilisé pour les applications où les méthodes non destructives ne peuvent pas ou ne doivent pas être utilisés. Il peut mesurer avec précision les revêtements métalliques dans la gamme de 0,05 à 40 μm .

b. Mesure de la rugosité:

Les propriétés des surfaces peuvent avoir un impact sur le comportement mécanique, électrique ou chimique de la pièce. La qualité des surfaces est largement tributaire de leur rugosité. En emboutissage, il est important de déterminer la rugosité des tôles pour assurer le succès de l'opération. Jusqu'à présent, les emboutisseurs sont demandeurs de Ra élevés afin de limiter essentiellement les risques de grippage (piégeage des débris dans les vallées)

Dans cette étude, la rugosité des échantillons est mesurée à l'aide d'un profilomètre qui sert principalement à identifier les saillies présentes sur une surface. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le **Tableau 4.3**.

Les résultats de mesure de rugosité montrent bien que les revêtements les plus épais exhibent des faibles rugosités (Ni : Ra 0.1 μm , Cr :Ra 0.53 μm). Par contre les tôles à peinture pré-laquée possèdent une rugosité supérieure (Ra=2.7 μm).

	Acier non revêtu C5	Revêtement Zn	RevêtementS n	Revêtement Cr	Revêtement Ni	Peinture prélaquée
e (µm)	0	4	7	12	13	/
Ra(µm)	1.42	1.38	1.07	0.53	0.1	2.7

Tableau 4. 3. Les propriétés des revêtements

c. Essai de traction :

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'Young E, la limite élastique, la résistance à la rupture, l'allongement uniforme, et avec certaines hypothèses le coefficient d'écroutissage, le coefficient de Lankford, etc.

L'essai de traction est exécuté sur une série d'éprouvettes plates en acier revêtu et non revêtu. La découpe des échantillons a été faite à 0° par rapport au sens de laminage avec des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation. Les têtes ont une section supérieure à celle de la partie utile de façon qu'elles ne subissent aucune déformation plastique et qu'elles ne cassent pas en premier, (**Figure 4.4**). Cet essai destructif, pratiqué à température ambiante, consiste à imposer une déformation croissante à vitesse constante et à mesurer l'effort nécessaire pour imposer cette déformation.

Une machine de traction moderne MTS Criterion de capacité 100 kN, dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée (2mm/min pour nos essais). Elle est équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système d'amarrage. Grâce au micro-ordinateur, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 100 kN, à l'aide de quelques touches. Un extensomètre est placé sur la partie utile de l'éprouvette pour la mesure et le contrôle instantané des déformations, (**Figure 4.5**).

L'utilisation d'un extensomètre est exigée par la plupart des normes d'essai de traction (ASTM et ISO).

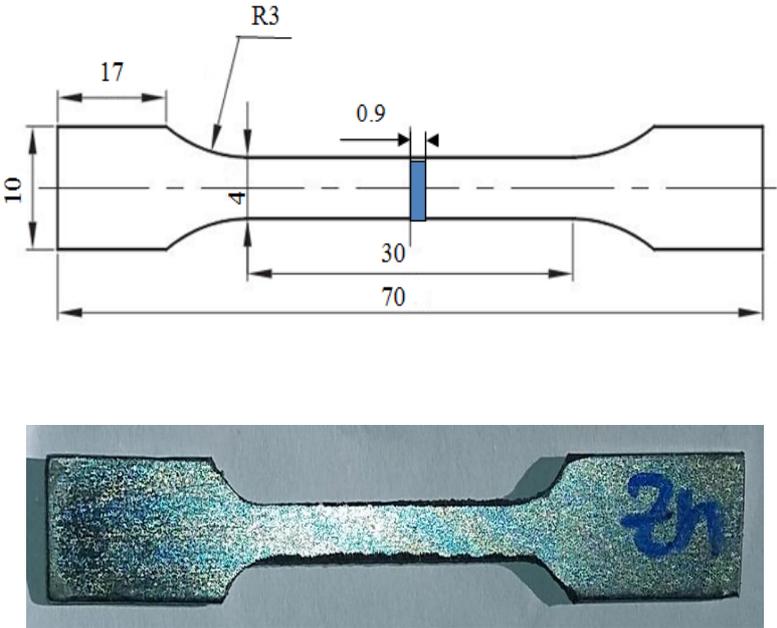


Figure 4. 4. Forme et dimensions de l'éprouvette de traction.

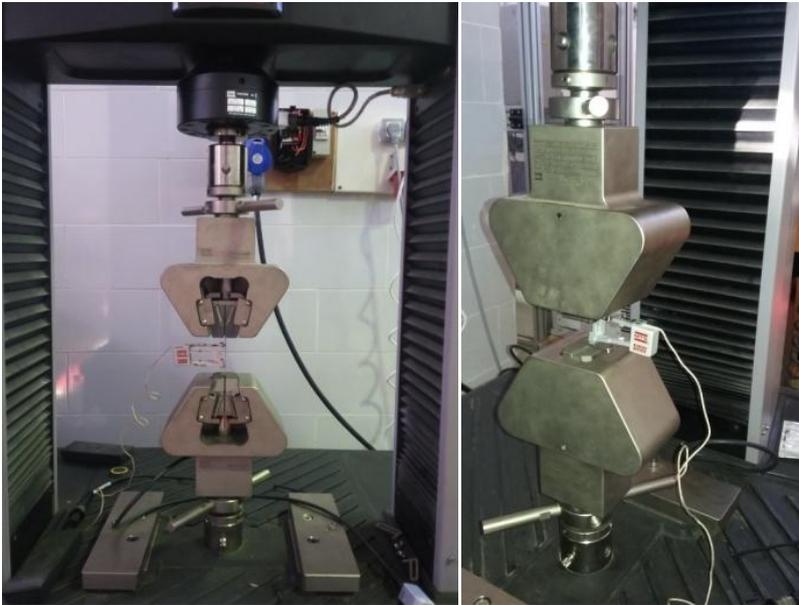
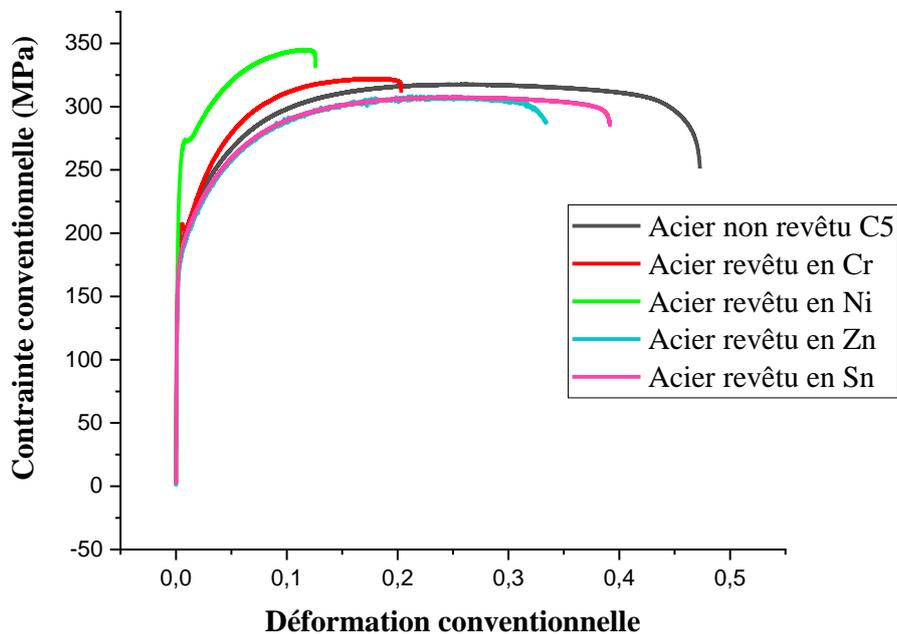


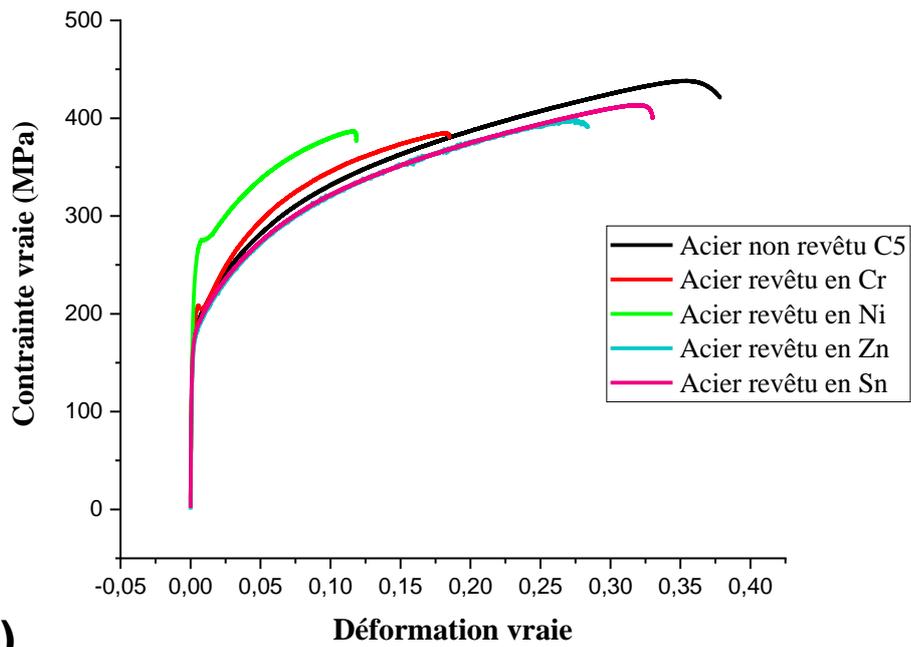
Figure 4. 5. Machine de traction de type MTS Criterion avec extensomètre.

❖ Le comportement macroscopique d'une éprouvette en traction simple :

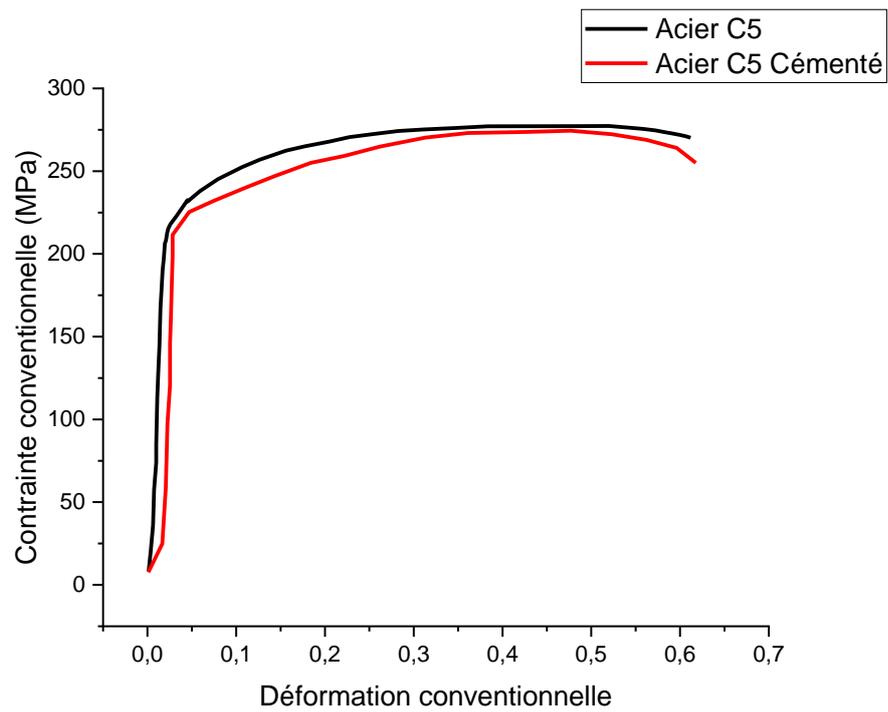
Durant la première partie de l'essai, l'éprouvette a un comportement élastique linéaire. Théoriquement, la pente de la droite est égale au module de YOUNG. Il y a réversibilité totale et instantanée de la déformation. La déformation élastique est suivie de la déformation plastique.

D'abord, l'allongement de l'éprouvette est accompagné d'une contraction homogène (uniforme) sur toute la longueur de l'échantillon. À partir d'un certain taux de déformation critique (contrainte maximale) la contraction de la section cesse d'être homogène et devient de plus en plus importante en un seul endroit. On parle du phénomène de striction. Dès le début du processus de striction, la section locale diminue rapidement et la résistance à l'allongement de l'éprouvette qui est proportionnelle à la section diminue également. Lorsque la rupture se produit l'éprouvette se contracte de manière brutale en restituant l'énergie stockée.





b)



c)

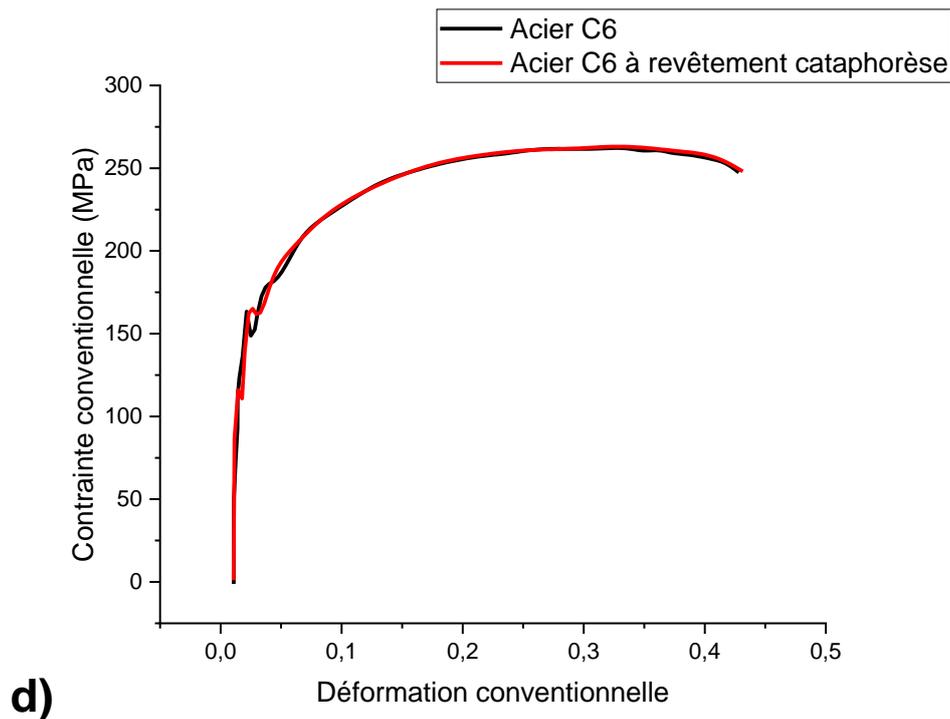


Figure 4. 6. Courbes conventionnelles et rationnelle de traction des éprouvettes utilisées.

Les courbes de traction de la **Figure 4.6.a** et **b**, montrent bien que le revêtement change les propriétés mécaniques du substrat durant la déformation plastique. Le substrat acier C5 a une ductilité élevée par rapport aux échantillons revêtus. La même figure montre aussi que cette ductilité varie d'un revêtement à un autre. Les éprouvettes à revêtement épais en chrome et nickel, ont montré une résistance plus élevée et une faible ductilité. Les revêtements fragiles provoquent plusieurs strictions localisées sur la même éprouvette. Par contre, les revêtements fins comme le zinc et l'étain, présentent une ductilité modérée avec des faibles résistances à la rupture.

La **Figure 4.6.c**, présente des courbes de traction très proches de l'acier C5 et l'acier C5 cémenté (sans trempe). Une légère diminution de résistance pour ce dernier est observée suite à un recuit sans production d'une structure martensitique. Cependant les courbes de l'acier C6 et de celui pré-laqué sont superposées, **Figure 4.6.d**. Pour ce cas, la couche de revêtement a un comportement plastique ductile et n'a aucun effet sur le comportement du substrat.

	Acier non revêtu C5	Revêtement Zn	Revêtement Sn	Revêtement Cr	Revêtement Ni
E (GPa)	214	171	197	180	183
R_e (MPa)	175	185	180	200	275
R_m (MPa)	318	308	307	322	345

Tableau 4. 4. Propriétés mécaniques d'acier revêtu et non revêtu.

d. Mesure de dureté :

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur à la surface d'un matériau. Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.

Les mesures de dureté Vickers sont effectuées à l'aide d'un duromètre de type Q30M, au niveau du laboratoire (IOMP).

	Acier non revêtu C5	Revêtement Zn	Revêtement Sn	Revêtement Cr	Revêtement Ni	Peinture prélaquée	Acier C5 Cémenté
D(HV)	115	104	95	706	672	100	98

Tableau 4. 5. Résultats de dureté

D'après les résultats de mesure de dureté, il semble que les duretés des échantillons revêtus en chrome et nickel sont les plus élevés par rapport aux autres revêtements. Ceci affirme bien évidemment la ductilité des revêtements d'étain et de zinc par rapport à eux. Ils sont en concordance avec ceux des essais de traction.

De plus, les échantillons non traités représentent une dureté plus grande que ceux traités. La diminution de la dureté pour ce dernier est observée suite à un recuit (sans trempe), sans production d'une structure martensitique.

4.2.4. Essais d'étirage pliage :

Afin de montrer l'impact des paramètres cités préalablement sur le retour élastique, nous avons effectué une série d'essais d'étirage-pliage en U et en V sur des éprouvettes ayant des différents paramètres.

a. Etirage-pliage en U :

Ces essais sont assurés par un dispositif en U adapté sur une machine de traction de type **Fu 1000e** (**Figure 4.7**). Un capteur de déplacement, adapté au dispositif réalisé et relié à un lecteur électronique, peut enregistrer à chaque instant la profondeur d'étirage **h** pour calculer le retour élastique final Δh_2 qui est dû à l'élimination de la force de serrage par libération totale de l'éprouvette.



Figure 4. 7. Dispositif d'étirage-pliage en U adapté sur la machine de traction

b. Etirage-pliage en V :

Ces essais sont assurés par un dispositif en V adapté sur une machine de traction de type **ZwickRoell** (**Figure 4.8**). Une caméra numérique HD (SONY) est placée à 400 mm du dispositif pour prendre des photos pendant le processus d'étirement.

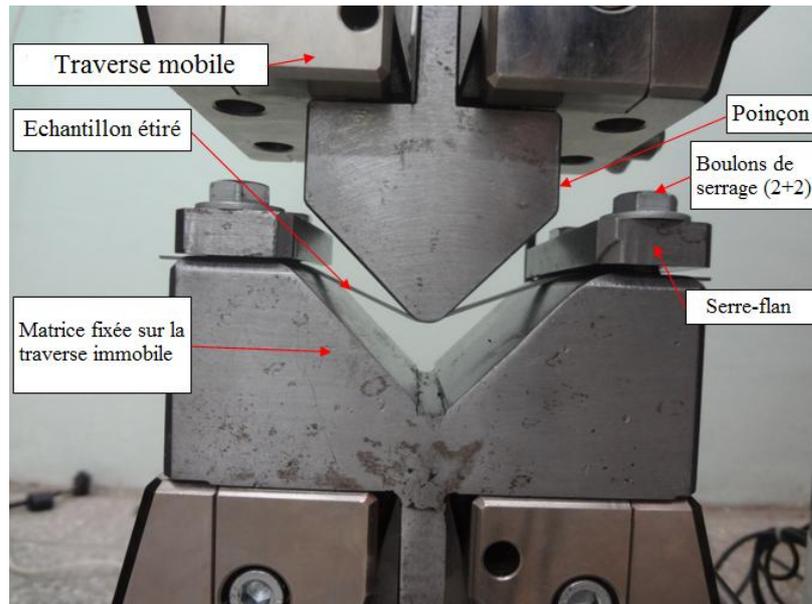


Figure 4. 8. Dispositif d'étirage-pliage en V adapté sur la machine de traction

c. Paramètre des essais :

Le calcul de la force appliquée sur chaque extrémité est fait en utilisant la formule de Kellerman et Klein, mettant en relation le couple de serrage et l'effort de tension :

$$C_s = k.F$$

$$C_s = [(P/2\pi) + (0.583.d_f.\mu_f) + (D_t/2).\mu_t].F$$

Où : $k = (P/2\pi) + (0.583.d_f.\mu_f) + (D_t/2).\mu_t$

Pour deux boulons de serrage sur chaque côté, la force de serrage calculée est définie par :

$$F = 2.C_s / [(P/2\pi) + (0.583.d_f.\mu_f) + (D_t/2).\mu_t]$$

Où :

F (N): Tension de la vis

C_s (N. m): Couple de serrage appliqué sur chaque boulon

P (mm): Pas de la vis

(D_t): 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

Les deux boulons de serrage sur chaque extrémité ont les propriétés suivantes :

Boulon de serrage	U	V
Type de la vis (mm)	M10	M8
Pas de la vis (mm)	1.5	1.25
Diamètre moyen à flanc de filet (mm)	9.0	7
Coefficient de frottement dans les filets	0.15	0.15
Coefficient de frottement sous tête	0.15	0.15

Tableau 4. 6.Caractéristiques des boulons utilisés.

Couple de serrage pour un boulon (N.m)	BHF appliquée sur chaque extrémité (kN)	
	V	U
0	0	0
3	2	3
5	3.5	5
7	5	7

Tableau 4. 7.Relation entre BHF et le couple appliqué sur chaque boulon de serrage.

Essai d'étirage-pliage	U	V
Température	ambiante	ambiante
Matériau de la tôle	Acier revêtu et non revêtu	Acier revêtu et non revêtu
Vitesse de déplacement de la traverse mobile (mm/min)	3	3
Dimensions de l'éprouvette (mm)	126x10x0.9	126x10x0.9
Dimensions de l'outillage (mm)	Rp=4, Rd=5	Rp=6, Rd=12, W _d =68, θ=90°
Lubrification	huile	huile
Force de serrage (kN)	0, 3, 5, 7	0, 2, 3.5, 5
Profondeur d'étirage (mm)	10, 15, 20	10, 15, 20, 25
Type de revêtement	Cr, Ni, Zn, Sn, Cataphorèse	Cr, Ni, Zn, Sn, Cataphorèse

Tableau 4. 8. Conditions expérimentales.

4.2.5. Calcul du retour élastique :

Le calcul du retour élastique a été fait par plusieurs méthodes selon la forme finale de l'éprouvette.

- **Etirage-pliage en V :**

Pour calculer le retour élastique final (expérimental et simulation), les images de l'échantillon plié avant décharge et après suppression de la charge et libération de l'éprouvette du montage sont prises. Ces images sont exportées vers un logiciel de traitement d'images **Image Pro Plus**, les lignes ont été tracées sur les bords des images à l'aide du logiciel et les angles nécessaires ont été mesurés. L'angle de retour élastique final ($\Delta\theta$) est calculé à partir de la différence entre l'angle de pliage pendant le chargement (θ_i) et celui après déchargement totale (θ_f). L'angle de retour élastique

final aux extrémités ($\Delta\alpha$) est calculé à partir de la différence entre l'angle de l'extrémité avant le chargement (α_i) et celui après déchargement totale (α_f) **Figure 4.9.a et b.**

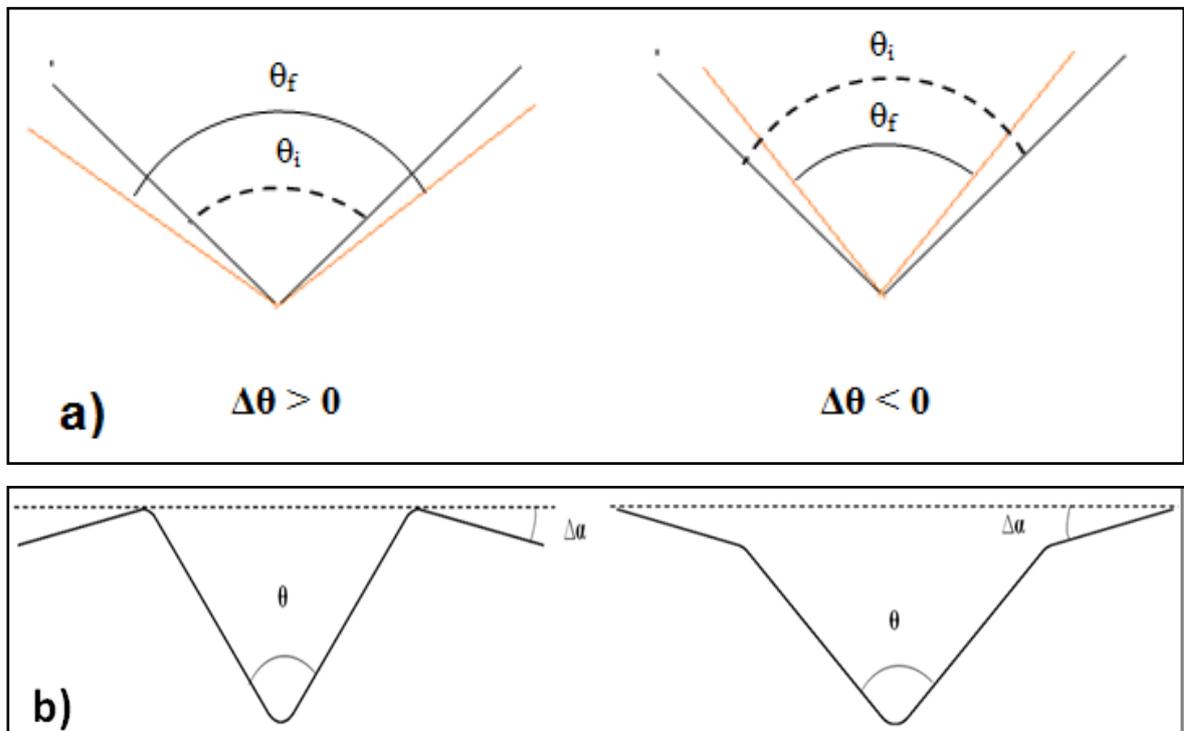
- **Etirage-plierage en U :**

À l'aide du projecteur de profil et du mesureur de coordonnées (x, y) de type MP320 avec une précision de mesure de l'ordre de $1\mu\text{m}$, on a mesuré la profondeur finale h_2 et les coordonnées x, y des angles latéraux, afin de déterminer, respectivement, le retour élastique finale en profondeur Δh_2 , et en angle $\Delta\theta_2$, **Figure 4.9. c e td.**

$$\Delta h_2 = h - h_2$$

h : la profondeur mesurée par le capteur de déplacement avant la décharge

h_2 : la profondeur mesurée par le projecteur de profile après la libération totale de l'éprouvette.



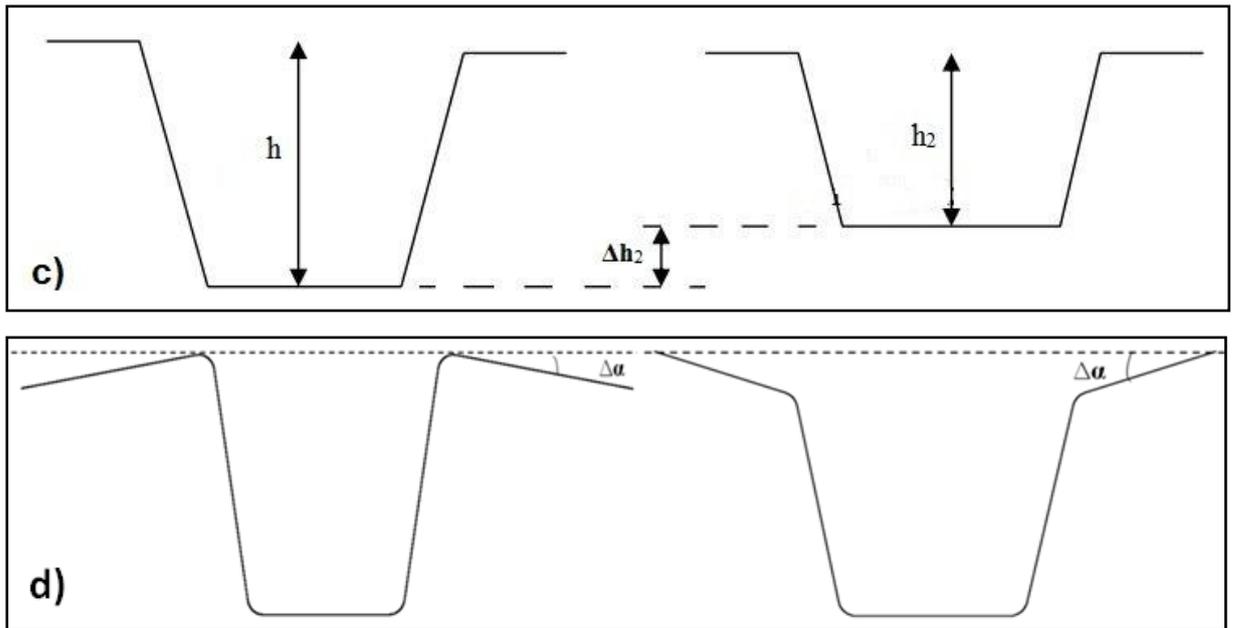
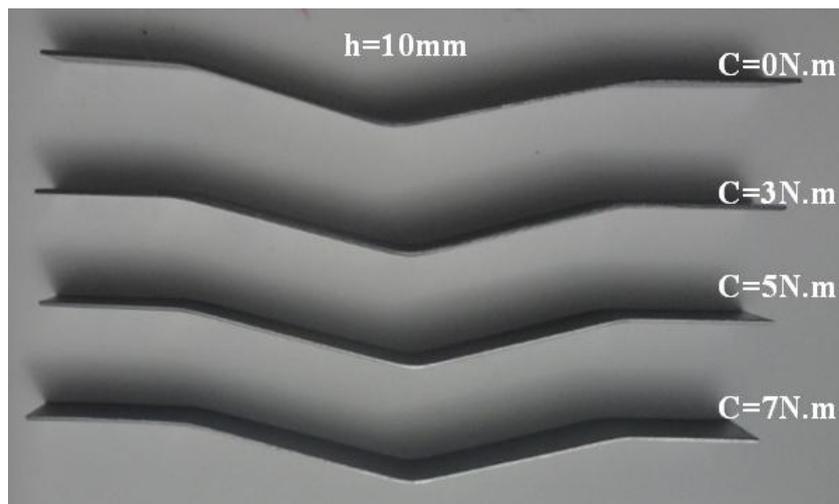


Figure 4. 9. Les différents cas du retour élastique final.

Retour élastique négatif ($\Delta\theta, \Delta\alpha < 0$; $h < h_2$; $\Delta h_2 < 0$)

Retour élastique positif ($\Delta\theta, \Delta\alpha > 0$; $h > h_2$; $\Delta h_2 > 0$)

- a) RE en angle de pliage d'essai en V ($\Delta\theta^\circ$)
- b) RE en angle aux extrémités d'essai en V ($\Delta\alpha^\circ$)
- c) RE en profondeur d'essai en U (Δh)
- d) RE en angle aux extrémités d'essai en U ($\Delta\alpha^\circ$)



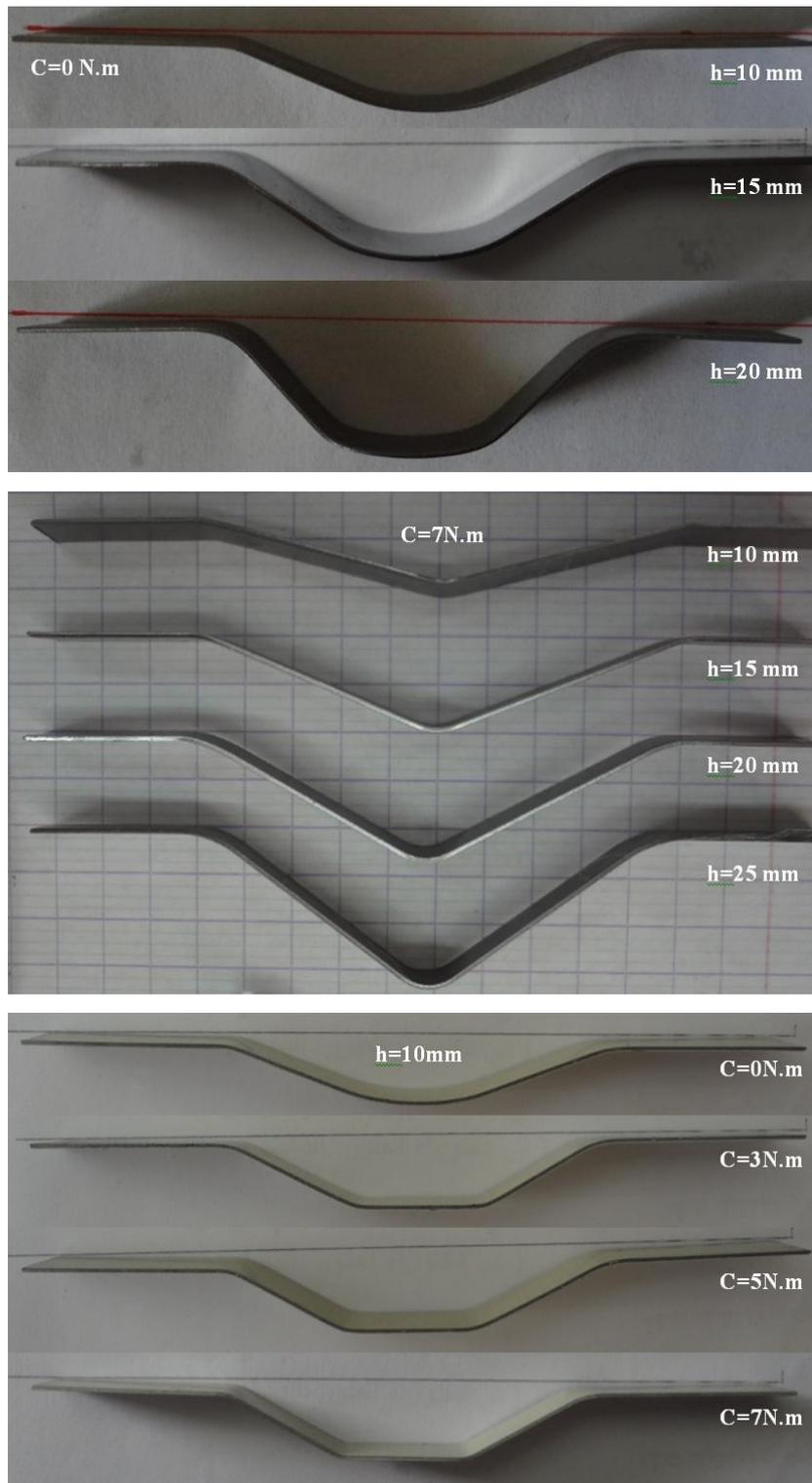


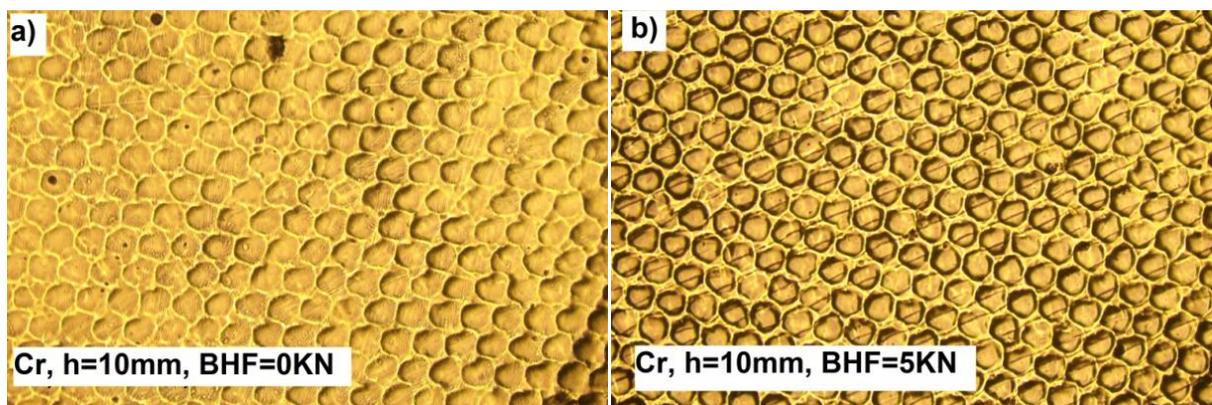
Figure 4. 10. Éprouvettes après étirage-plierage en U et en V.

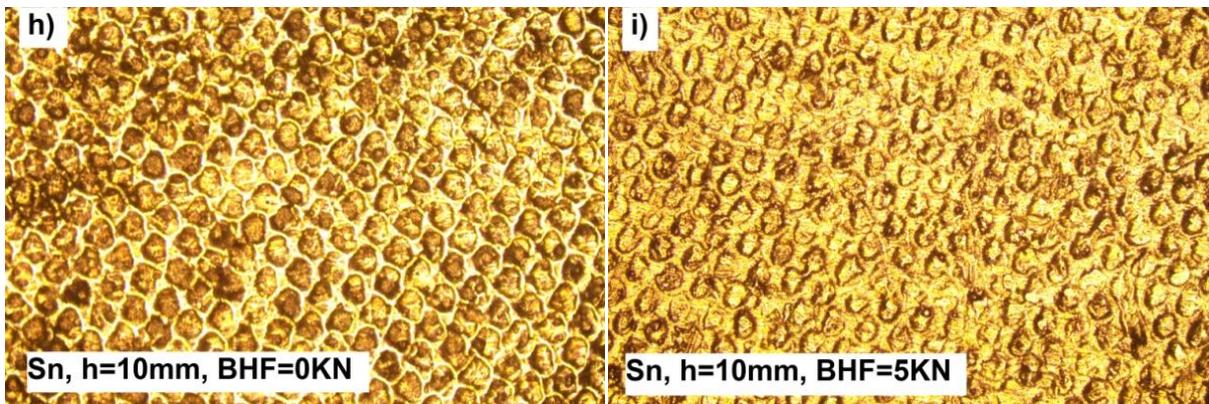
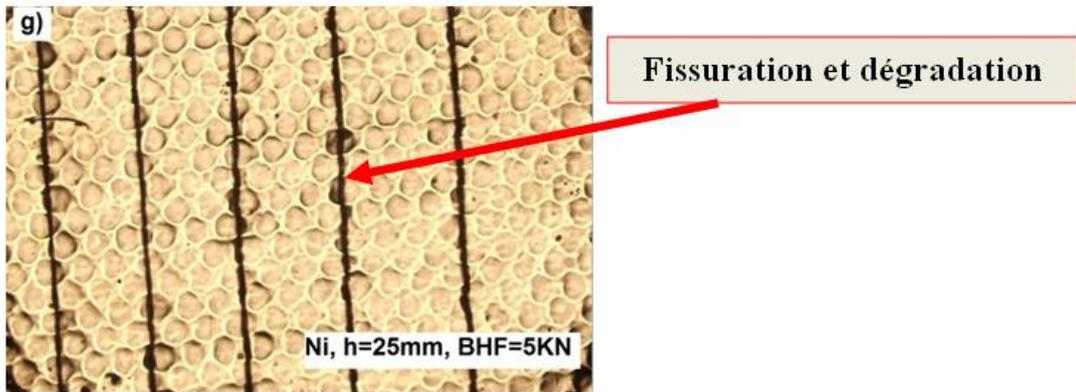
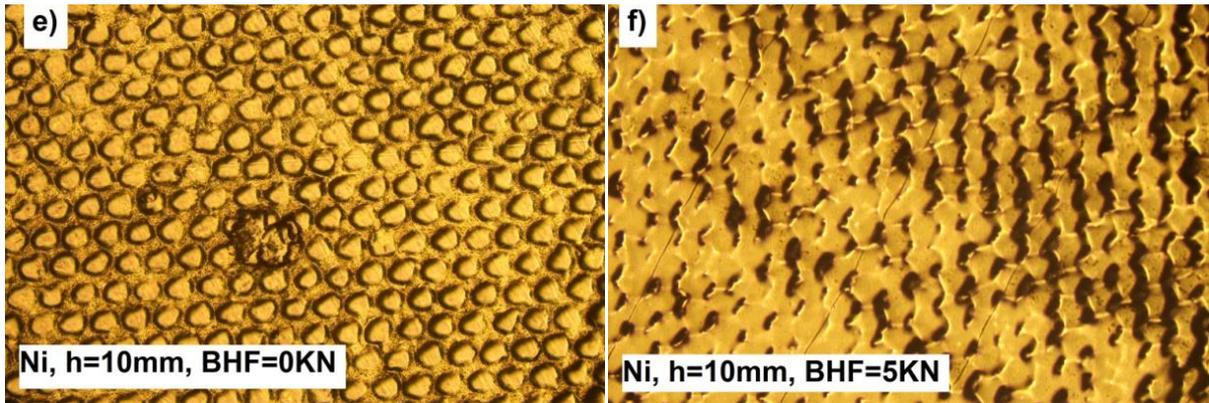
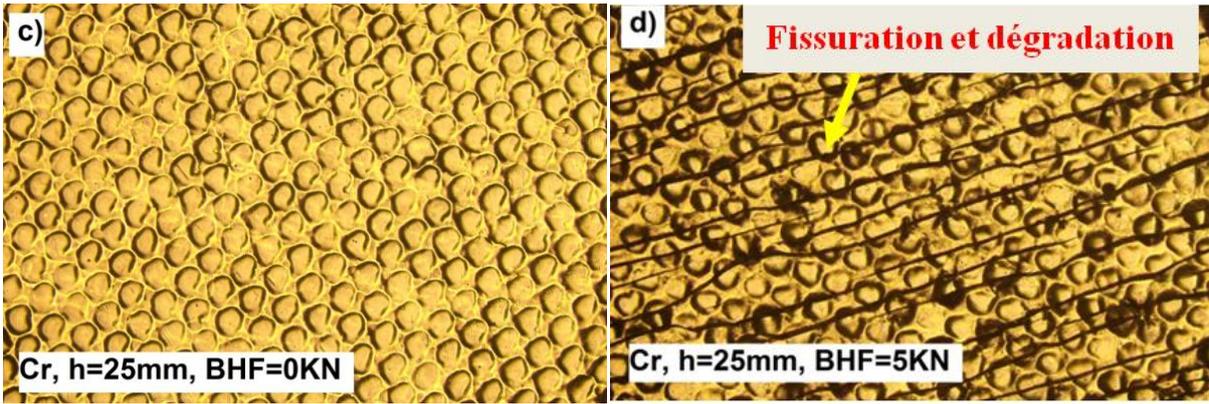
4.2.6. Observation microscopique de l'état de surface déformée:

Lors de la mise en forme, les tôles déformées par étirage-pliage influent directement sur le comportement mécanique des revêtements métalliques déposées. De plus, vu que l'électrodéposition est une méthode qui induit généralement de fortes contraintes internes qui peuvent produire des phénomènes de fissuration ou de flexion. Nous avons effectué des observations au microscope optique ZEISS (grossissement 50) pour voir l'effet de la profondeur d'étirage et la force de serrage utilisées sur le comportement des différents revêtements métalliques. La visualisation est faite au niveau de la zone B (**Figure 5.43**), après l'essai d'étirage-pliage en **V**.

D'après les **figures 4.11. b,d,f et g**, la fragilité des dépôts de **Chrome** et **Nickel** est très visible, d'où des striction sont apparues en augmentant la BHF, Ces dépôts deviennent fortement dégradés en petits fragments parallèles en combinant une profondeur **h** et une **BHF** élevées.

Le dépôt du Zinc présente des légères lignes de striction entre les grains déformés expliquant le début d'endommagement, ceci est montré sur la **figure 4.11.o**. Ces lignes sont absentes dans le cas d'un serrage nul, **figure 4.11.n**. Par contre la ductilité du revêtement d'étain est apparue dans la **figure 4.11. h,i,j et k**, où on observe que des petites déformations expliqués par le changement de forme des grains sans apparition de la striction ou de rupture.





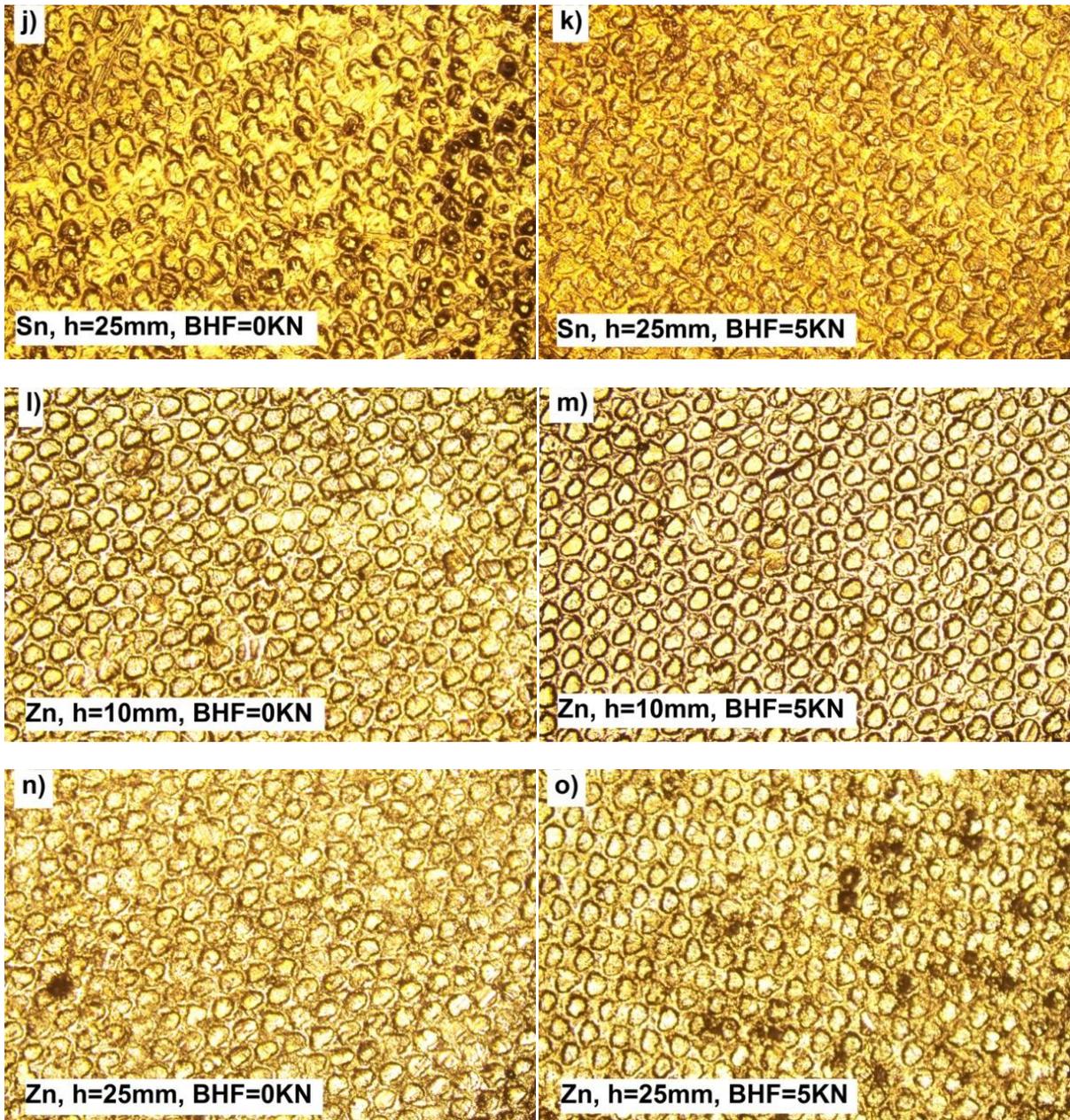


Figure 4. 11 : Visualisation microscopique des tôles après un essai d'étirage-plier en

V

CHAPITRE 5.
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

5.1. Introduction :

Afin de mettre en évidence l'effet du type du revêtement sur le retour élastique final en angle ($\Delta\theta$, $\Delta\alpha$) et en profondeur (Δh) nous avons procédé plusieurs essais d'étirage pliage en U et en V à différentes conditions en utilisant deux types d'acier C5 et C6 avec trois types de revêtement différents.

- a. Les revêtements métalliques: Electrodéposition du Chrome, Nickel, Zinc et l'étain.
- b. Les revêtements plastiques : nous avons mis une couche d'un film plastique autocollant de trois façons :
 - Sur les parois intérieures des outils (matrice et serre flanc) en contact avec l'échantillon à plier.
 - Sur une seule face de l'échantillon à plier.
 - Sur les deux faces de l'échantillon à plier.
- c. Un revêtement peinture (cataphorèse).
- d. La cémentation d'acier avec du charbon de bois à température 900° pendant 3 heures (sans trempe).

5.2. Effet des traitements de surface et BHF sur le retour élastique :

Dans un premier temps, nous avons étudié simultanément l'effet du revêtement et de la force de serrage sur le retour élastique primaire et final en angle ($\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$, $\Delta\alpha$) et en profondeur (Δh_1 , Δh_2). Pour ce but, nous avons effectué une série d'essais d'étirage-pliage en deux forme U et V, à différent types de tôles avec et sans revêtement en utilisant des forces de serrage de (0, 2, 3.5 et 5 kN pour l'essai en V et 0,3, 5 et 7 kN pour l'essai en U). Les forces appliquées en U ou en V introduisent la même pression sur l'éprouvette.

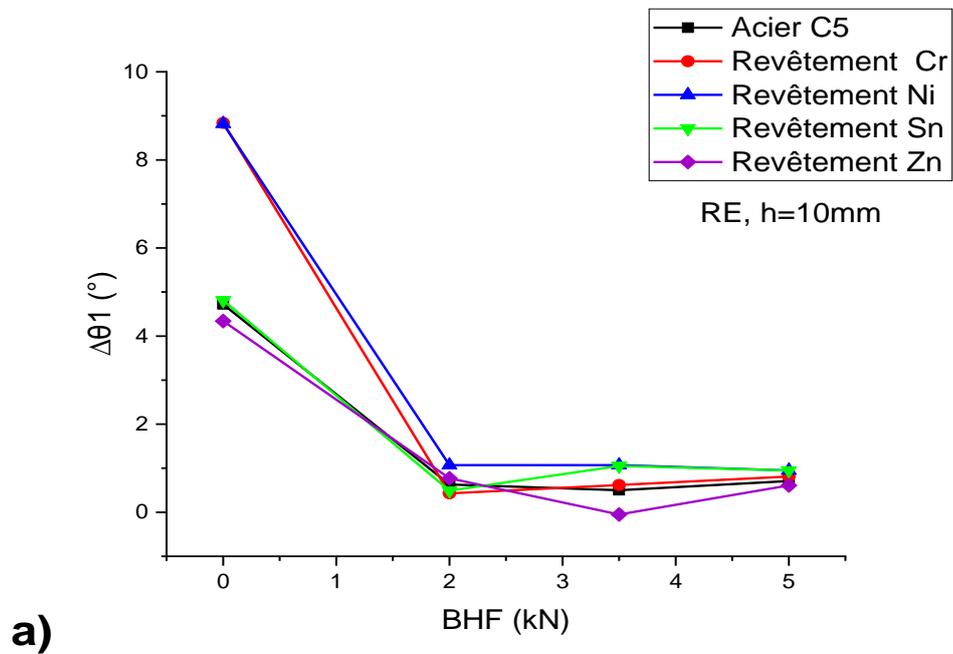
Les résultats expérimentaux et numériques (**Figure 5.1-5.15**) montrent que les retours élastiques primaires et finaux en angle ($\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$, $\Delta\alpha$) et en profondeur (Δh_1 , Δh_2) diminuent progressivement dans le sens inverse de la force de serrage (BHF). Ceci quel que soit le type du traitement surface utilisé (métallique, plastique, peinture ou cémentation), et quel que soit la profondeur d'étirage atteinte (10, 20 et 25 mm). En

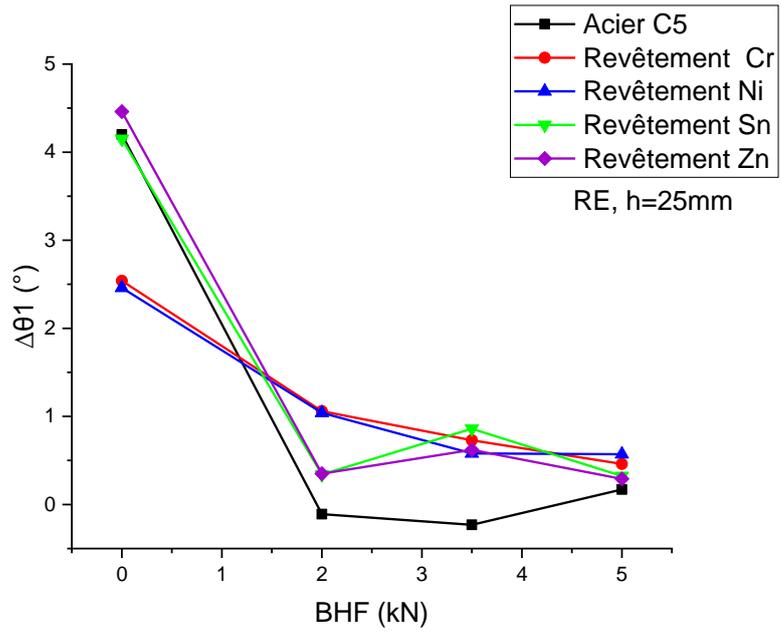
effet le serrage ralentit le glissement et favorise l'étirement de la tôle par rapport à la flexion.

a. Les revêtements métalliques :

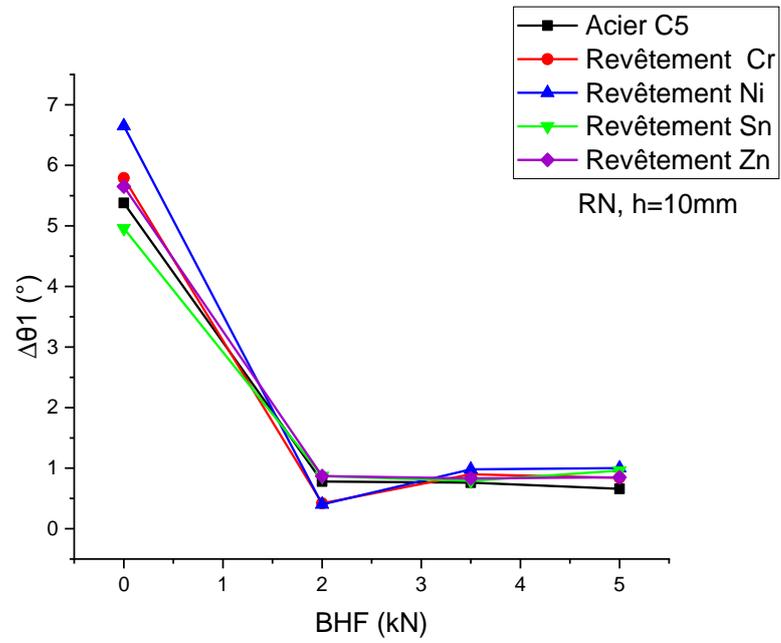
La force de serrage de serre flan est un facteur déterminant influençant le retour élastique. Pour l'évaluer nous avons tracé les courbes $\Delta\theta_1/\text{BHF}$, $\Delta\theta_2/\text{BHF}$, $\Delta\alpha/\text{BHF}$, $\Delta h_1/\text{BHF}$ et $\Delta h_2/\text{BHF}$. Pour les différents types des échantillons utilisés. Des **Figures 5.2, 5.9, 5.12, 5.14, 5.16**, on remarque que les échantillons non revêtus (acier C5 et C6) présentent un retour élastique final ($\Delta\theta_2$, Δh_2) moins que ceux revêtus ou cimentés.

- **Essais en V :**





b)



c)

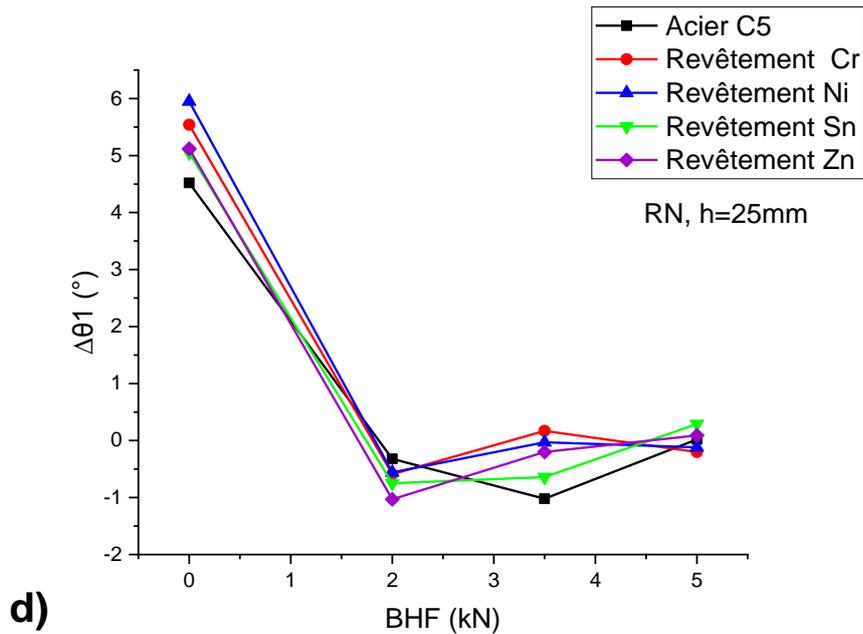
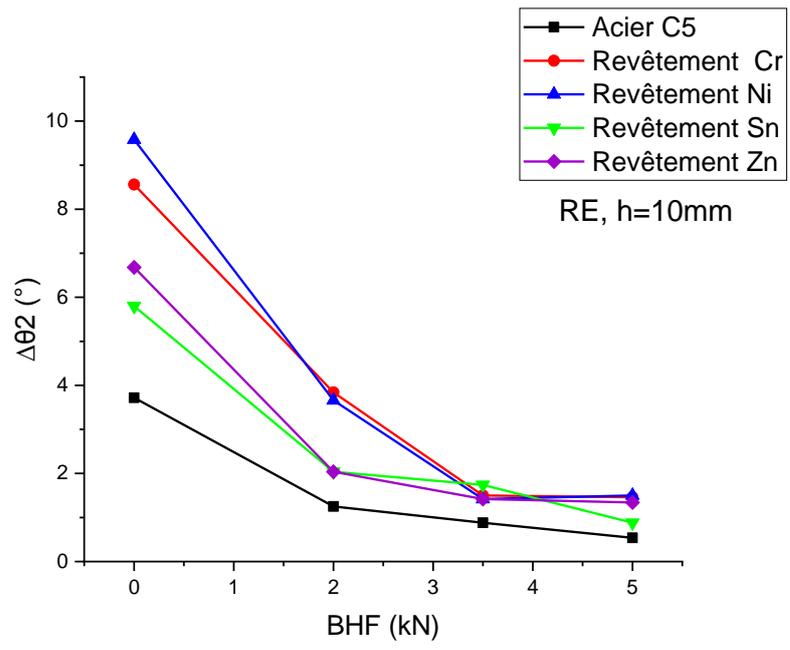


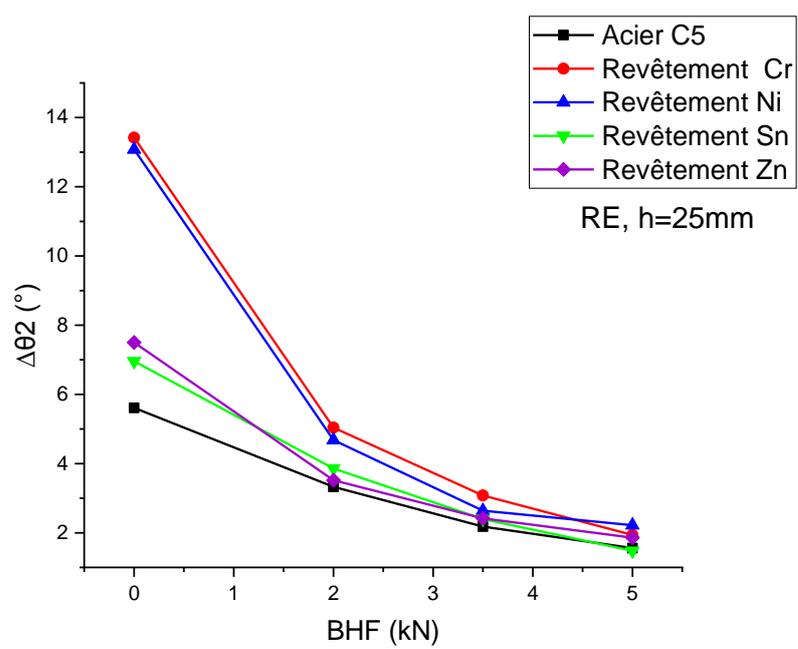
Figure 5. 1. Effet de BHF sur l'angle du retour élastique primaire ($\Delta\theta_1$) d'essai d'étirage-pliage en V. (a et b) Courbes expérimentales, (c et d) Courbes de simulation

De la **Figure 5.1 a, b**, on peut tirer les descriptions suivantes : Le retour élastique primaire ($\Delta\theta_1$) présente la même allure que le ($\Delta\theta_2$). Pour un serrage nul (BHF=0kN), la tôle glisse facilement entre la matrice et le serre-flan, d'où un grand retour élastique a été observé. Les échantillons revêtus en nickel et chrome donne un retour élastique plus élevé par rapport au ceux revêtus en étain et zinc.. Cependant les résultats numériques montrent des valeurs très proche de ($\Delta\theta_1$) quelque soit le revêtement utilisé. **Figure 5.1. c et d**

A (BHF \geq 2kN), les valeurs du retour élastique primaire ($\Delta\theta_1$) se rapprochent et se chevauchent. **Figure 5.1.**



a)



b)

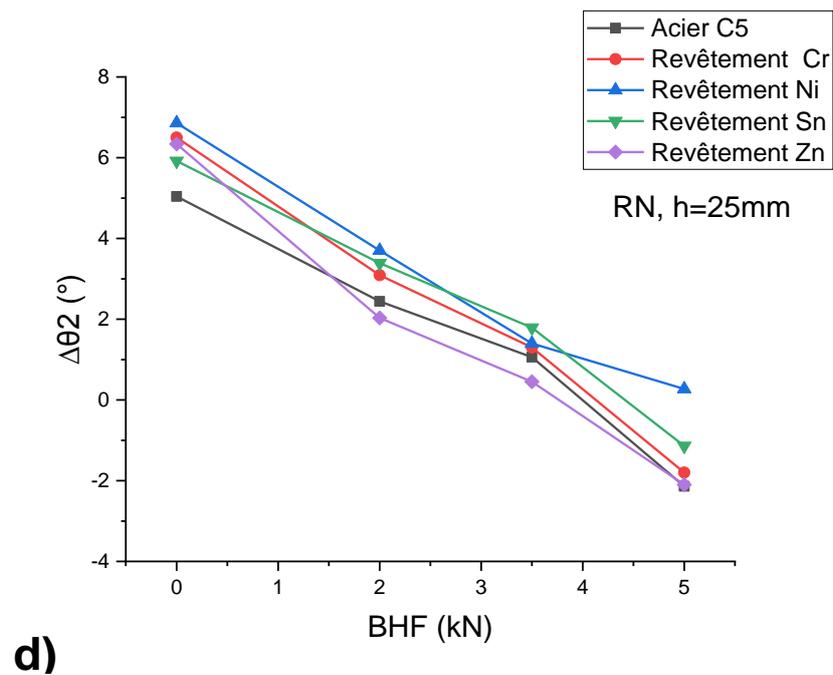
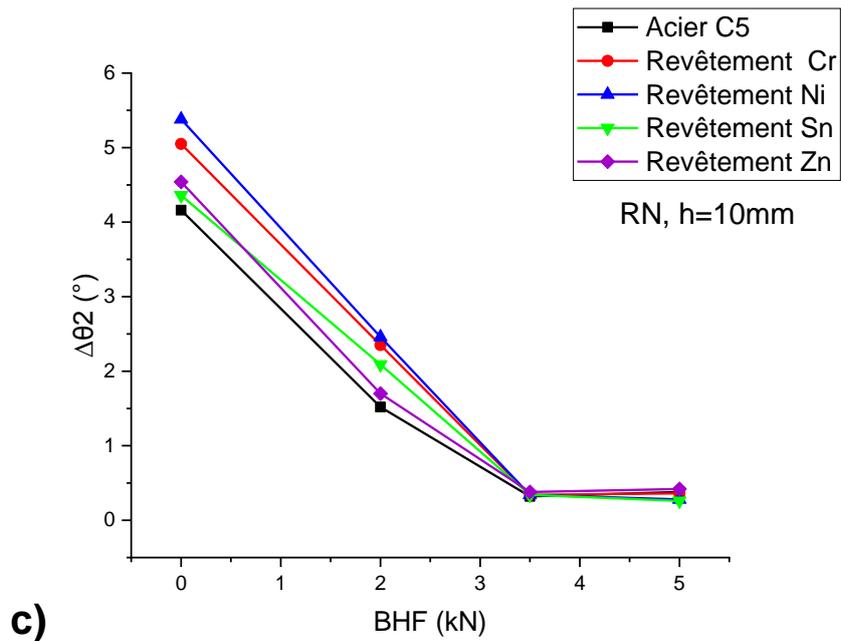


Figure 5. 2. Effet de BHF sur l'angle du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) d'essai d'étirage-pliage en V. (a et b) Courbes expérimentales, (c et d) Courbes de simulation

Comme l'indique la **figure 5.2.a et b**, l'expérience montre qu'à faible BHF ($0 \leq \text{BHF} \leq 2\text{kN}$), il y a une variation remarquable de l'angle du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) entre échantillons revêtus et non revêtus, cette variation diffère d'un revêtement à un autre. Le R.E maximal ($\approx 14^\circ$) a été obtenu à la combinaison d'une profondeur d'étirage de 25

mm et d'une BHF de 0kN. Lors de l'étirage-plier, le poinçon induit principalement des contraintes de flexion dans la tôle et des contraintes d'étirage négligeables. De plus et d'après (**Godon, 2010**), l'électrodéposition est une méthode qui induit généralement de fortes contraintes internes qui dépendent de la taille de grain, ces contraintes peuvent produire des phénomènes de fissuration ou de flexion. Alors dans ce cas-là et à faible BHF, la flexion domine par rapport à l'étirage suite à un glissement de la tôle entre la matrice et le serre-flan, et par conséquent un R.E important.

Pour un BHF compris entre **2 et 5kN**, les valeurs du R.E tendent à être plus proches et se chevauchent et le R.E ($\Delta\theta_2$) atteint ces valeurs minimales ($\approx 0.2^\circ$) à 10mm de profondeur, **Figure 5.2.a, b** et **c**. Dans ce cas, les contraintes induites par le poinçon deviennent principalement des contraintes de traction. En effet la répartition des contraintes sera semi-uniforme dans l'épaisseur de la tôle et la flexion résiduelle devient négligeable. De plus la tension développée dans la tôle sera suffisante pour provoquer une déformation plastique plus importante. Cela induit un étirement et plastification de la tôle au-delà de sa limite élastique et donc un retour élastique plus faible.

La simulation numériques montre aussi une diminution linéaire de RE en fonction de la BHF, et ceci pour les deux profondeurs d'étirage (10 et 25mm) et pour tout revêtement. Au-delà de 3.5kN, le retour élastique final $\Delta\theta_2$ prend des valeurs négatives en étirage profond (25mm), **Figure 5.2.d**.

Comparaison

	$\Delta\theta_2$ expérimental Fig 5.2.a,b	$\Delta\theta_2$ de simulation Fig 5.2.c, d
Profondeur h=10mm	Compris entre 0.5° et 10°	Compris entre 0° et 5.5°
Profondeur h=25mm	Compris entre 1° et 14°	Compris entre -3° et 7°

- Les valeurs les plus élevées sont toujours observés en revêtement Chrome et Nickel
- Les valeurs les plus faibles sont observées dans le cas d'un acier C5 nu.
- Les valeurs trouvées par simulation sont toujours faibles par rapport à celles de l'expérimentation. Ceci revient au fait que certains facteurs ne sont pas pris en

considération, d'une manière exacte, tels que la rugosité, les frottements, la loi de comportement...etc.

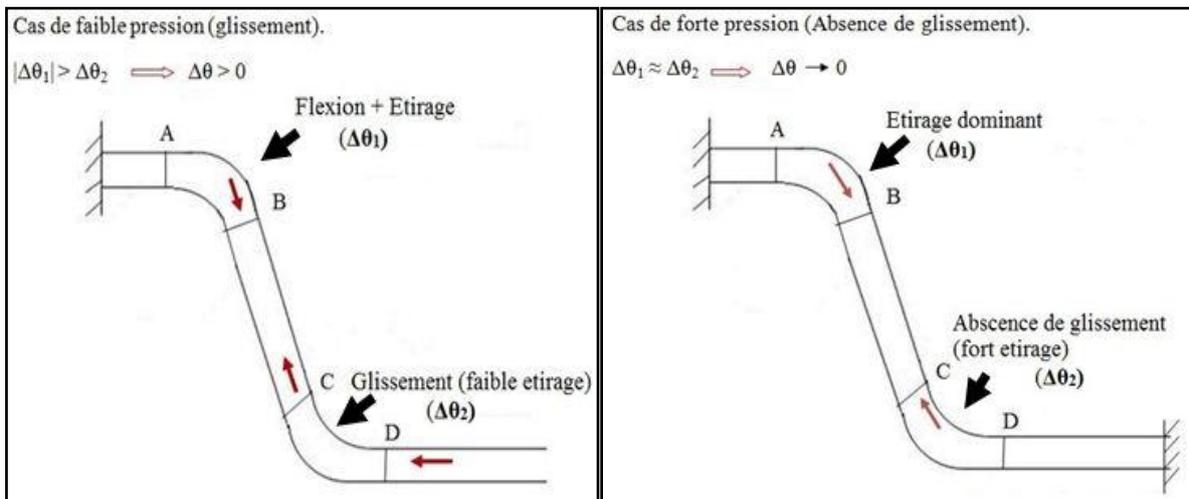
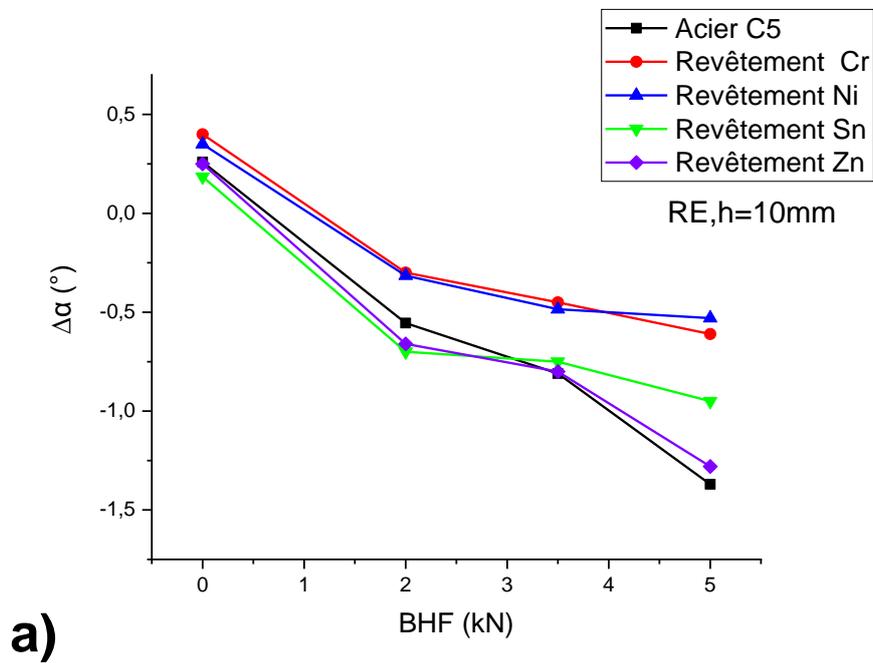
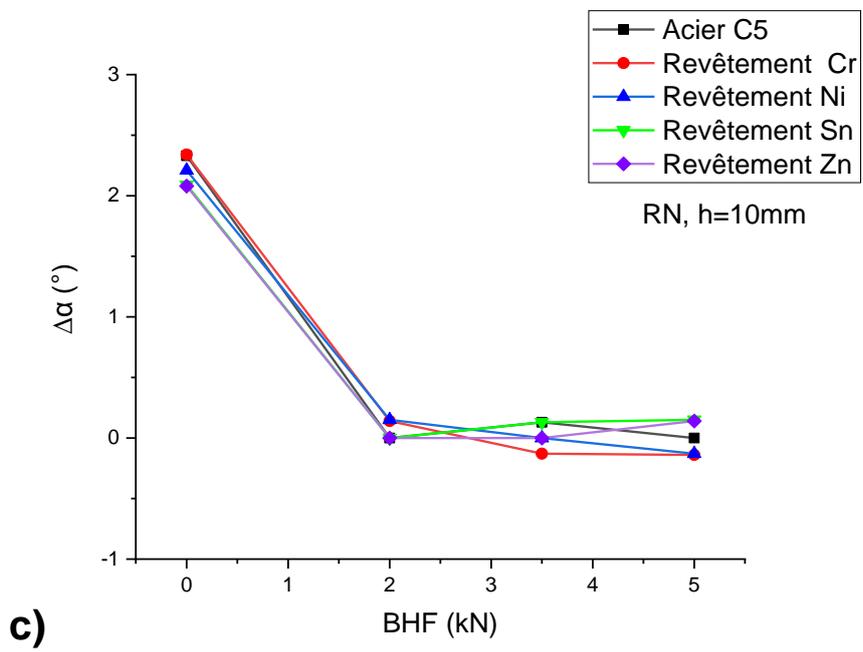
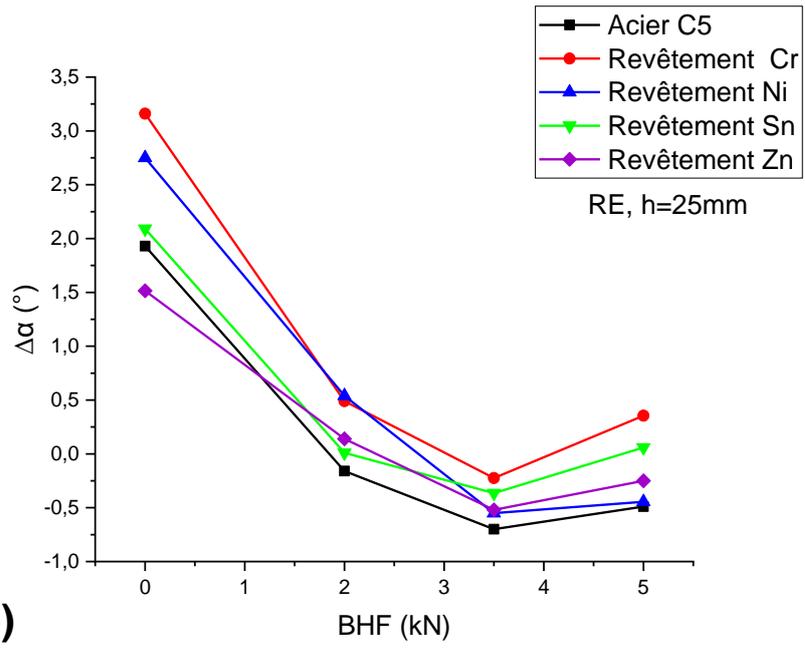


Figure 5. 3.Schéma représentatif explique les déformations sur les différentes zones, dans l'absence et la présence de la BHF.





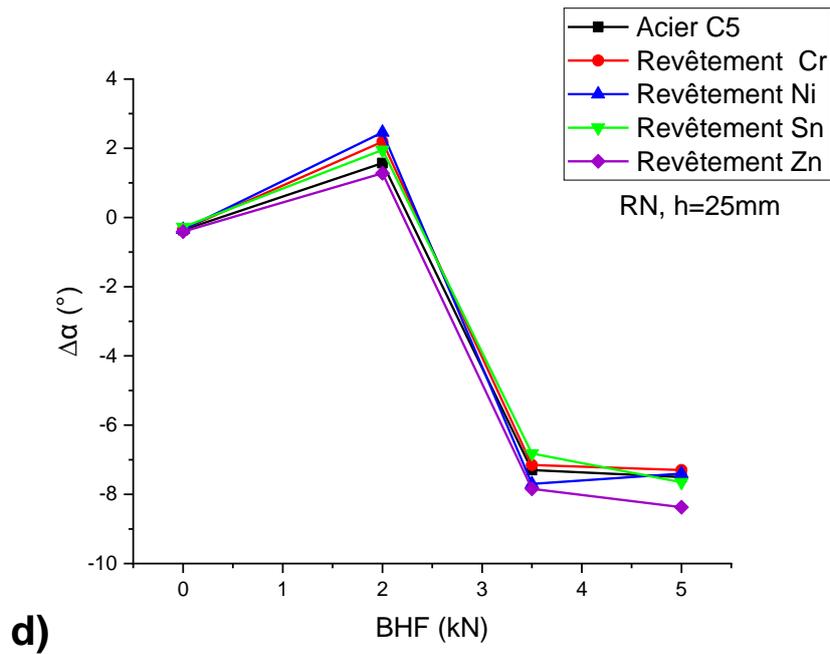


Figure 5. 4. Effet de BHF sur l'angle du retour élastique final aux extrémités ($\Delta\alpha$) d'essai d'étirage-piage en V. (a et b) Courbes expérimentales, (c et d) Courbes de simulation.

Le retour élastique final aux extrémités de l'éprouvette ($\Delta\alpha$) varie aussi en fonction de BHF et du type de revêtement. L'allure des courbes de ($\Delta\alpha$) est similaire à celle des courbes ($\Delta\theta_2$) mais avec des valeurs un peu faibles, **Figure 5.4.a** et **b**. les valeurs ($\Delta\alpha$) des tôles à revêtement en Chrome et Nickel sont toujours plus élevées.

Cependant, les résultats numériques **Figure 5.4.c** et **d** présentent des courbes de $\Delta\alpha=f(\text{BHF})$ quasiment superposés et le ($\Delta\alpha$) tend être presque constant au-delà de 2kN pour un étirage de 10 mm et constant au-delà de 3.5kN pour un étirage de 25mm.

De plus le ($\Delta\alpha$) prend des valeurs négatives en dépassant les 2kN de BHF. **Figure 5.4** D'après les **Figures 5.2** et **5.4**, on constate qu'au cours d'un étirage-piage en V, le retour élastique final de l'angle de pliage ($\Delta\theta_2$) représente des valeurs plus importantes par rapport à l'angle aux extrémités ($\Delta\alpha$).

- Essais en U :

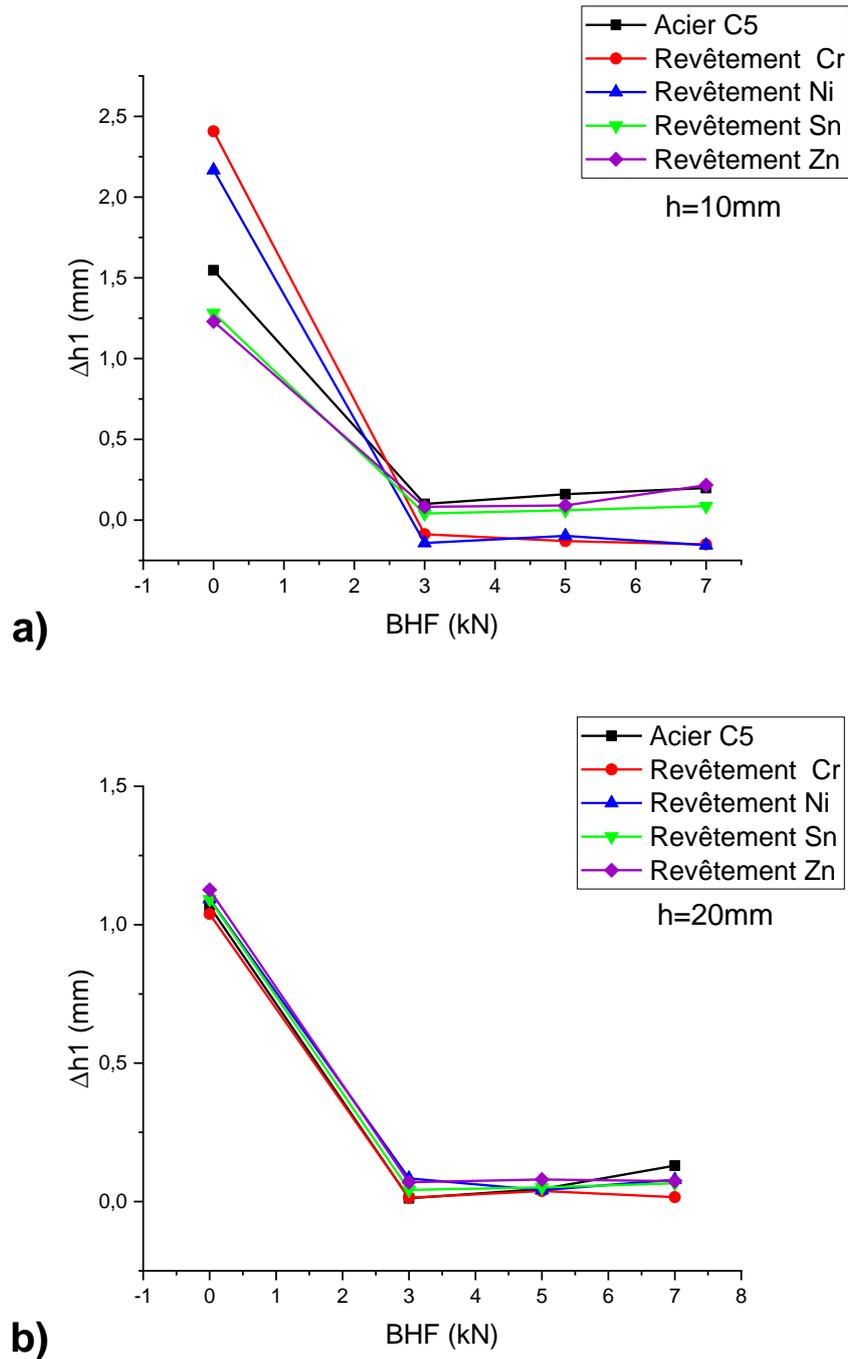


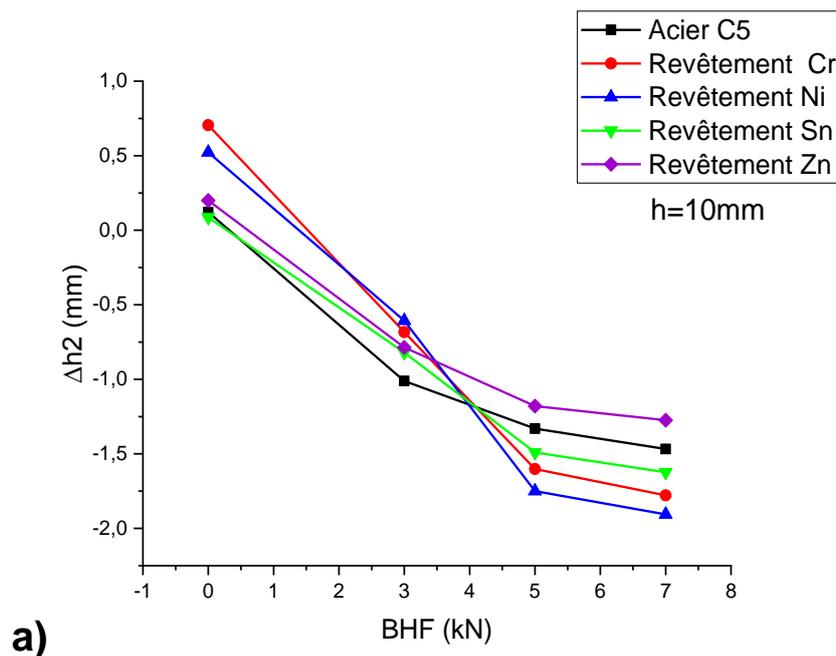
Figure 5.5. Variation du retour élastique primaire (Δh_1) avec la force de serrage pour les différents types des revêtements métalliques d'essai d'étirage-pliage en U. (Courbes expérimentales)

La **Figure 5.5.a** montre que, pour un serrage nul ($BHF=0$), le (Δh_1) est inférieur pour l'acier C5 et les échantillons revêtus en Sn et Zn. Par contre, les échantillons revêtus

en Cr et Ni représentent des valeurs plus élevées. Les mêmes constatations ont été ont été faites pour dans les courbes Δh_2 , **Figure 5.6**. En effet suite à un étirage plus élevé, causé par une force de serrage dépassant 3kN, le retour RE des tôle revêtues en Nickel et chôme change de comportement et prend les valeurs les plus faibles, à cause de la dégradation du revêtement en fragments, produisant ainsi un frottent important.

On observe aussi que le retour élastique sur l'extrémité ($\Delta\alpha$), dans les mêmes essais en U, présente des valeurs comprises entre $-1,3^\circ$ et $1,3^\circ$, (**Figure 5.7.a et b**). Ces valeurs sont considérées plus faibles comparativement à celles dans les **essais en V**.

Au-delà de 3kN de BHF le (Δh_1) prend des valeurs nulles ou négatives particulièrement pour les revêtements rigides en chôme et nickel, (**Figure 5.5.a et b**). Les courbes de (Δh_1) de tous les échantillons ($h=20\text{mm}$) se superposent en descendant.



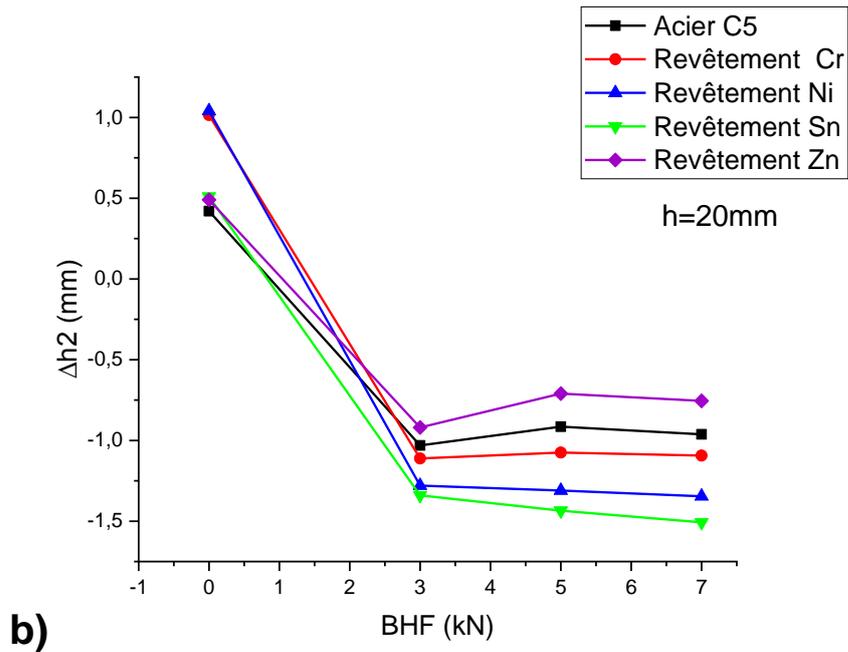
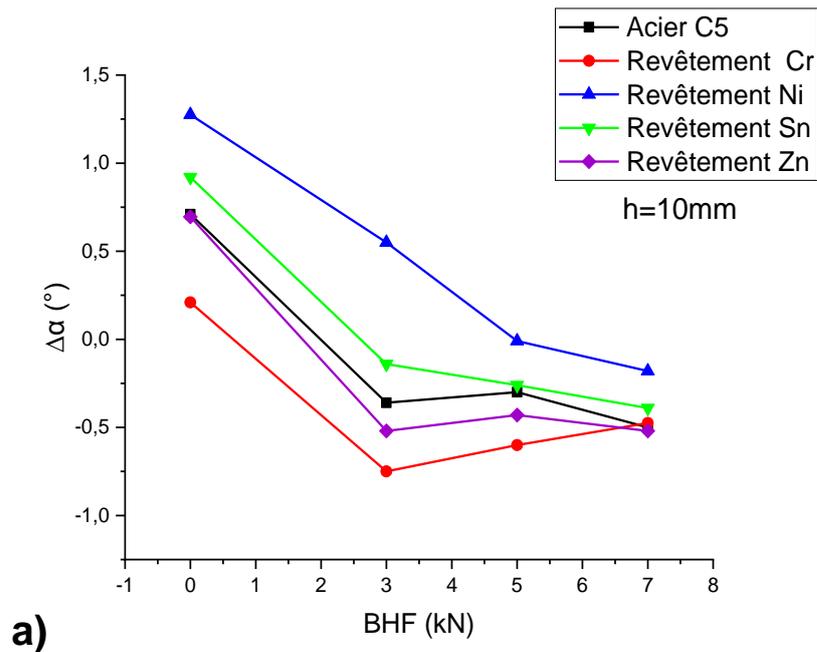


Figure 5. 6. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec la force de serrage pour les différents types des revêtements métalliques d'essai d'étirage-piage en U. (Courbes expérimentales)

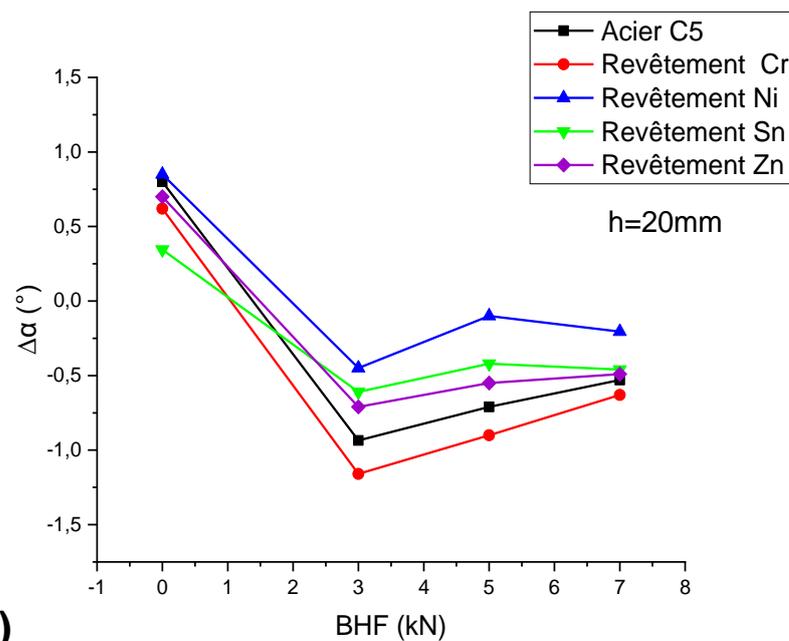
Le retour élastique final (Δh_2) présente une certaine sensibilité à la variation de BHF particulièrement pour des forces de serrage plutôt faibles. Pour l'essai d'étirage-piage en U et à 10 mm de profondeur, le (Δh_2) représente des descentes quasiment linéaire en fonction de BHF. **Figure 5.6.a.**

Pour le cas d'une profondeur d'étirage de 20mm, le (Δh_2) prend des valeurs positives en faible serrage. Alors, à $BHF \geq 2\text{kN}$, il devient négatif avec une certaine stabilisation, **Figure 5.6b**

Le (Δh_2) varie entre -2 et 0.75mm pour $h=10\text{mm}$, et entre -1.5 et 1mm pour $h=25\text{mm}$. Ces résultats sont proches aux résultats de (Cheraghi et al., 2021; Maati, 2016; Ouakdi et al., 2012) sur l'acier, le titane et l'aluminium respectivement.



a)



b)

Figure 5. 7. Effet de BHF sur l'angle du retour élastique final aux extrémités ($\Delta\alpha$) d'essai d'étirage-plier en U. (Courbes expérimentales)

b. Revêtements plastiques et peinture :

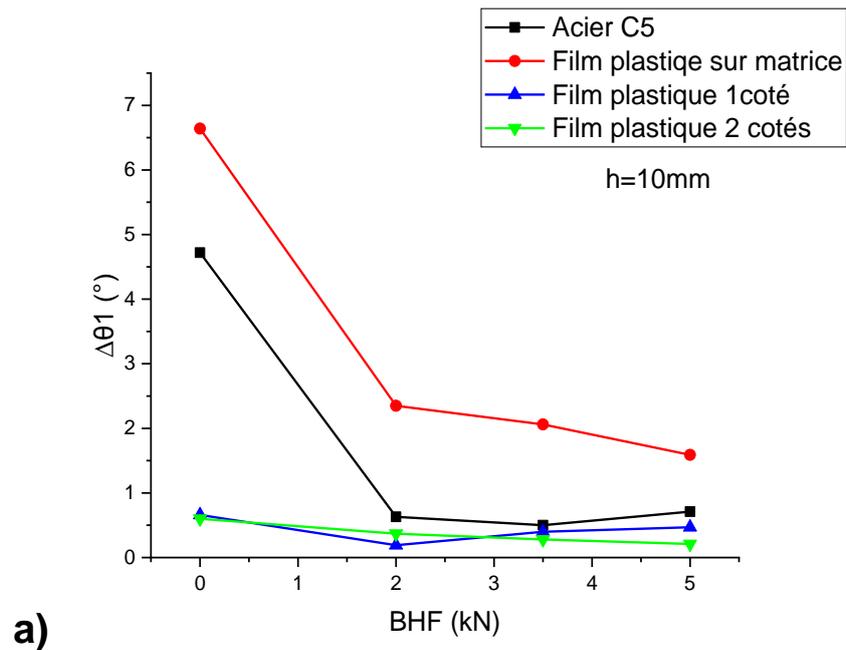
En générale, les films d'emboutissage et les peintures sont toujours adaptés de manière optimale aux exigences de production et protègent de manière fiable les surfaces en acier contre les rayures et les marques pouvant apparaître au cours

d'emboutissages légers ou profonds. L'utilisation de ces films a aussi un impact direct sur la forme finale de l'emboutie et par conséquent sur le retour élastique. Les emboutisseurs utilisent ces films comme moyens de lubrification pour diminuer les frottements et augmenter les limites de formages en évitant ainsi les déchirures prématurées des emboutis.

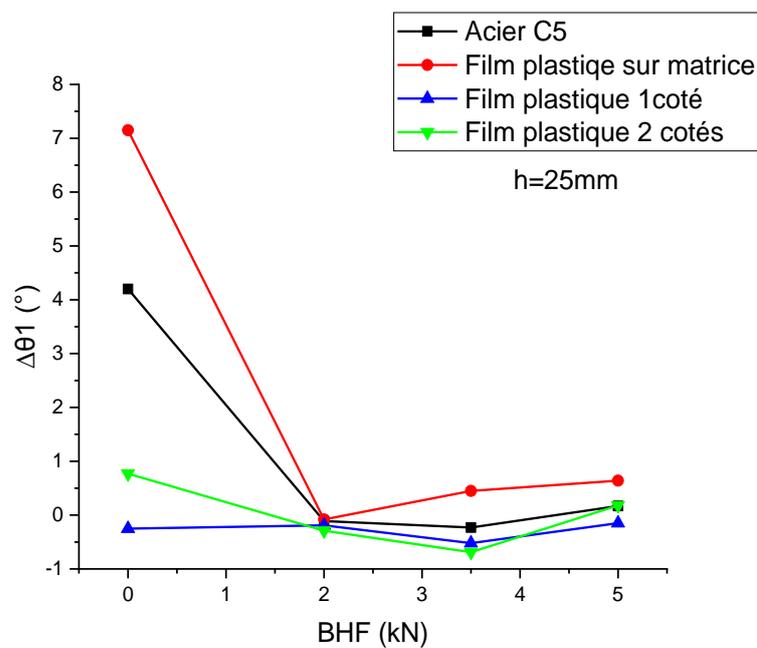
Les essais que nous avons réalisés montrent bien que ces films ont un impact négatif sur le retour élastique. A titre de comparaison entre l'effet des revêtements métalliques et plastiques sur ce phénomène, nous avons posé une couche d'un film plastique autocollant de trois façons différentes : Sur les parois intérieures des outils (matrice et serre flanc), sur une seule puis sur les deux faces de l'échantillon à plier. De l'autre côté, nous avons procédé des essais d'étirage-plier sur l'acier C6 nu et l'acier C6 teinté par peinture cataphorèse. Des essais ont été effectués dans les deux types de formage (U et V).

- **Essais en V :**

D'après la **Figure 5.8**, on remarque que l'utilisation des films plastique sur l'éprouvette donne un R.E primaire ($\Delta\theta_1$) quasiment stationnaire en fonction de BHF. Néanmoins, l'utilisation du film plastique sur l'outillage résulte d'une allure identique à celle d'acier C5. Le ($\Delta\theta_1$) est plus élevé à BHF nulle, et devient stationnaire en dépassant les 2kN de BHF. Ceci est observé pour les deux profondeurs d'étirage appliquées (10 et 25mm).



a)



b)

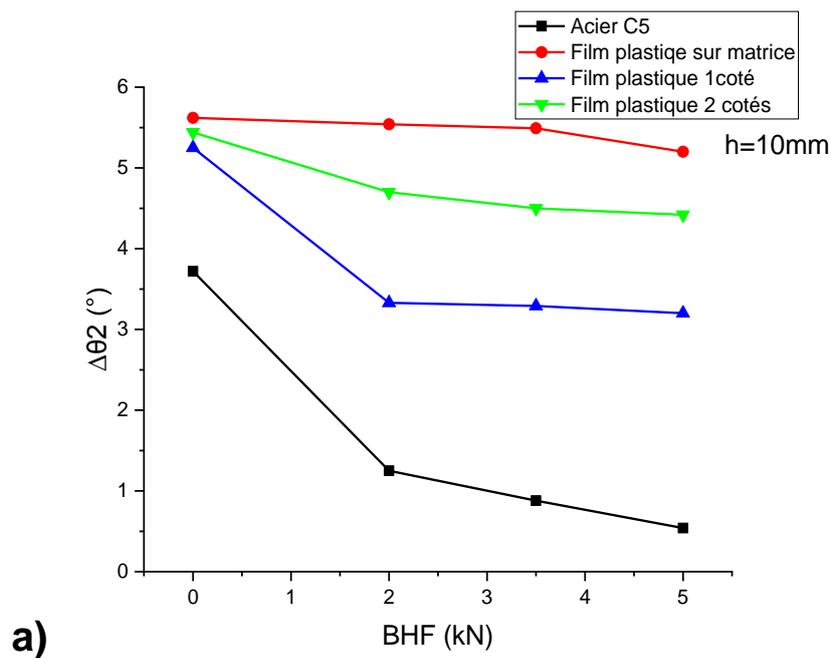
Figure 5. 8. Variation du retour élastique primaire ($\Delta\theta_1$) avec la force de serrage pour les revêtements plastiques d'essai d'étirage-plier en V. (Courbes expérimentales)

Les résultats des **Figures 5.9, 5.10, 5.12** et **5.14** montrent que tous les échantillons à film plastique ou peintes, représentent un R.E finale plus élevé par rapport à ceux nus. Avec l'utilisation d'un film plastique sur l'outillage (matrice et serre flanc), le R.E plus grand et tend vers un état stationnaire quelque soit la BHF appliquée. De plus, le dépôt du film plastique sur une seule face de la tôle, donne un R.E moins que celui sur

les deux faces et sur les outils respectivement (**Figure 5.9, 5.10**). Ceci est dû au fait que l'utilisation du film plastique sur l'outillage et sur une les deux faces de la tôle, minimise le frottement en favorise un glissement facile de la tôle entre la matrice et le serre-flan. D'après (**Coër, 2013**), un faible coefficient de frottement fait aura bien évidemment pour effet d'augmenter le glissement et aura pour effet inverse de diminuer l'effort de mise en forme et par conséquent un R.E important.

Pour tous les revêtements en plastique pris en considération, le RE diminue légèrement avec l'augmentation du serrage. Par contre la diminution de RE est forte pour les tôles nues (de $3,8^\circ$ jusqu'à $0,5^\circ$), **Figure 5.9.a**. Alors que le RE, représenté par $(\Delta\theta_2)$, est stable vers la valeur ($5,5^\circ$) en augmentant BHF jusqu'à 5kN.

En ce qui concerne la grande profondeur d'étirage (25mm), la diminution de RE est observée pour tous les revêtements **Figure 5.9.b**.



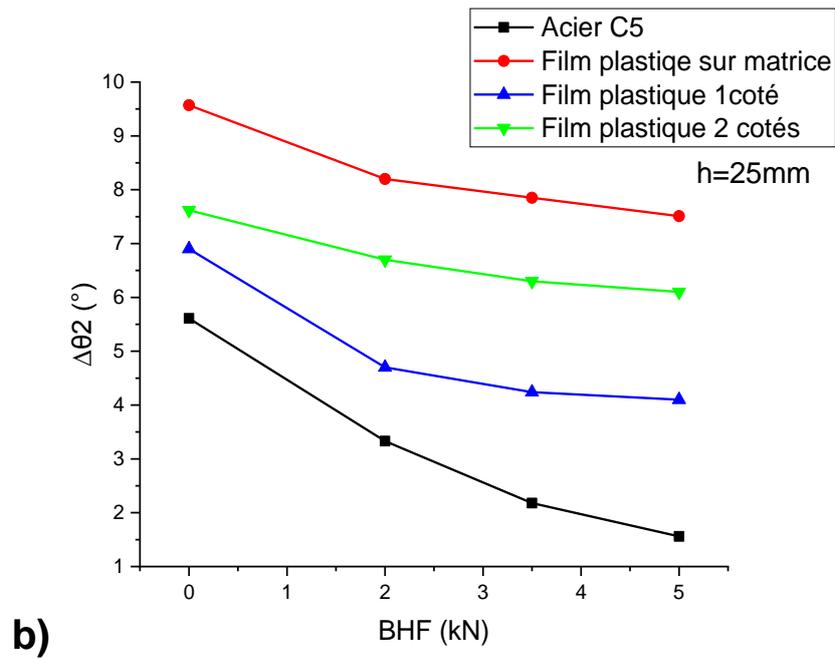


Figure 5. 9. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) avec la force de serrage pour les revêtements plastiques d'essai d'étirage-pliage en V. (Courbes expérimentales)

Les mêmes observations ont été faites sur l'étude du retour élastique ($\Delta\alpha$) sur les extrémités des éprouvettes à près desserrage totale (Figure 5.10). Ceci explique l'existence d'un lien directe entre ($\Delta\alpha$) et ($\Delta\theta_2$).

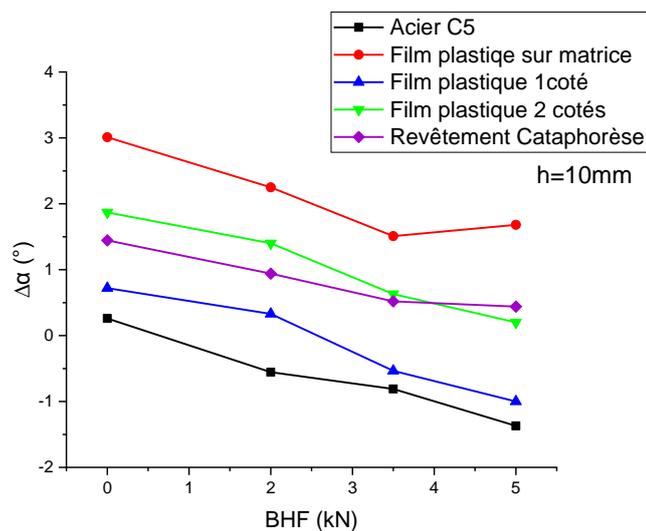


Figure 5. 10. Effet de BHF sur l'angle du retour élastique final aux extrémités ($\Delta\alpha$) d'essai d'étirage-pliage en V. (Courbes expérimentales)

❖ Effet de la peinture cataphorèse.

Le revêtement par peinture a un effet similaire à celui des films plastiques. Le retour RE primaire ($\Delta\theta_1$) est presque stable vers la valeur «Zéro» et sans influence particulière du serrage dans le cas des essais en V, figure 5.11, tandis que la situation est différente dans les essais en U où ce même type (Δh_1) diminue graduellement avec l'augmentation du serrage, figure 5.13.

Le retour élastique final ($\Delta\theta_2$, Δh_2) diminue généralement avec l'augmentation de la force de serrage, avec une plage de variation plus grande dans le cas du pliage en V (entre 9° et 2°), figure 5.12, alors que les valeurs de cette plage sont jugées très faibles lorsqu'on plie en U (0,7mm à -1,5mm), figure 5.14.

Sur les mêmes figures nous avons observé aussi que le retour élastique primaire est plus faible sur les tôles avec peinture comparativement à des tôles C6 nues. Par contre le retour élastique final ($\Delta\theta_2$, Δh_2) évolue inversement, sachant qu'il est plus élevé dans le cas des tôles peintes. On note que le retour élastique primaire évolue en sens inverse par rapporte au retour élastique final. Cette constatation a été faite par (Ouakdi et al., 2012).

- Essais en V

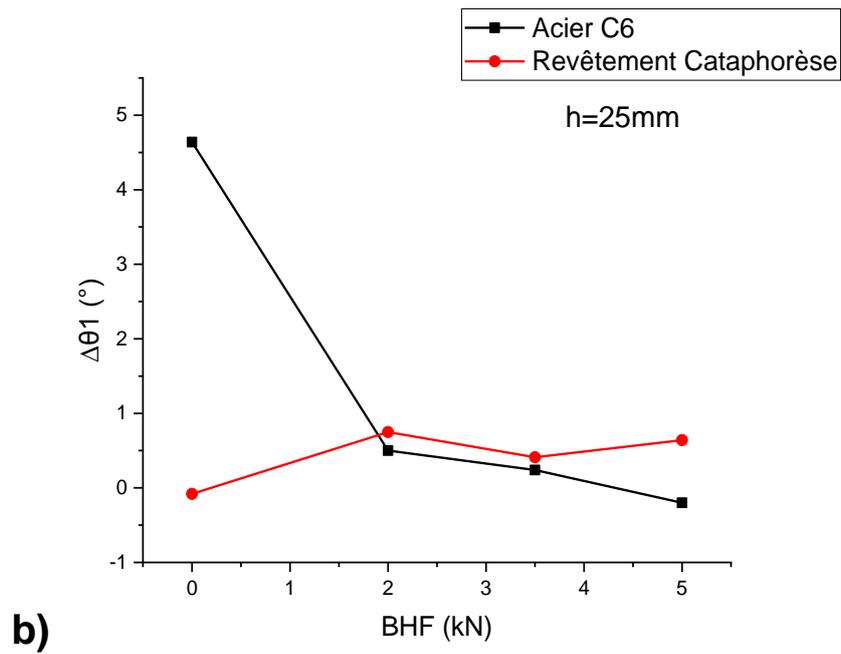
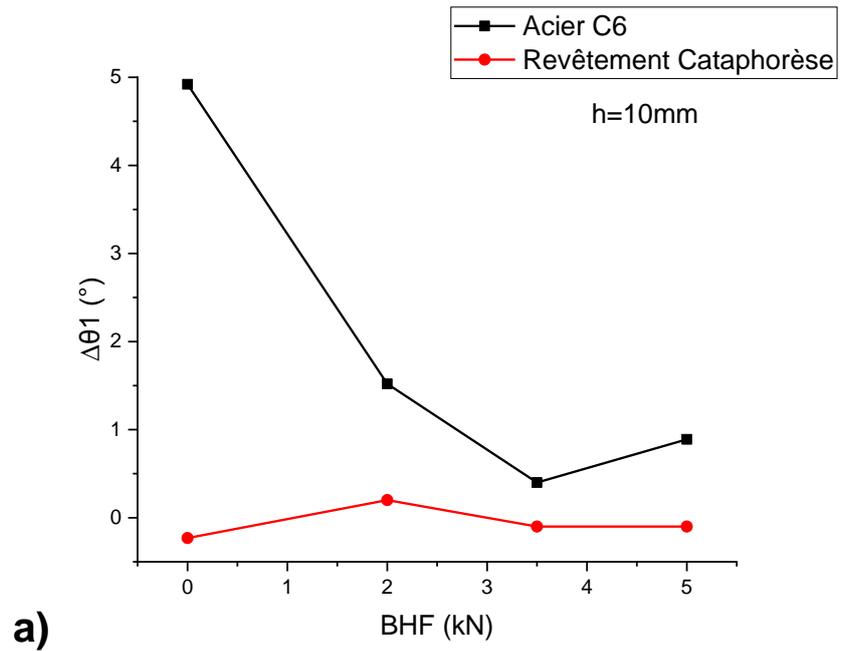


Figure 5. 11. Variation du retour élastique primaire ($\Delta\theta_1$) en fonction de la force de serrage pour revêtement par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-plier en V à deux profondeurs d'étirage. (Courbes expérimentales)

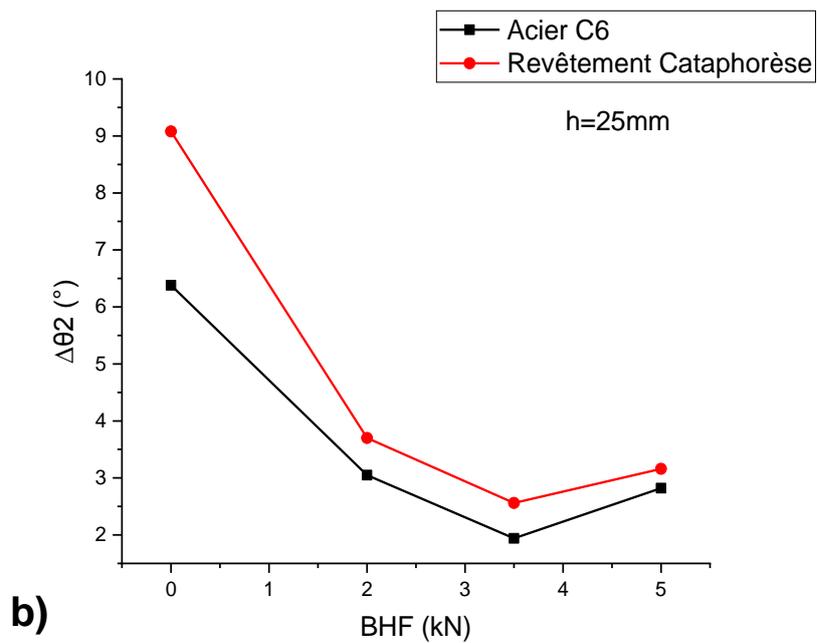
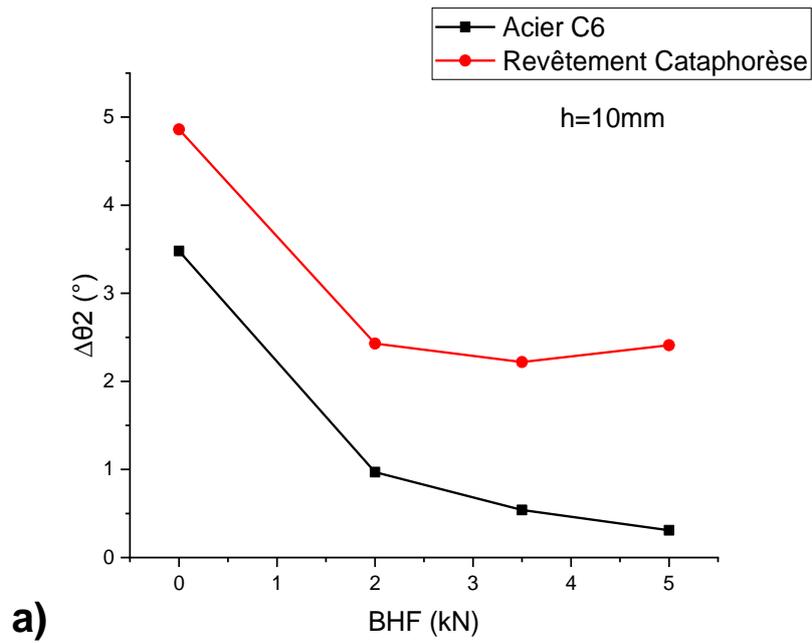
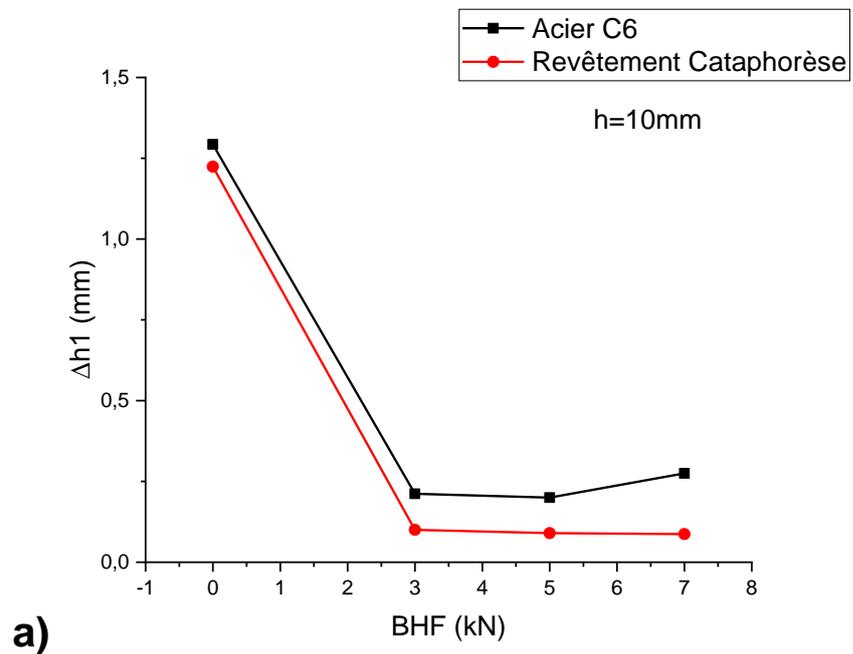
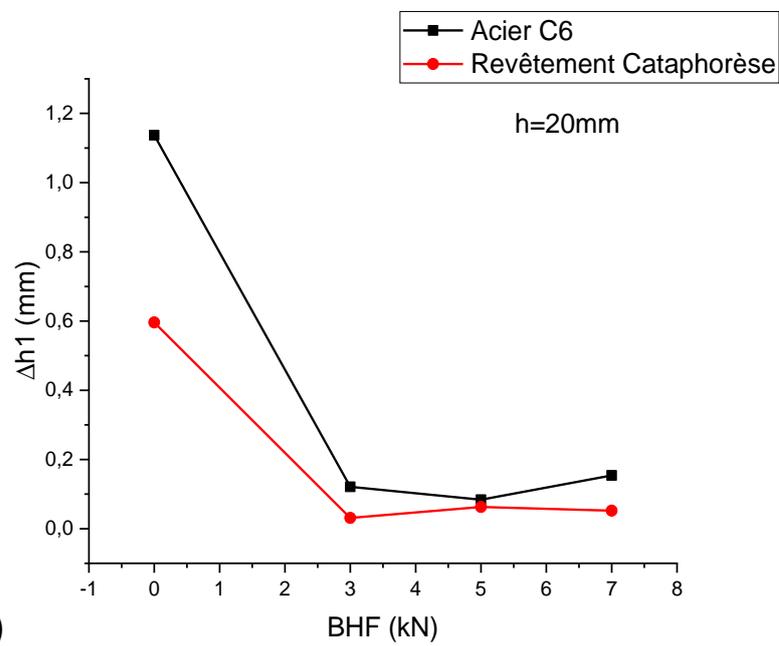


Figure 5. 12. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) en fonction de la force de serrage pour revêtement par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-plier en V à deux profondeurs d'étirage. (Courbes expérimentales)

- Essai en U :

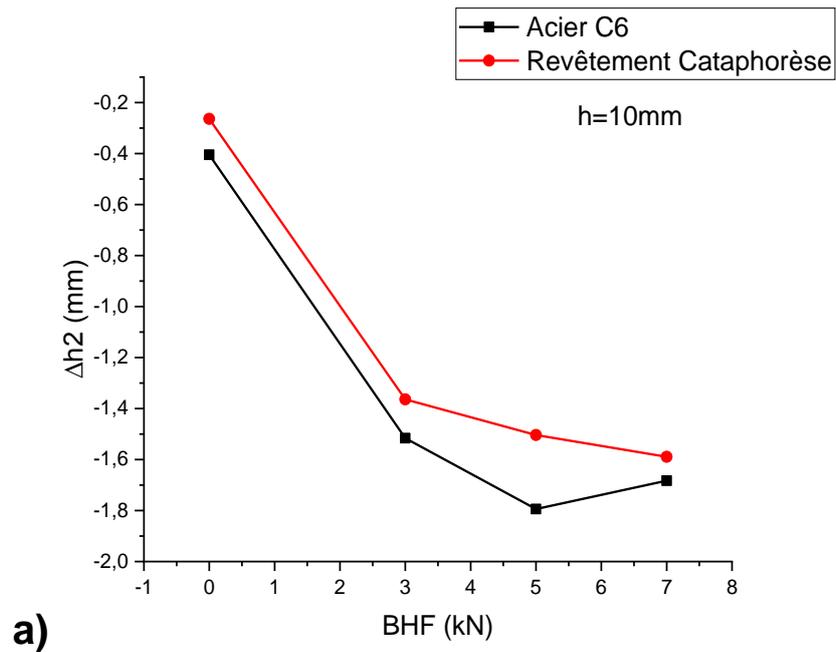


a)

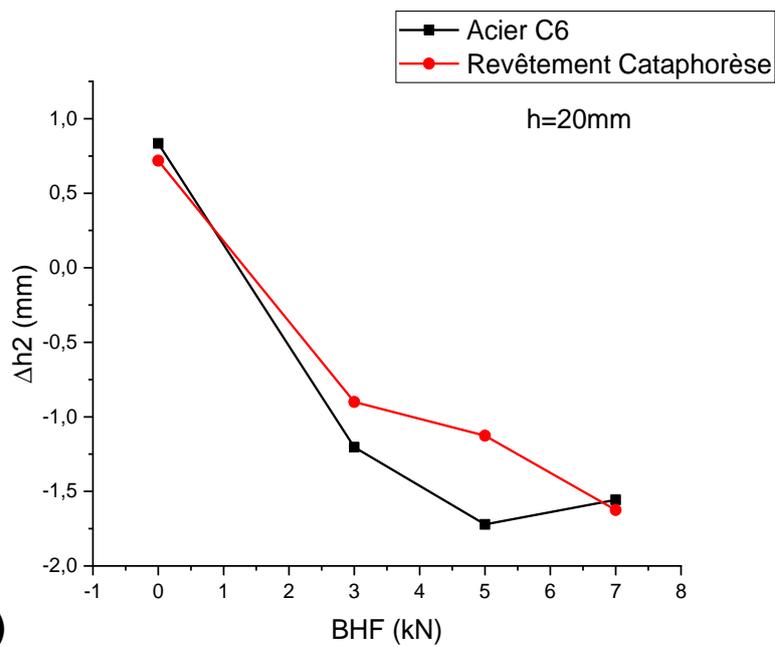


b)

Figure 5. 13. Variation du retour élastique primaire (Δh_1) avec la force de serrage pour revêtements par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-pliage en U à deux profondeurs d'étirage. (Courbes expérimentales)



a)



b)

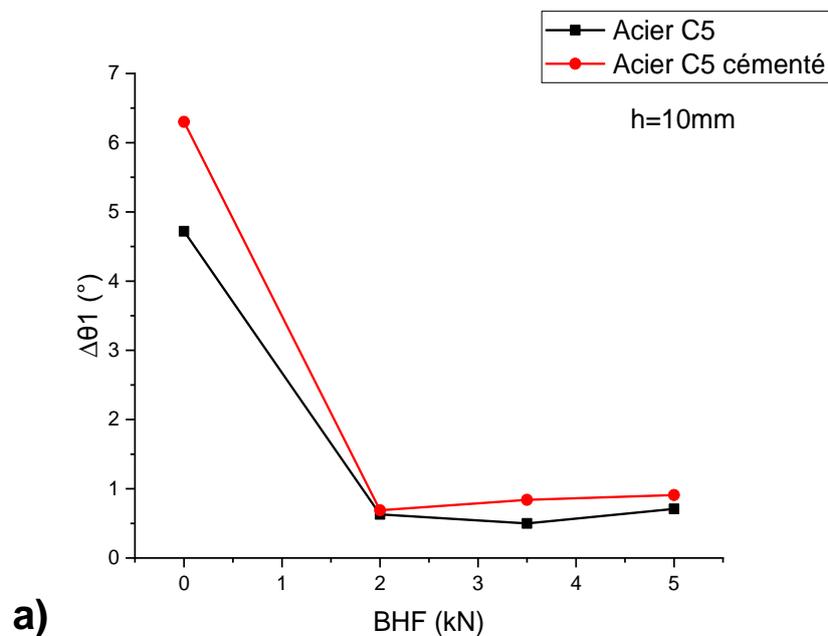
Figure 5. 14. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec la force de serrage pour revêtements par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-plier en U. (Courbes expérimentales)

c. Cémentation :

Les échantillons cimentés préalablement à température 900° pendant 3 heures, sans trempe, sont répartis en deux types essais d'étirage-plierage (V et U). En faisant une analyse des résultats obtenus, on observe en premier lieu un rapprochement des valeurs du retour RE des éprouvettes traitées (cimentées) et des éprouvettes non traitées, particulièrement dans le cas du retour élastique primaire des essais en V et U, figures 5.15 et 5.18.

Le retour élastique final, représenté par ($\Delta\alpha$, $\Delta\theta_2$ et Δh_2), apparaît plus élevé dans le cas des éprouvettes traitées par rapport à celles non traitées, figures 5.16, 5.17 et 5.19. Cela est dû au fait qu'il y'a un changement des propriétés et du comportement mécanique de la couche externe des éprouvettes par un traitement de cémentation. D'après (Alsaadi, 2017), (Gupta, 1974) a étudié l'investigation des comportements mécaniques d'aciers doux cimentés à différentes plages de température de 850, 900 et 950 °C et il a constaté que le simple traitement thermique améliore considérablement la dureté, la résistance à la traction des aciers doux.

• Essai en V :



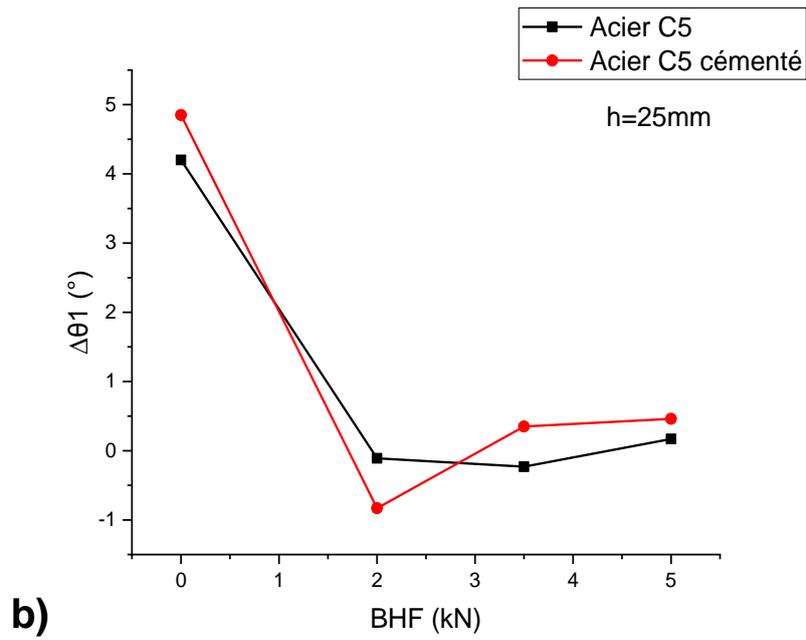
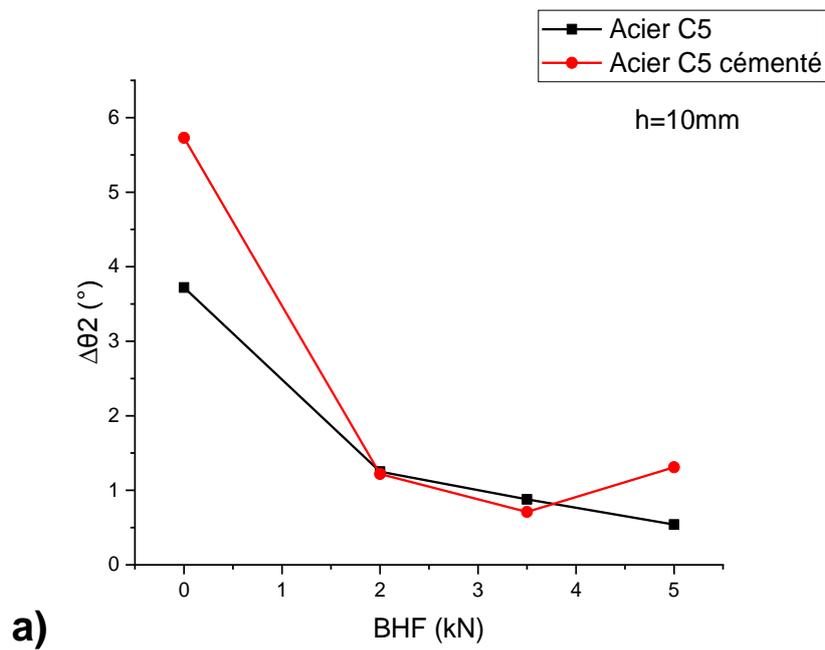


Figure 5. 15. Variation du retour élastique primaire ($\Delta\theta_1$) en fonction de la force de serrage pour acier cimenté d'essai d'étirage-pliage en V. (Courbes expérimentales)



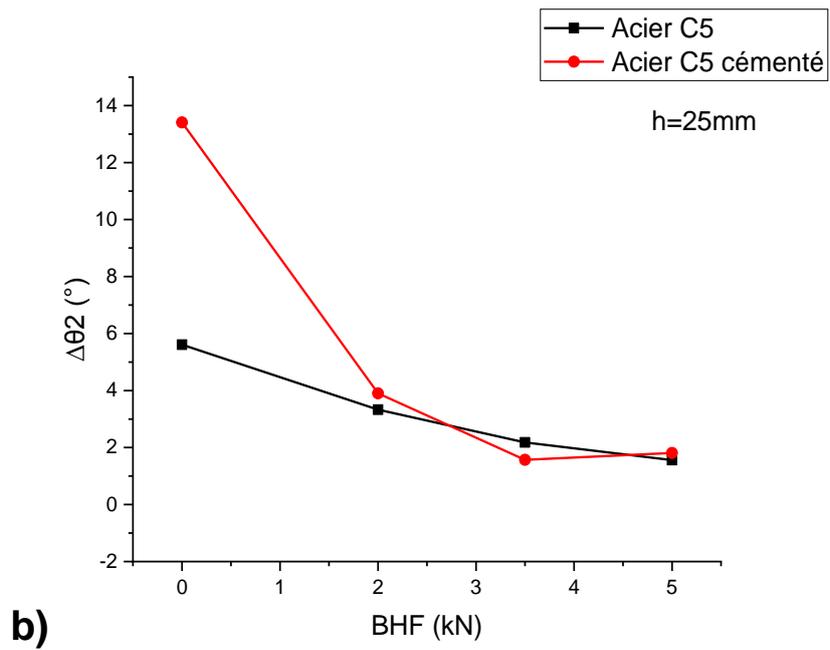
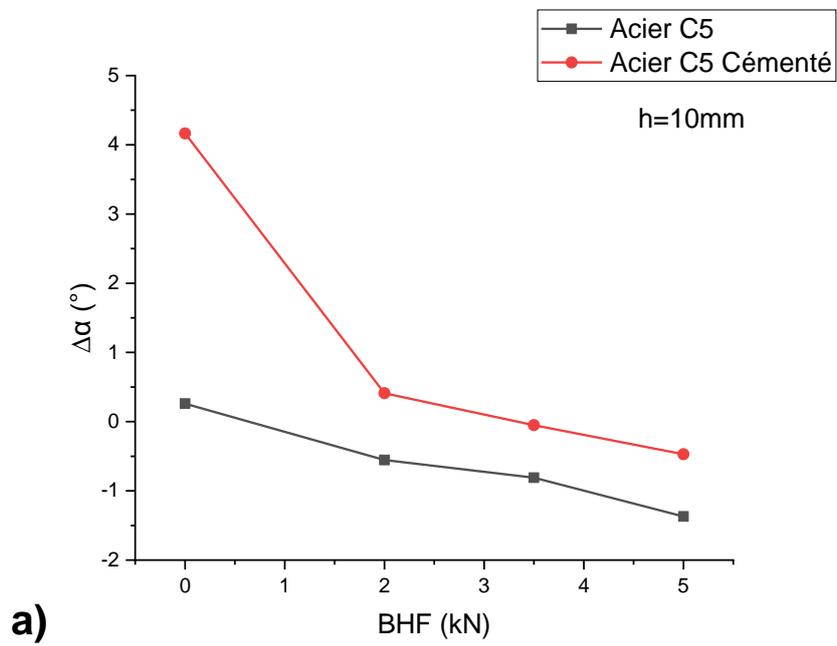


Figure 5. 16. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) en fonction de la force de serrage pour acier cimenté d'essai d'étirage-plier en V. (Courbes expérimentales)



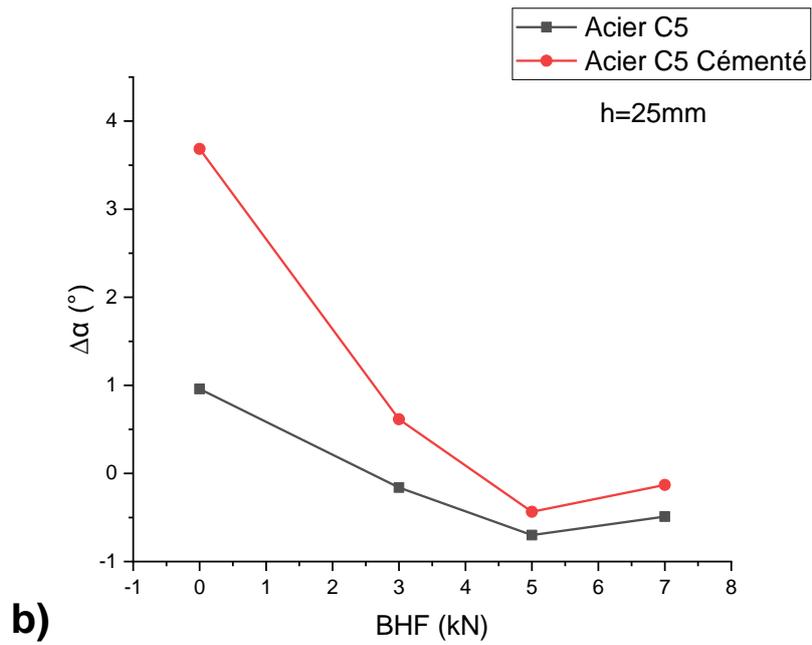
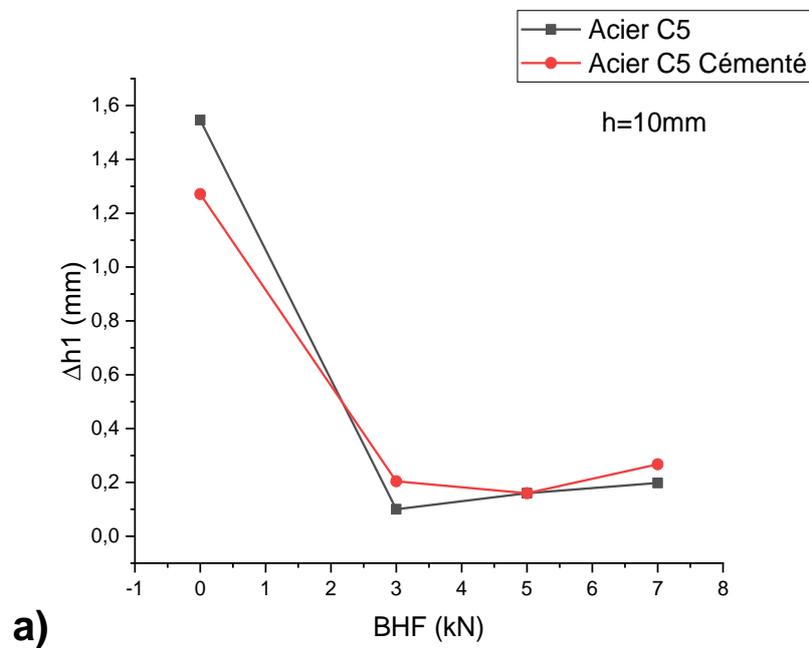


Figure 5. 17. Variation du retour élastique final aux extrémités ($\Delta\alpha$) en fonction de la force de serrage pour acier cémenté d'essai d'étirage-pliage en V à deux profondeurs d'étirage. (Courbes expérimentales)

- **Essai en U :**



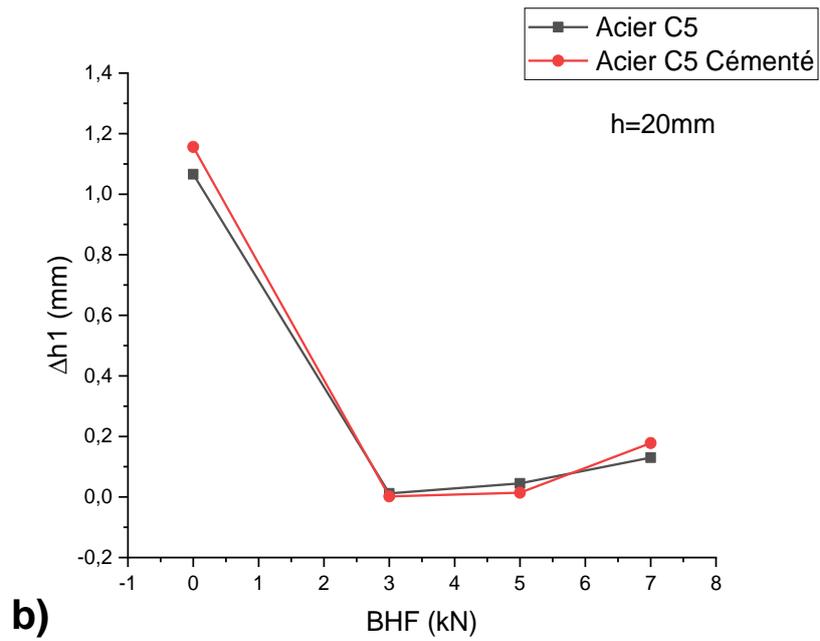
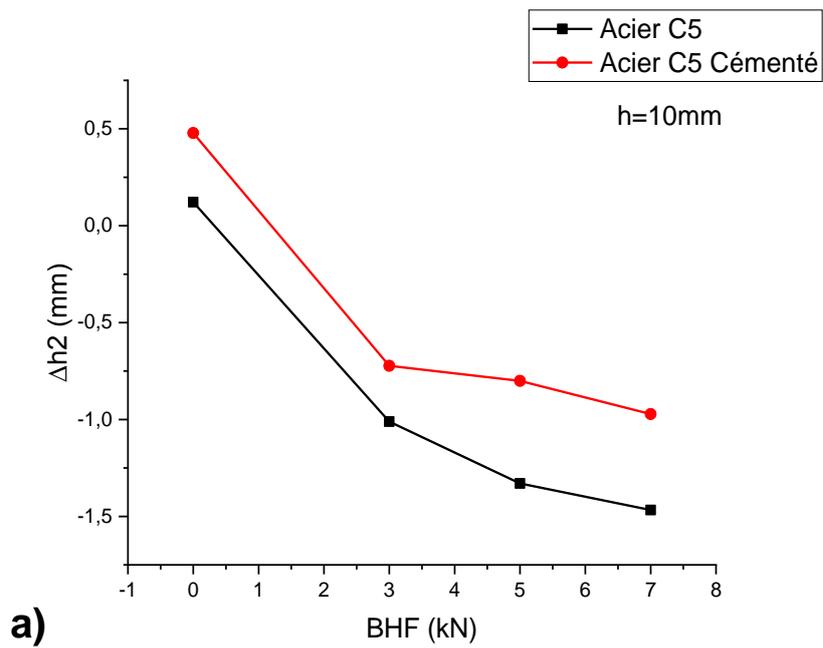


Figure 5. 18. Variation du retour élastique primaire (Δh_1) avec la force de serrage pour acier cémenté d'essai d'étirage-pliage en U. (Courbes expérimentales)



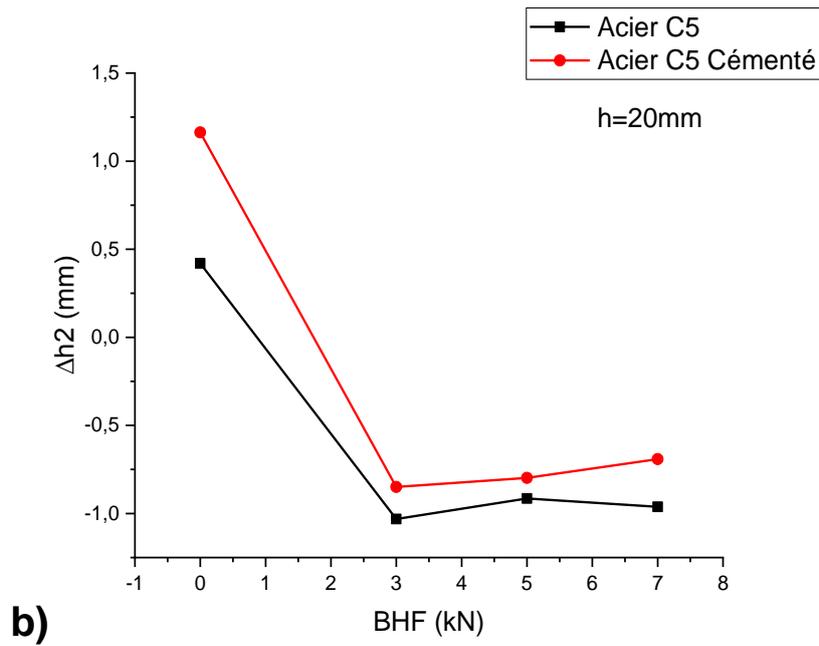


Figure 5. 19. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec la force de serrage pour acier cémenté d'essai d'étirage-plierage en U. (Courbes expérimentales)

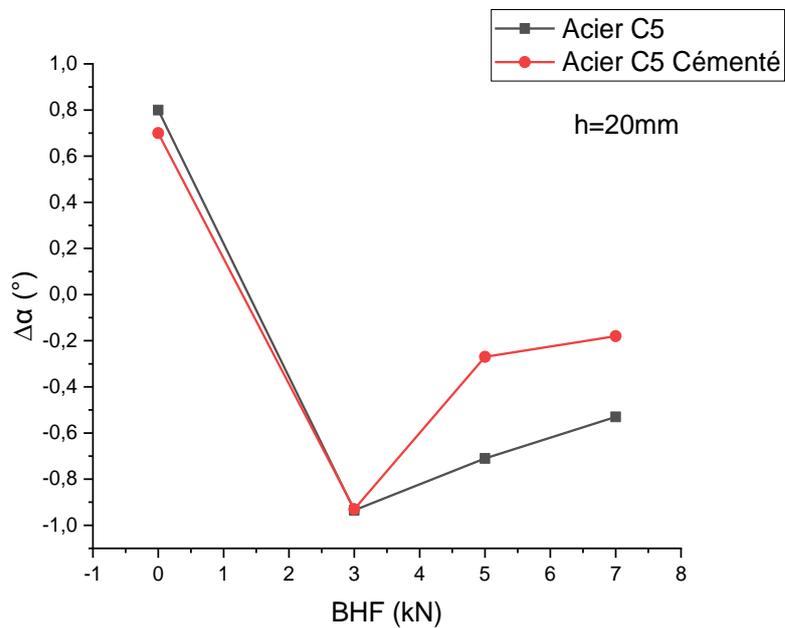


Figure 5. 20. Variation du retour élastique final aux extrémités ($\Delta\alpha$) avec la force de serrage pour acier cémenté d'essai d'étirage-plierage en U. (Courbes expérimentales)

5.3. Effet de l'épaisseur du revêtement sur le retour élastique :

Afin d'étudier l'impact de l'épaisseur du revêtement sur le R.E final, nous avons déposé différents revêtements métalliques (Chrome, Nickel, Etain et Zinc) sur les échantillons à plier, d'où les épaisseurs des revêtements varient entre 4 et 13 μ m. Les essais sont effectués pour deux formes d'étirage-plier en V et U.

Les **Figures (5.21-5.26)** montrent bien que les tôles non revêtues exhibent un retour élastique plus petit. (**Chan & Wang, 2001**), ont considéré que ce phénomène est lié aux propriétés mécaniques du revêtement. Le module de Young des tôles non revêtues est plus grand que celui des tôles revêtues.

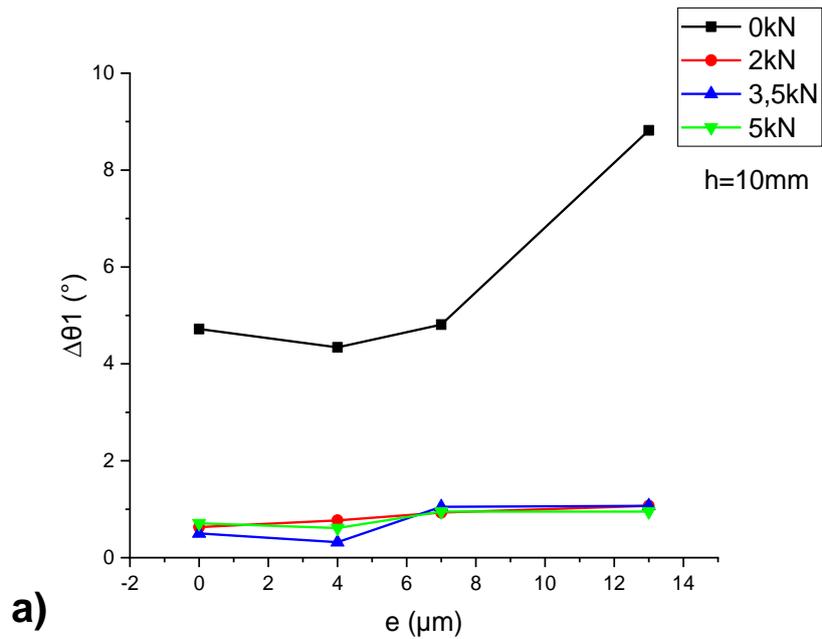
A BHF 0, le retour élastique primaire $\Delta\theta_1$ et final en angle $\Delta\theta_2$ (plier V) et en profondeur Δh (étirage-plier en U), augmente fortement avec l'augmentation de l'épaisseur du revêtement pour deux profondeurs d'étirage 10 et 25 mm. Ceci est dû à l'effet du frottement du revêtement durant le processus du pliage, plus la couche est plus épaisse plus le frottement diminue et devient la source d'augmentation du retour élastique. D'après (**Luo, 2009**), la force de liaison est influencée par l'épaisseur du revêtement et la résistance de liaison. Cela veut dire qu'un revêtement épais peut induire une diminution de la force de liaison en raison d'une contrainte résiduelle élevée, ces contraintes se redistribuent pour obtenir un nouvel équilibre dans la pièce, ceci induit un retour élastique plus grand.

Le ($\Delta\theta_2$) varie entre 4° et 10° (pour h=10mm) et entre 6° et 13° (pour h=25mm). Ces résultats sont proches aux ceux de (**Vasudevan et al., 2011**) en utilisant des éprouvettes en acier revêtue en nickel sur un dispositif de pliage en l'air.

Au-delà de 2 kN de BHF, et dans l'essai d'étirage-plier en V, aux deux profondeurs d'étirage de 10 et 25 mm (**Figures 5.21-5.23**), les valeurs de R.E ($\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$, $\Delta\alpha$) tendent à être plus proches en augmentant légèrement. Par contre dans l'essai en U et aux profondeurs de 10 et 20 mm, (**Figures 5.24, 5.25**), le R.E (Δh_1 , Δh_2) diminue au fur et à mesure que l'épaisseur du revêtement augmente. Cette diminution vient pour deux raisons : la surface de contact tôle/matrice est plus importante relativement à celle du système (V). Les épaisseurs de revêtement les plus élevés correspondent au

chrome et au nickel qui sont tous deux fragiles et leur rupture sera la source de frottements qui réduisent le retour élastique. Par contre, en l'absence de serrage (BHF=0) la flexion domine au détriment de l'étirage. Cette situation garde l'état de revêtement intact sans endommagement permettant ainsi un grand retour RE.

- **Essai en V:**



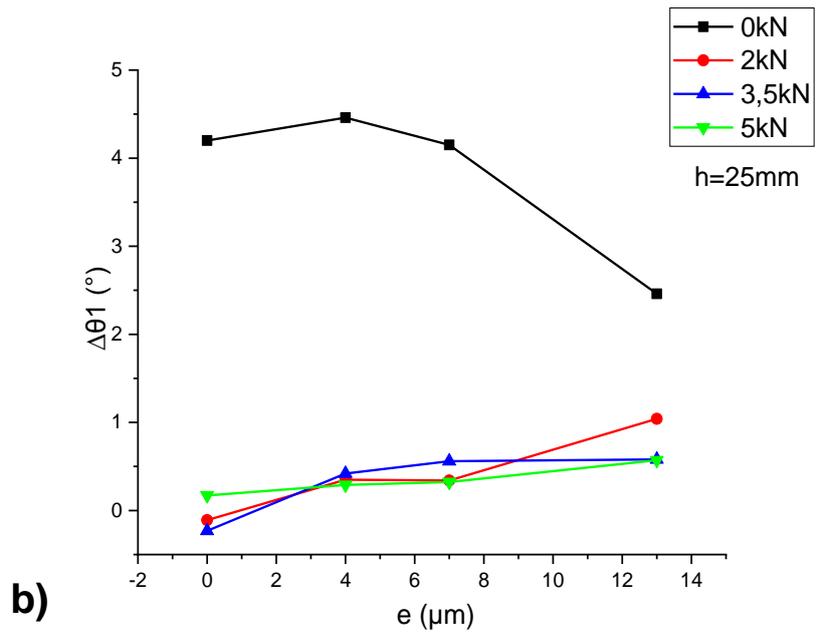
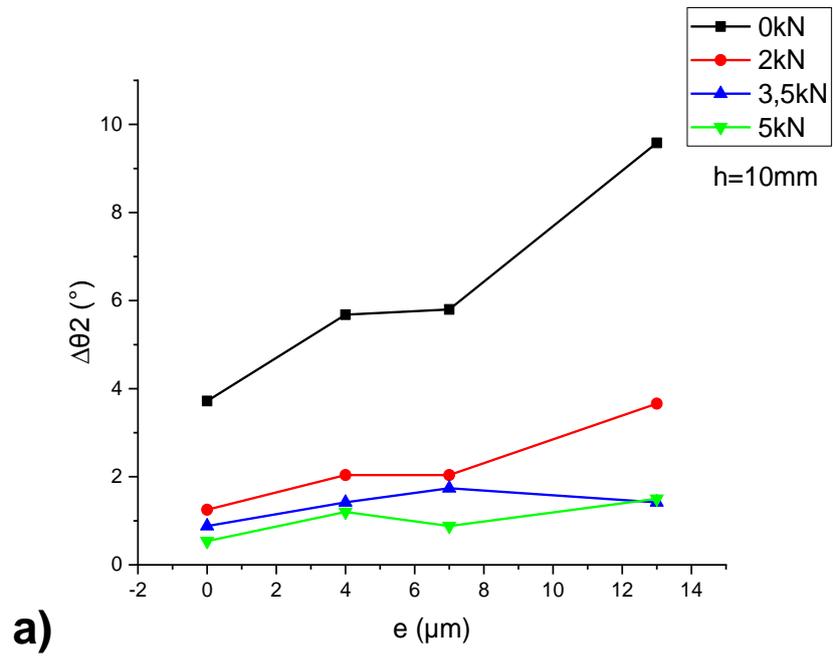


Figure 5. 21. Variation du retour élastique primaire ($\Delta\theta_1$) avec l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-plier en V.



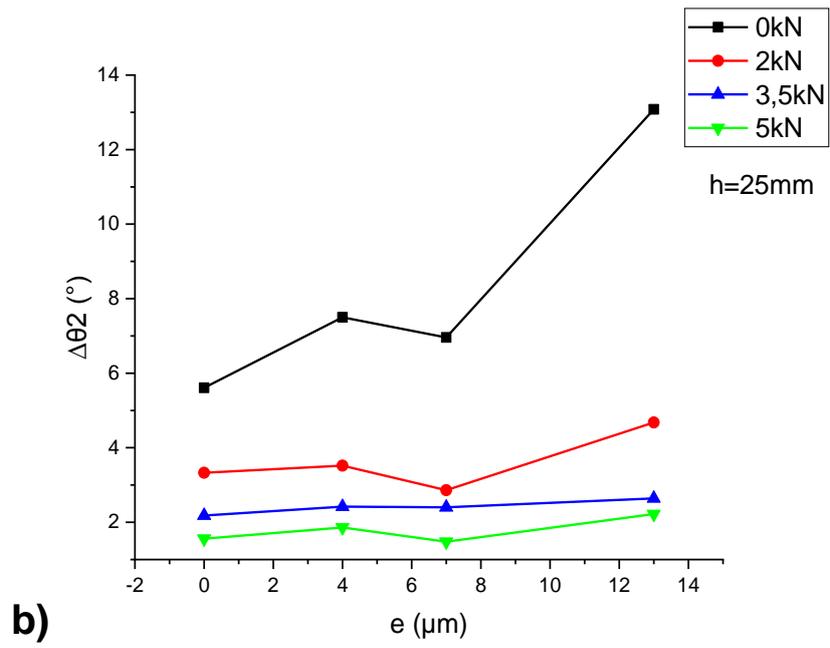
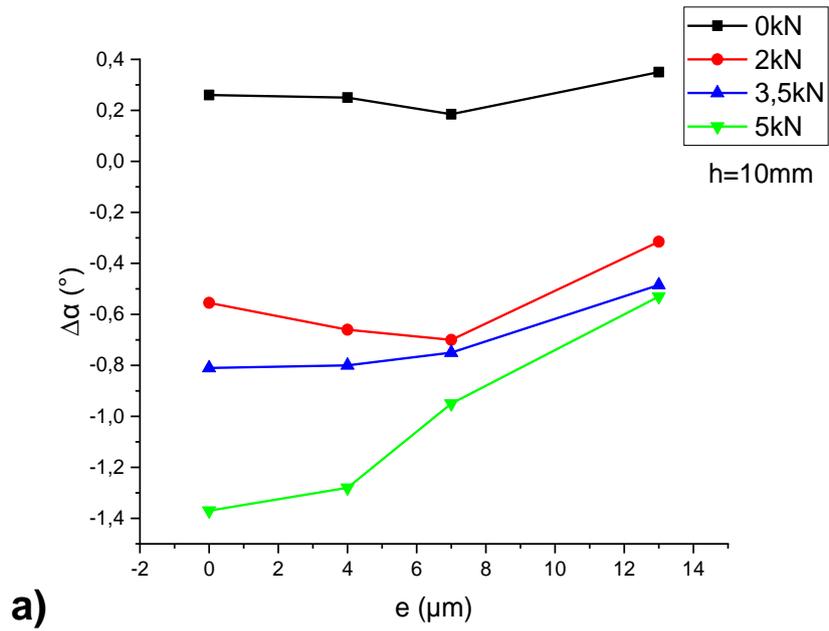


Figure 5. 22. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) avec l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-plier en V. (Courbes expérimentales)



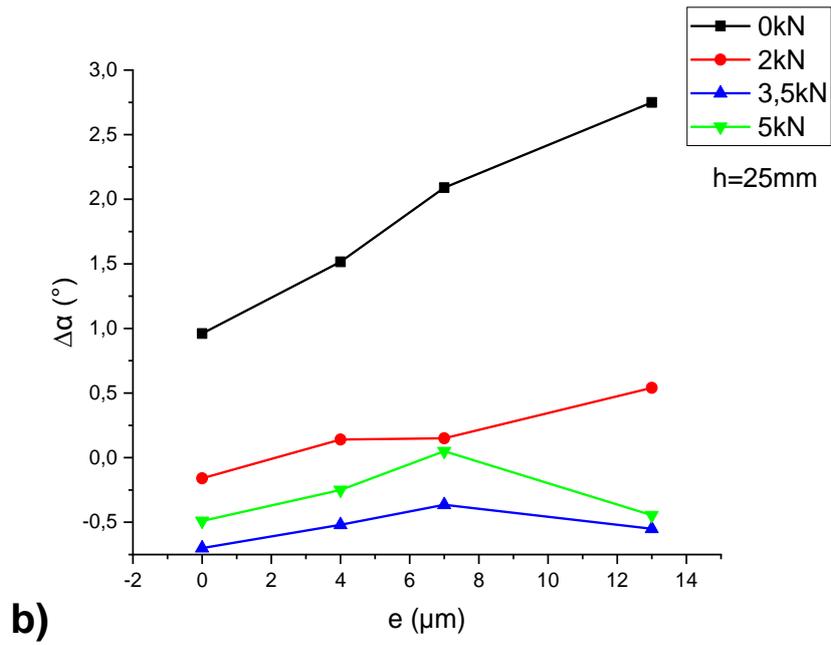
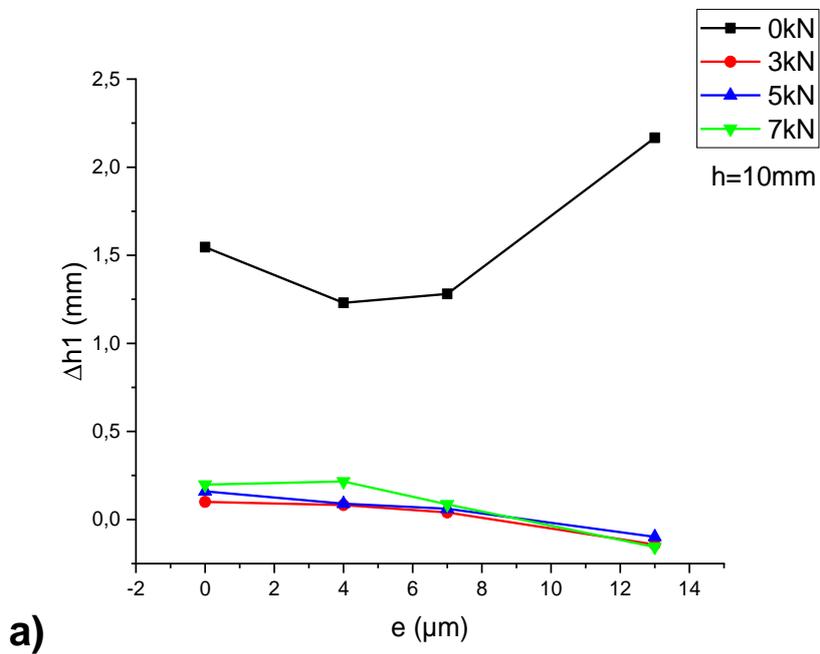


Figure 5. 23. Variation du retour élastique final aux extrémités ($\Delta\alpha$) avec l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-plier en V. (Courbes expérimentales)

- **Essai en U :**



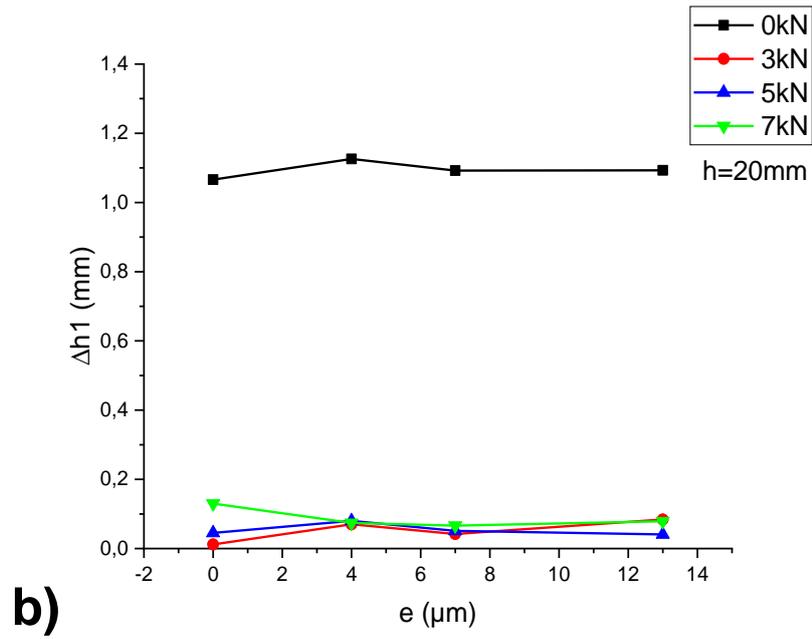
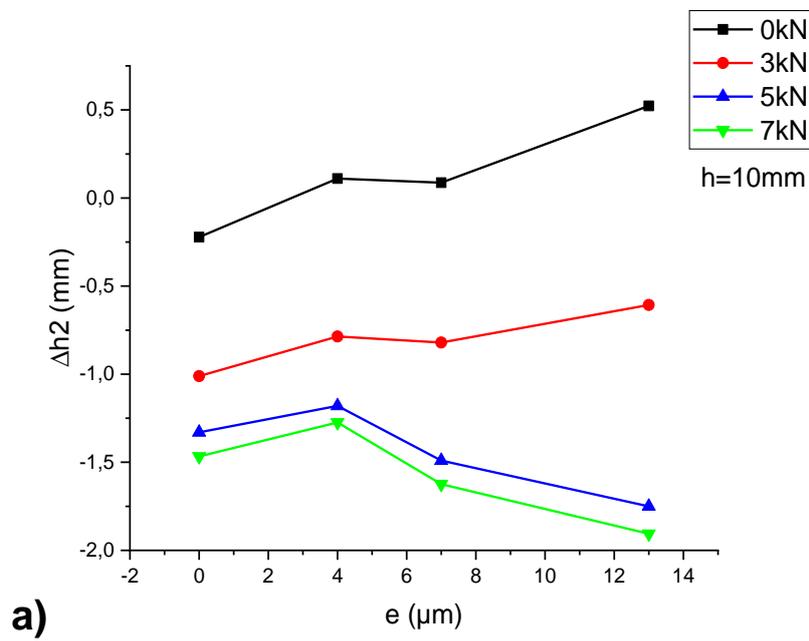


Figure 5. 24. Variation du retour élastique primaire (Δh_1) avec l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-pliage en U. (Courbes expérimentales)



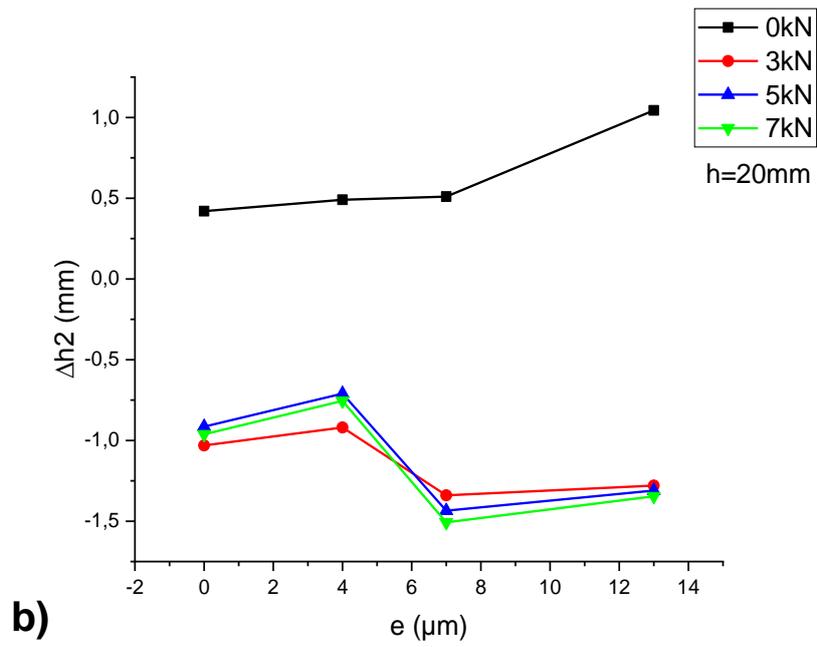
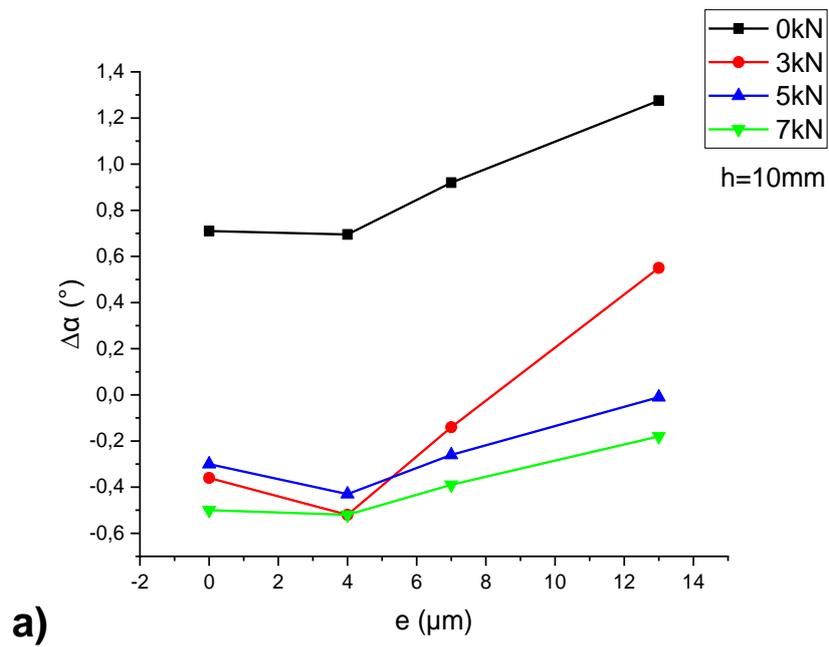


Figure 5. 25. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-plier en U. (Courbes expérimentales)



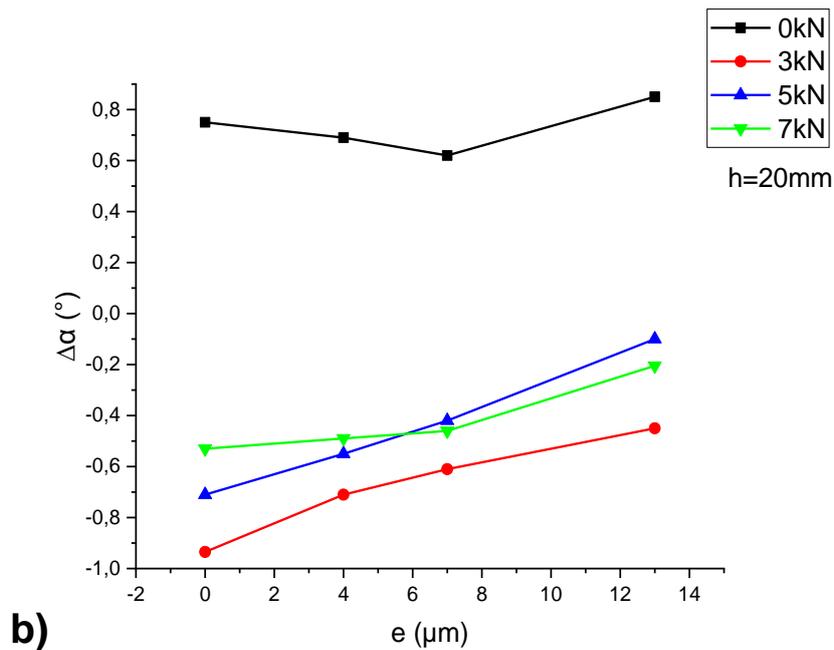


Figure 5. 26. Variation du retour élastique final aux extrémités ($\Delta\alpha$) l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-plier en U. (Courbes expérimentales)

5.4. Effet de la profondeur d'étirage sur le retour élastique :

Le déplacement du poinçon (profondeur d'étirage) est considéré comme le facteur le plus important affectant le R.E. Afin de bien évaluer son impact sur ce phénomène, nous avons effectué une série d'essais d'étirage-plier en deux forme U et V, en utilisant des profondeurs d'étirage de (10, 15, 20 et 25 mm) pour l'essai en V et (10, 15 et 20mm) pour l'essai en U. en prenant en considération les échantillons à revêtements métalliques, plastiques, teintés et cimentés.

a. Revêtements métalliques :

Pour ce type de revêtement on s'est contenté de présenter uniquement le retour élastique final $\Delta\theta_2$ et Δh_2 , montré dans les figures 5.27 et 5.28.

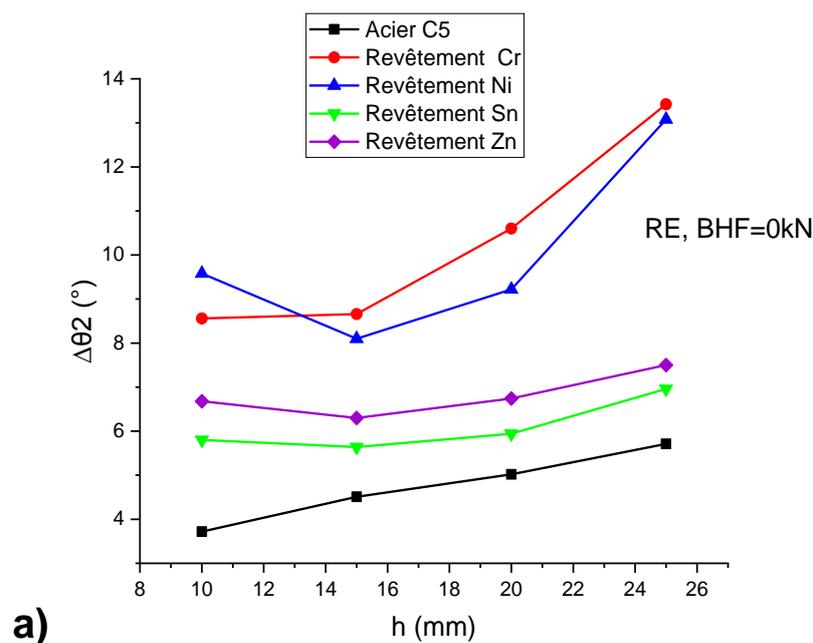
- **L'essai en V :**

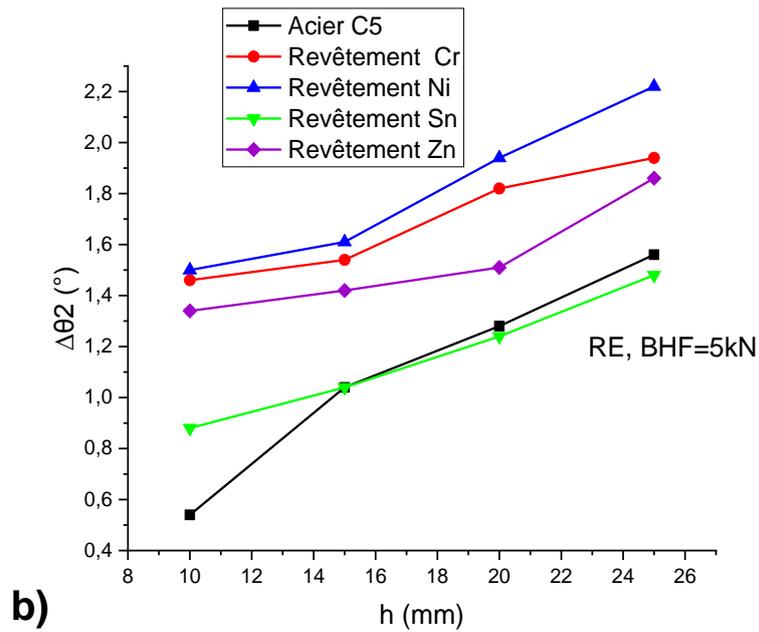
Les essais en V montrent bien que toute augmentation de profondeur d'étirage provoque une augmentation du retour élastique $\Delta\theta_2$ ceci concorde bien avec les résultats de (Srinivasan et al., 2013; Vasudevan et al., 2011). Ce retour élastique

angulaire provient principalement de la diminution de l'angle sous la pointe du poinçon durant le chargement (Figure 5.34), où les deux couches de la tôle (supérieure et inférieure) varient inversement. En effet la différence de comportement en traction et compression entre les deux couches avec l'augmentation de la profondeur h fait l'ouverture de l'angle V après décharge.

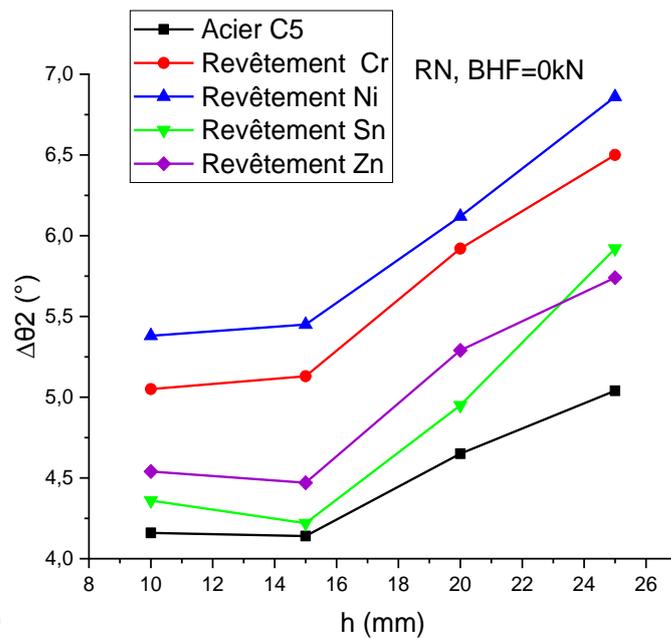
La présence du revêtement, particulièrement par le Nickel et le chrome, améliore la rigidité et la résistance des deux couches. Ceci intensifie le retour élastique par rapport aux revêtements doux (Sn, Zn) et par rapport aux éprouvettes nues. Un affaiblissement du retour est observé dans le cas d'étirage sous un grand serrage des extrémités, sachant que $\Delta\theta_2$ ne dépasse pas $2,2^\circ$, figure 5.27.b. En absence de serrage où la flexion domine le retour atteint les valeurs de 13° , figure 5.27.a.

Les courbes obtenues par simulation, figure 5.27.c ont les mêmes évolutions que celles réalisées expérimentalement, figure 5.27.a, et les valeurs, qui concernent les éprouvettes nues, sont de même ordre de grandeurs où elles changent entre 4 et $5,5^\circ$. Par contre les valeurs de simulation des éprouvettes revêtues sont inférieures à celles obtenues par les essais expérimentaux. Ceci est logique du fait de l'hétérogénéité qu'existe entre les deux comportements de la tôle et du revêtement. Dans ce cas le problème devient plus complexe pour assurer une bonne simulation.





b)



c)

Figure 5. 27. Effet de la profondeur d'étirage (h) sur l'angle final du R.E ($\Delta\theta_2$), pour les différents types des revêtements métalliques, durant l'essai d'étirage-piage en V. (a et b) Courbes expérimentales, (c et d) Courbes de simulation

- **Essai en U :**

La **figure 5.28. (a et b)** montre que toutes les courbes, avec et sans revêtements métalliques, avec et sans serrage, présentent une évolution identique et similaire,

sachant que les valeurs de Δh_2 fait une augmentation avec la profondeur h puis une baisse lorsque cette quantité h dépasse une certaine valeur (15mm). En effet, pour une petite profondeur, le comportement en U est identique à celui du V parce que le retour évolue au niveau des deux courbures du poinçon, mais après une certaine profondeur les deux courbures citées (poinçon) évoluent très peu, conduisant à la stagnation du retour élastique de ces dernières. A cette profondeur moyenne (15mm) le retour élastique des parties courbées de la matrice, intervient par la suite dans la diminution du retour élastique global, notamment avec le soulèvement des deux extrémités de l'éprouvette comme c'est présenté sur la **figure 4.13**. D'autre part le soulèvement de ces extrémités est expliqué par la valeur négative du retour élastique de son angle correspondant ($\Delta\alpha \leq 0$) en particulier pour une grande profondeur ($h=20\text{mm}$) et une force de serrage BHF dépassant **3kN**, figure **5.7**.

Dans un essai sans serrage sur des tôles à revêtement résistants (Ni et Cr) on observe aussi un R.E. est élevé comparativement à celui du revêtement avec (Zn et Sn) et celui des éprouvettes nues. Pour les essais avec serrage (BHF=7kN) la situation est différente et le R.E. est plus faible pour le revêtement résistants (Ni et Cr), **figure 5.28.b**. Cet affaiblissement du retour élastique dans ce dernier cas est dû à la dégradation de la couche fragile du Chrome et Nickel (multi-striction) sous l'effet d'étirage (voir figure **4.15**), produisant ainsi une surface très rugueuse et un frottement

important. Les valeurs du retour sont faibles et négatives.

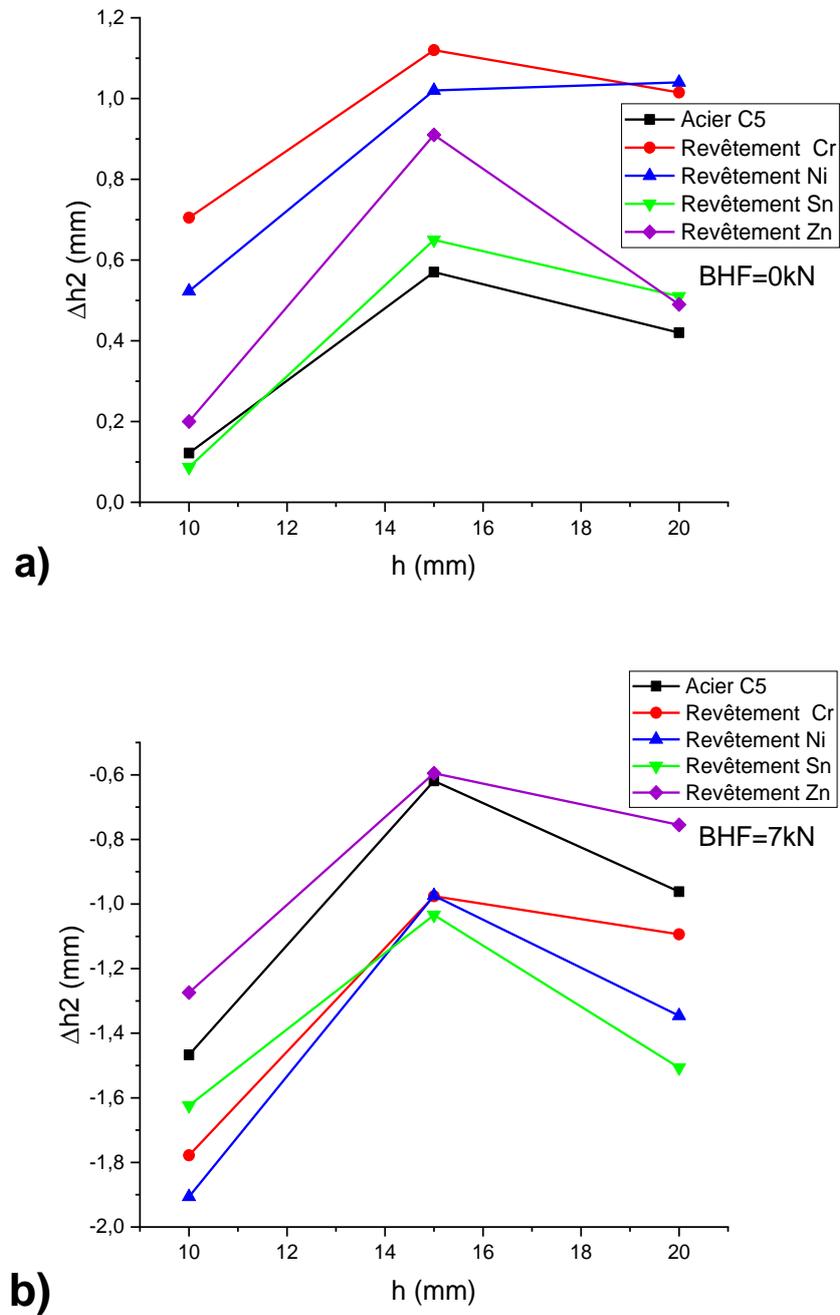


Figure 5. 28. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec la profondeur d'étréage pour les différents types des revêtements métalliques d'essai d'étréage-piage en U. (Courbes expérimentales)

b. Revêtements plastiques et peinture :

L'évolution des courbes du retour élastique des tôles à revêtement plastique est identique à celles à revêtement métallique. Cette fois-ci le revêtement plastique induit une augmentation particulière du retour élastique où sa valeur peut atteindre ($\Delta\theta_2=9,5^\circ$) dans les cas extrêmes (BHF=0, h=25mm), **figure 5.29.a**. Cette valeur est presque le double par rapport à celle dans le cas d'une éprouvette nue et dans les mêmes conditions ($\Delta\theta_2=5,5^\circ$). En réalité nous avons présenté les résultats pour les trois types de revêtement où les valeurs du R.E. sont supérieures à celles des éprouvettes nues. Les plus grandes valeurs sont notées dans le cas du revêtement de la matrice qui est considéré, selon nos observations, comme un revêtement le plus stable. Le serrage du serre flan a légèrement affaiblit le retour élastique (de $9,5^\circ$ à $7,5^\circ$) vu le glissement important que peut créer ce revêtement plastique de la matrice. Alors qu'en absence du revêtement la réduction du retour élastique sous l'effet du serrage est plus importante (de $5,5^\circ$ à $1,5^\circ$). Par contre il n'y a pas une diminution significative du retour élastique en faisant un serrage des éprouvettes revêtues par des films en plastique et notamment pour les grandes profondeurs d'étirage ($h \geq 20\text{mm}$), **figures 5.29. (a et b)**.

La peinture cataphorèse a rôle prépondérant dans le formage. Les emboutisseurs utilisent souvent les tôles peintes pour assurer un bon glissement de ces dernières et éviter ainsi les déchirures prématurées des emboutis, mais cette peintures n'est pas sans inconvénients, car elle favorise un grand retour élastique, particulièrement dans les essais à faibles serrage. Nos résultats, obtenus sur des essais d'étirage-plier en **V**, permettent de confirmer cette constatation, **figure 5.30**. Le retour élastique atteint 9° en absence de serrage, alors que ce dernier permet de le limiter à 3° . La différence entre ces deux valeurs est considérable. On peut conclure que le serrage réduit considérablement le retour élastique durant le formage des tôles peintes.

Les essais en **U** montrent la variation de Δh_2 qui augmente d'une façon semi-linéaire avec la profondeur **h** pour la tôle en acier C6 et pour tôle peinte de même acier. Cette linéarité est vue uniquement dans les essais sans serrage (BHF= 0) et la marge de

variation est restreinte (de **-0,4mm** à **+0,8mm**) pour une profondeur allant jusqu'à 20mm, **figure 5.31.a**. Alors que pour un serrage de $BHF = 7\text{kN}$, la marge de variation de Δh_2 des éprouvettes peintes est encore très restreinte (de **-1,65mm** à **-1,5mm**), **figure 5.31.b**.

- Essai en V

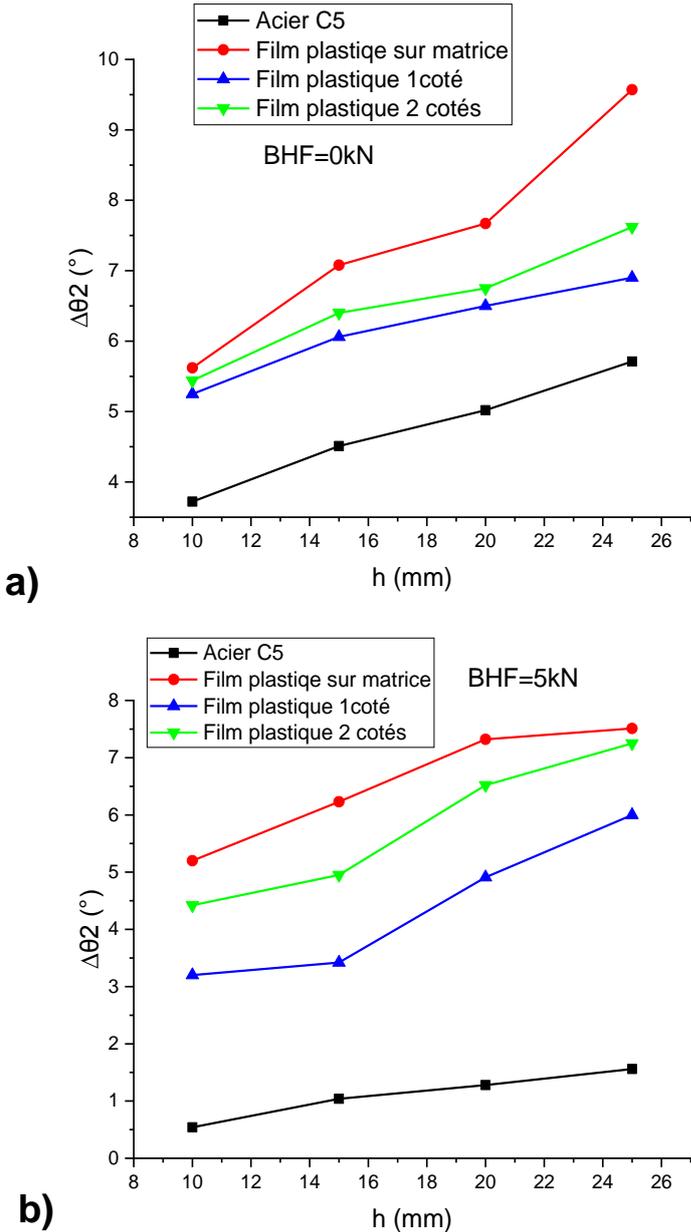


Figure 5. 29. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) avec la profondeur d'étirage pour les revêtements plastiques d'essai d'étirage-pliage en V. (Courbes expérimentales)

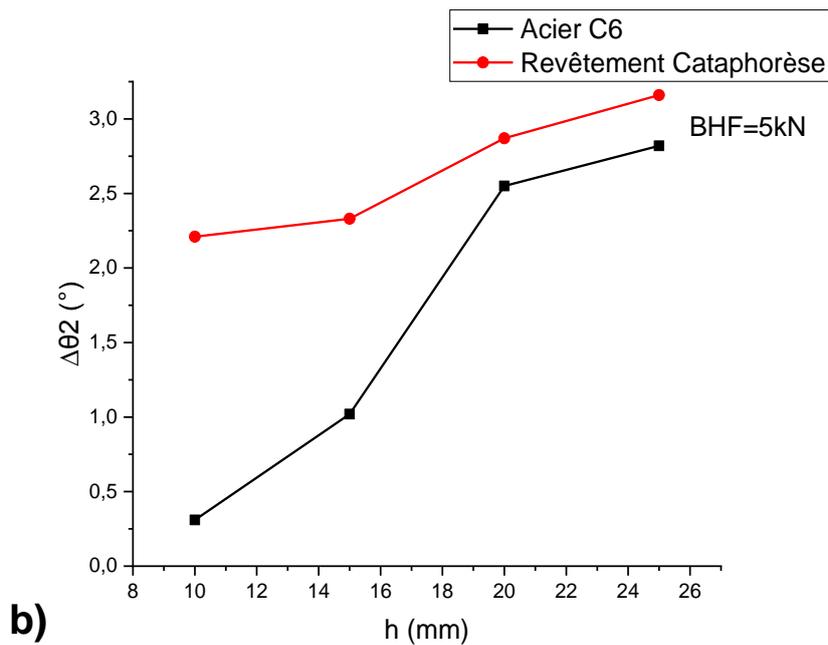
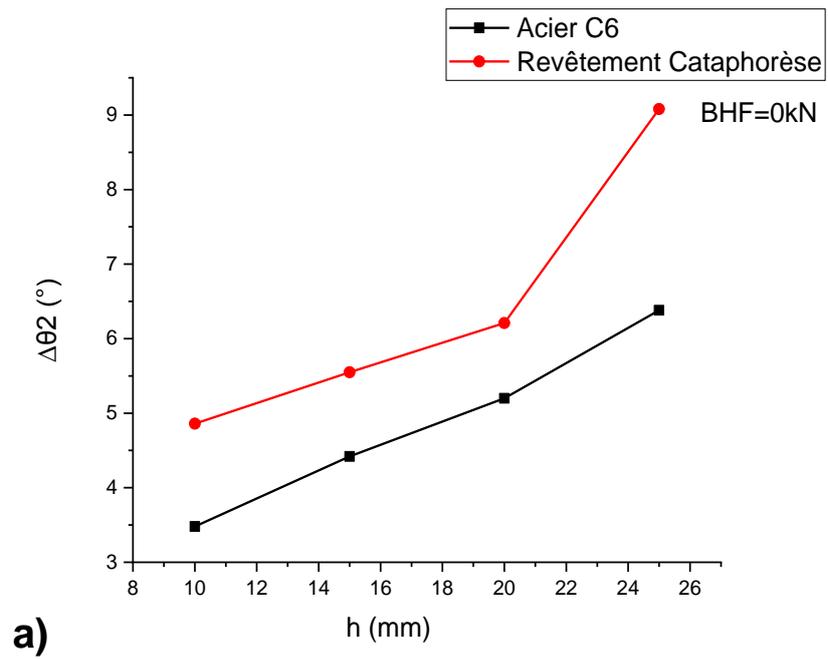


Figure 5. 30. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) avec la profondeur d'étirage pour les revêtements par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-plier en V. (Courbes expérimentales)

- Essai en U :

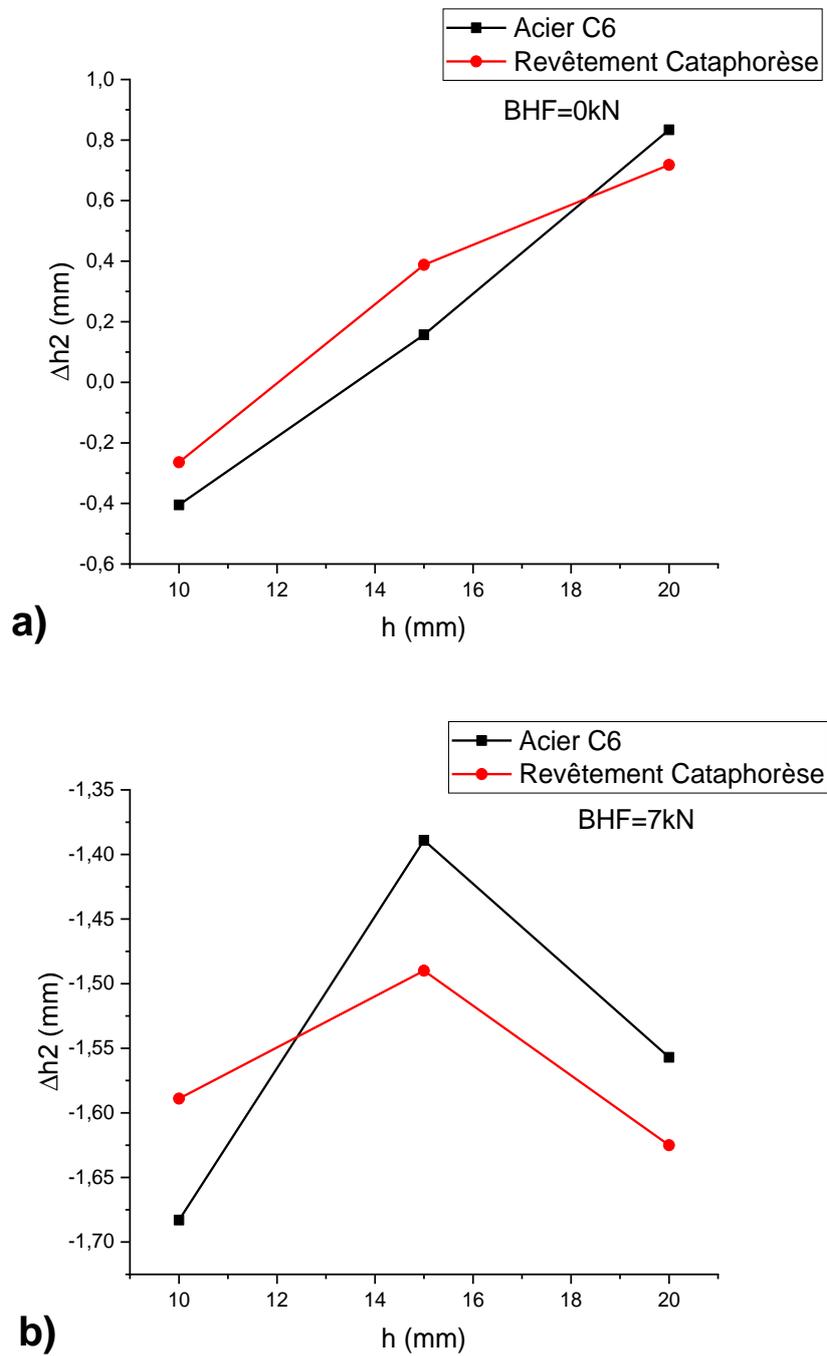


Figure 5. 31. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec la profondeur d'étirage pour revêtement par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-plier en U. (Courbes expérimentales)

c. Cémentation :

Le traitement de cémentation a montré son effet sur l'augmentation du R.E. durant les deux types d'essais d'étirage pliage (V et U), figures **5.32** et **5.33**. Cette augmentation provient principalement du changement microstructural des deux couches supérieure et inférieure de la tôle, sachant que les atomes du carbone font un léger durcissement de la surface de la tôle. L'implantation des atomes de carbone sur la surface de la tôle semble avoir un effet tribologique en diminuant le coefficient du frottement tôle/matrice. Une augmentation du retour élastique devient plus importante en absence du serrage de la tôle, sachant que sa valeur a presque triplé par rapport à celle de la tôle non cémentée dans les grandes profondeurs d'étirage (**h=25mm**). La valeur maximale de $\Delta\theta_2$ sur l'éprouvette traitée, dans un essai en V, a atteint **13°**, tandis que $\Delta\theta_2$ de l'éprouvette non traitée, et dans les mêmes conditions que la précédente, n'a atteint que **5,5°** (Figure **5.32.a**). Cependant, un essai avec un serrage (BHF=5kN) sur une éprouvette traitée (cémentée) a permis de réduire énormément le R.E., du moment que sa valeur n'a pas dépassé **1,75°**. Cette valeur est très proche de celle de l'éprouvette non traitée, **1,5°**, figure **5.32.b**.

Les courbes Δh_2 obtenues à partir des essais en U, figure **5.33**, ont eu une évolution identique à celles obtenues sur des tôles à revêtement métallique (Cr, Ni, Zn, Sn et C5), **figure 5.28**. Les dites courbes montrent une croissance de Δh_2 jusqu'à une certaine profondeur d'étirage **h** puis une légère descente. L'effet du traitement de cémentation amplifie aussi le R.E. durant l'essai en U, particulièrement pour les profondeurs importantes. De la même manière qu'en V, le serrage limite les valeurs du R.E. dans une plage très restreinte, (de -1mm à -0,6mm)

- Essai en V :

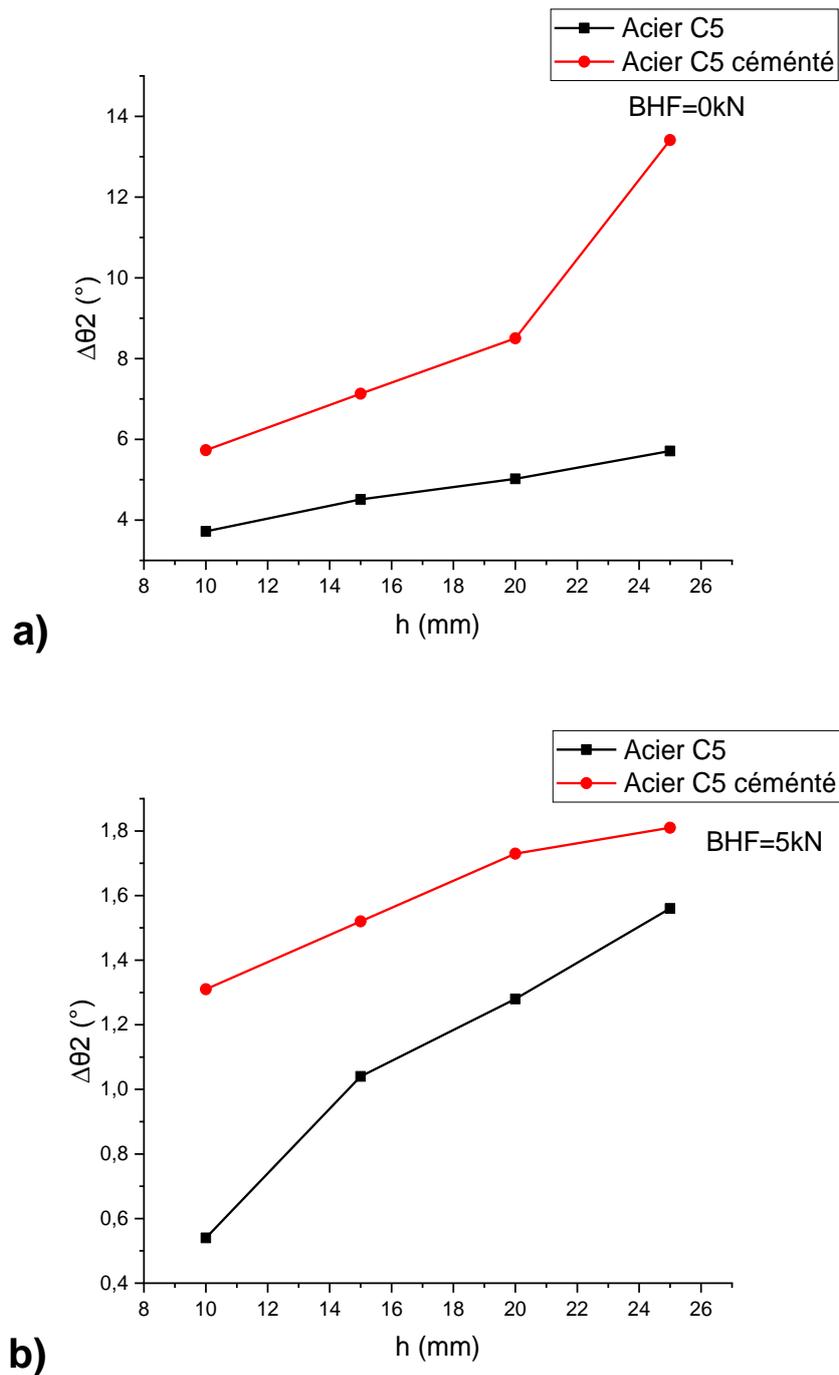


Figure 5. 32. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) en fonction de la avec la profondeur d'étirage pour acier cimenté d'essai d'étirage-plier en V. (Courbes expérimentales)

- Essai en U :

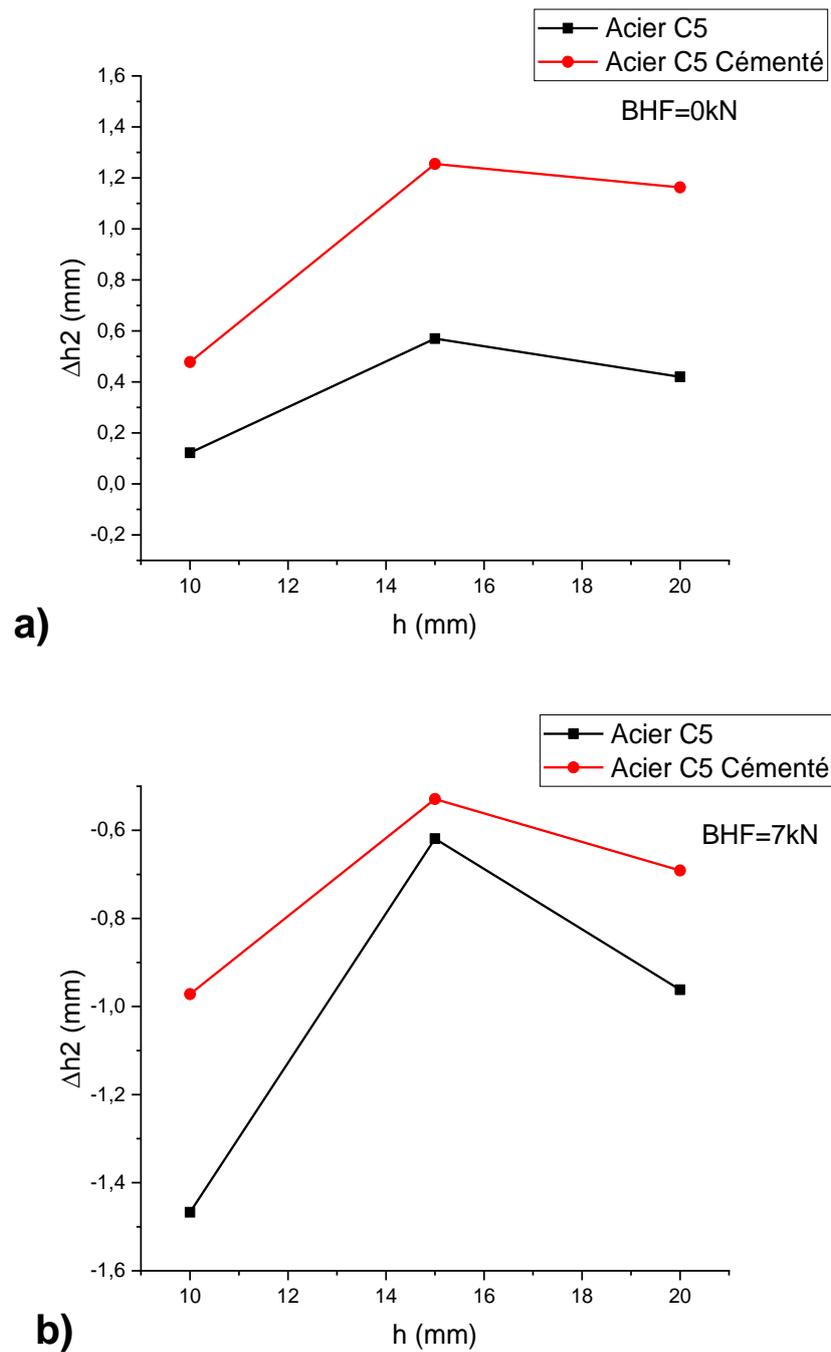


Figure 5. 33. Variation du retour élastique final (Δh_2) en fonction de la profondeur d'étirage pour acier cémenté d'essai d'étirage-plier en U. (Courbes expérimentales)

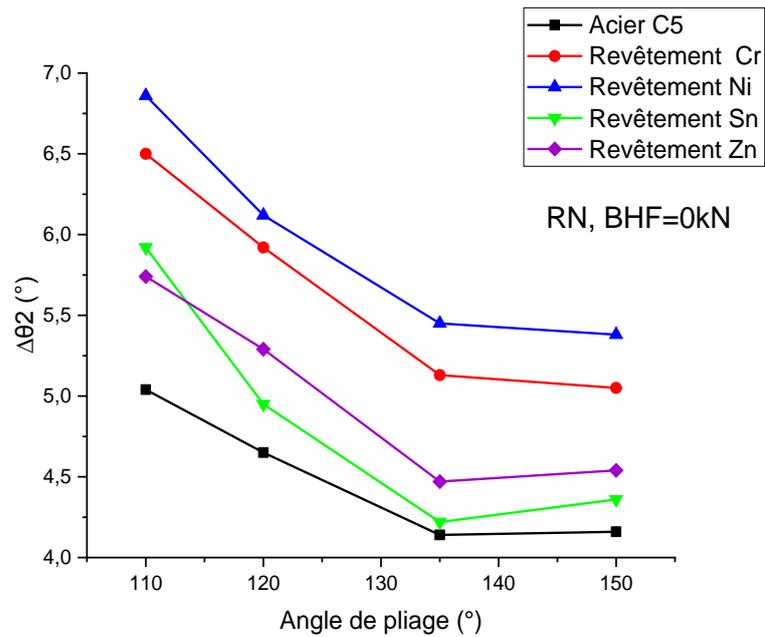


Figure 5. 34. Effet de l'angle de pliage (θ°) sur l'angle final du retour élastique. (Courbes numériques)

Les résultats expérimentaux et numériques **Figure (5.27, 5.29, 5.30, 5.32)** montrent bien que le R.E final en angle ($\Delta\theta_2$) de l'essai en V, est proportionnelle à la profondeur d'étirage pour tout les types d'échantillons utilisés. Selon **(Fei & Hodgson, 2006)**, l'angle du R.E diminue en augmentant de l'angle de pliage. D'après la **Figure 5.34** on tire qu'un angle de pliage élevé correspond à la petite profondeur d'étirage utilisée et résulte d'un petit R.E.

5.5. Effet de la rugosité (R_a) sur le retour élastique :

La rugosité joue un rôle tribologique essentiel dans l'opération d'emboutissage puisqu'elle détermine l'aire réelle de contact et donc la distribution des pressions superficielles. Ces pressions génèrent des contraintes locales en surface et déterminent l'intensité des efforts appliqués au niveau de la tôle.

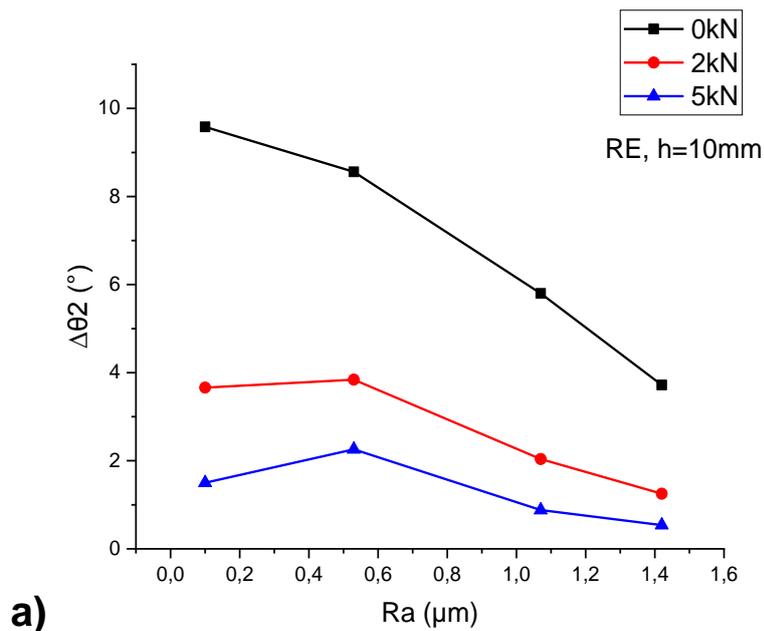
Dans le but de montrer l'influence de la rugosité dans la mise en forme et précisément sur le retour élastique, nous avons effectué nos essais sur deux dispositifs d'étirage pliage en V et en U, puis nous avons tracé les courbes $\Delta\theta_2/R_a$ (pour l'essai en V) et $\Delta h_2/R_a$ (pour l'essai en U) à différentes profondeurs d'étirage, en appliquant trois valeurs de BHF (0, 2 et 5 kN). Les échantillons utilisés diffèrent par leur nature de

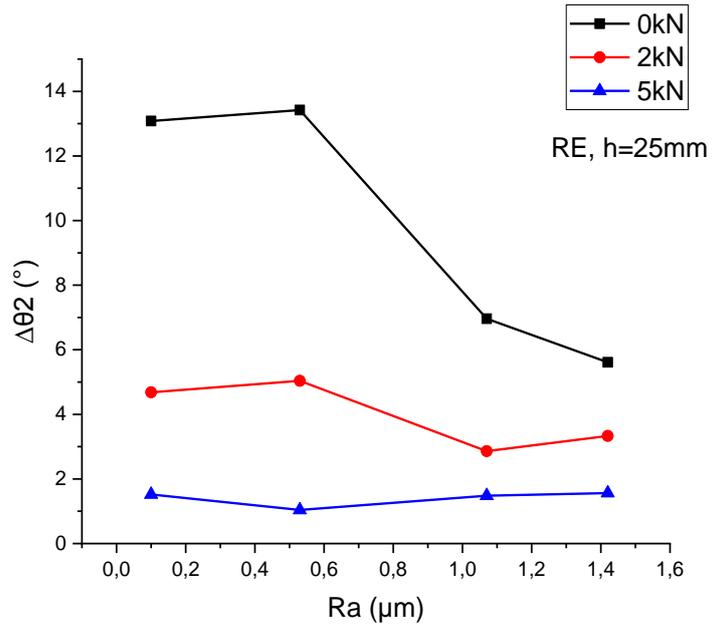
revêtement (Nickel, Chrome, Etain), chaque revêtement a sa propre rugosité qui est différente des autres. Les résultats obtenus sont illustrés dans les **Figures 5.35** et **5.36**. où le Retour élastique évolue inversement avec l'augmentation de la rugosité de l'échantillon.

L'effet tribologique de la rugosité est très visible en absence de serrage (BHF=0), sachant que $\Delta\theta_2$, pour l'essai en V, décroît de 13° vers 5° avec la croissance de la rugosité, Figure **5.35.b**. De la même manière Δh_2 , pour l'essai en U, baisse de **1mm** vers et **0,5 mm** avec l'augmentation de la rugosité, Figure **5.36.b**. D'après (**Demirci et al., 2013**), l'augmentation des irrégularités superficielles de surface (rugosité) accroître le frottement en raison d'augmenter l'interaction des aspérités. Ceci aura bien évidemment pour effet de diminuer le glissement et d'accroître l'effort d'emboutissage, ce qui engendre une grande déformation plastique des aspérités et corréle à un faible R.E.

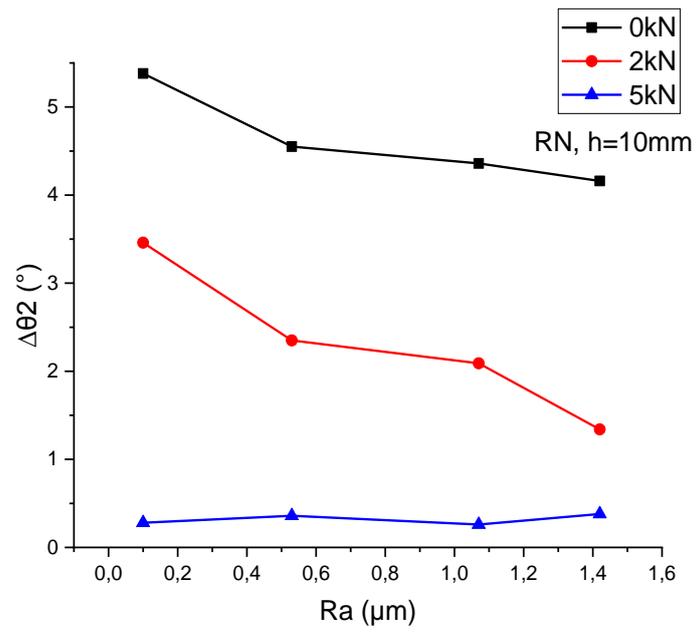
Cet effet tribologique de la rugosité est atténué par un fort serrage, sachant que le R.E. devient plus stable, indépendant de l'évolution de la rugosité et prend de petite valeur. $\Delta\theta_2(V)= 1^\circ$, $\Delta h_2(U)= -1,2^\circ$.

- **Essai en V :**





b)



c)

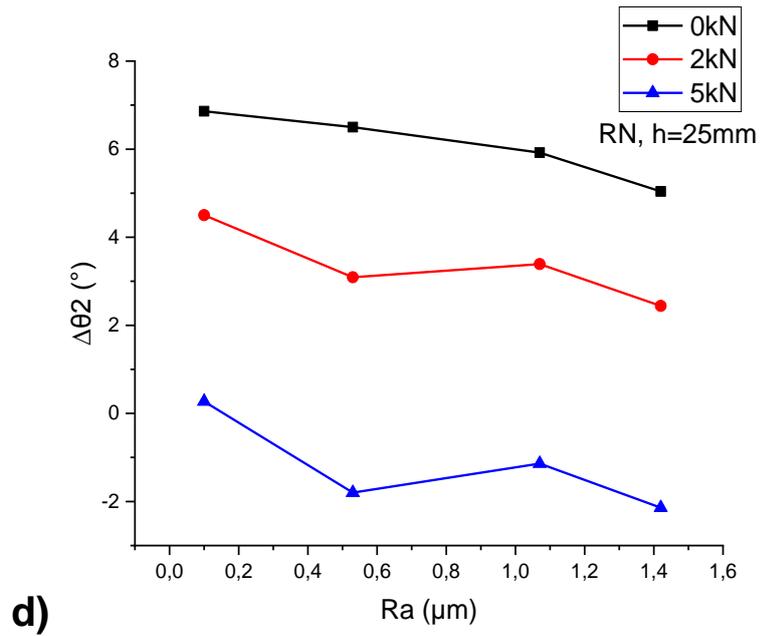
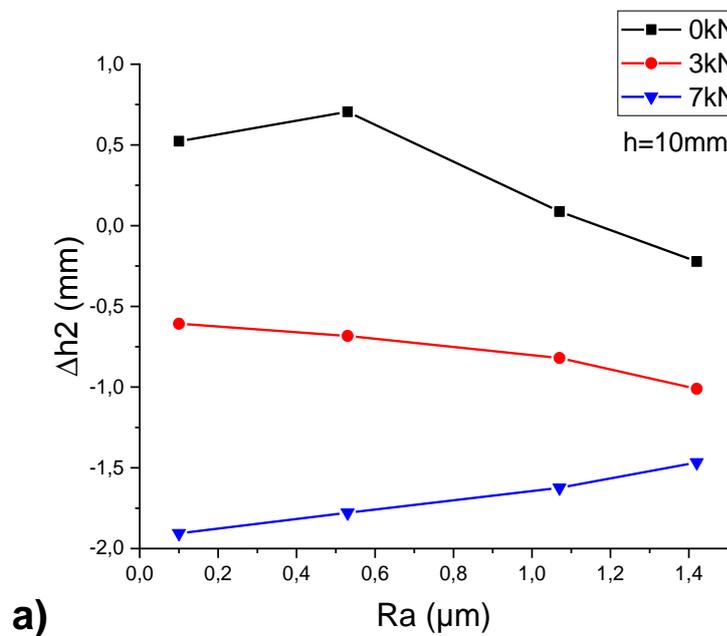


Figure 5. 35. Effet de la rugosité (Ra) sur l'angle final du R.E ($\Delta\theta_2$) pour les différents types des revêtements métalliques d'essai d'étirage-pliage en V. (a et b) Courbes expérimentales, (c et d) Courbes de simulation

- **Essai en U :**



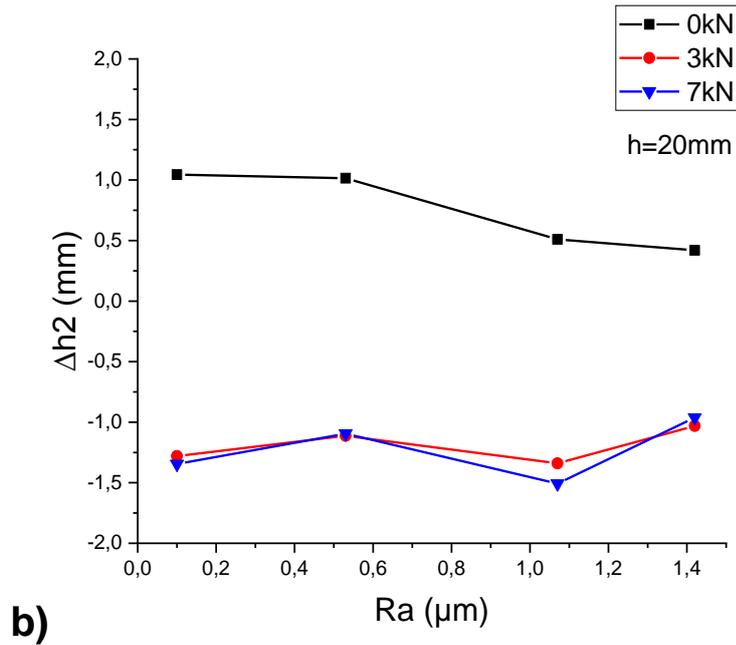


Figure 5. 36. Effet de la rugosité (Ra) sur le R.E final (Δh_2) pour les différents types des revêtements métalliques d'essai d'étirage-pliage en U. (Courbes expérimentales)

5.6. Effet des propriétés mécaniques sur le R.E :

Le comportement mécanique et la microstructure du matériau jouent un rôle important sur la forme finale de l'emboutie. Dans cette partie, nous avons choisis deux paramètres liés au comportement mécanique pour évaluer leurs effets sur le retour élastique. Il s'agit du module de Young **E** et la limite élastique **Re**. Pour mettre en évidence l'effet de ces deux paramètres nous avons effectués des essais de traction uniaxiale sur des échantillons en acier revêtu et non revêtu. Pour tracer les courbes, nous avons choisis trois échantillons ayant des limites élastiques différentes (Acier C5 non revêtu, acier revêtu en Chrome et Nickel) et trois autre ayant des modules de Young différents (Acier C5 non revêtu, acier revêtu en Chrome et acier revêtu en Etain), dont leurs valeurs correspondantes sont mentionnées sur le **Tableau 4.4**.

a. Effet de la limite élastique **Re**:

L'effet de la limite élastique sur le retour élastique est très visible sur les figures **5.37**, notamment dans les essais sans serrage (**BHF=0kN**), que ce soit en petite ou en grande

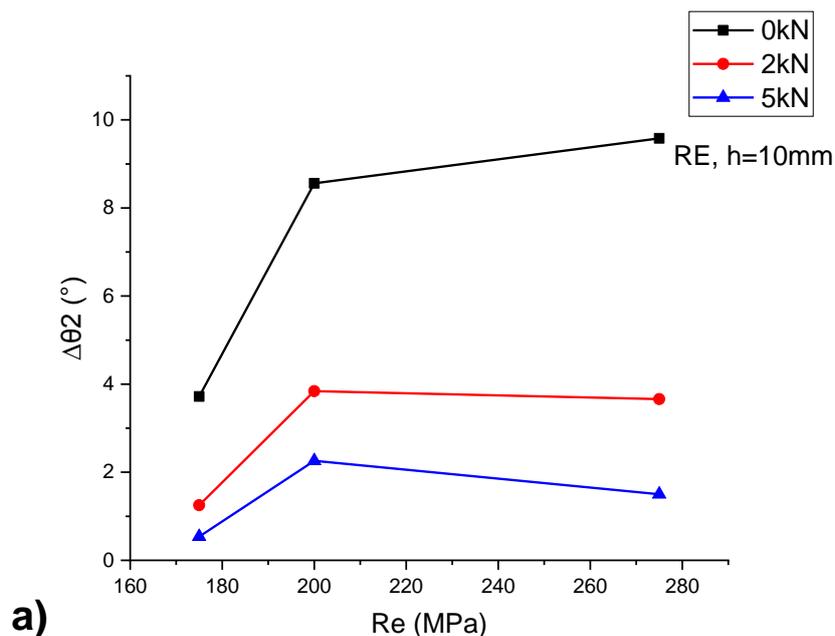
profondeur d'étirage. En effet, une grande limite élastique induit un retour élastique important. Ceci concorde bien avec les résultats de **Jiang (2010)** et (**Azaouzi, 2007**). Alors qu'en essai à fort serrage (**BHF=5kN**) et forte profondeur (**h=25mm**), le retour élastique ($\Delta\theta_2$) évolue faiblement où il se stabilise autour de la valeur 1° , figure **5.37.b**.

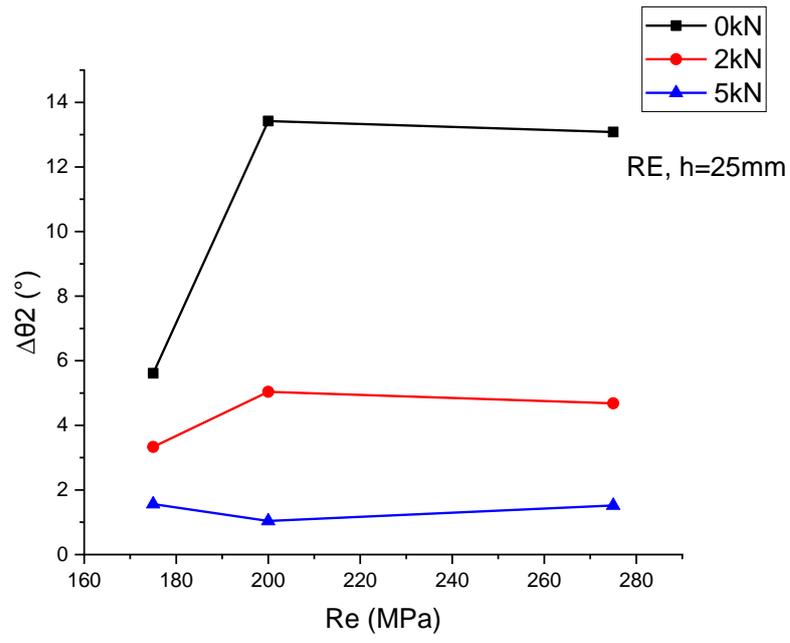
L'essai en U à fort étirage (**BHF=7kN, h=20mm**) donne de faibles valeurs de Δh_2 qui se stabilise, aussi, autour de **-1,2mm**. Suite à ces résultats, nous pouvons conclure que le limite élastique a un effet insignifiant lorsque le serrage est plus important, alors que dans le cas des essais (V ou U) sans serrage, la limite élastique montre bien son effet en augmentant le retour élastique ($\Delta\theta_2$ ou Δh_2).

L'effet combiné d'une grande force de serrage BHF et d'une grande profondeur h conduit dans la majorité des cas à des valeurs négatives ou nulles de R.E. ($\Delta h_2 \leq 0$), figure **5.38.b**.

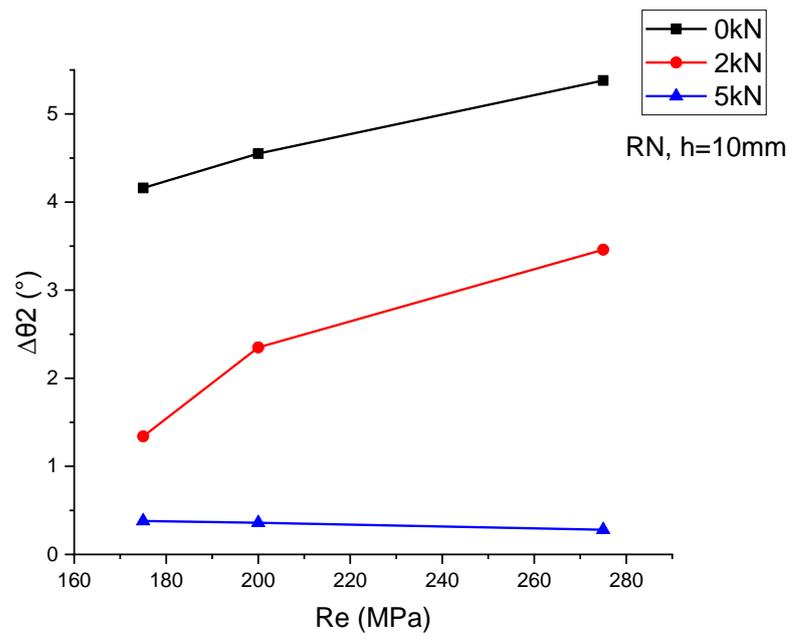
Les résultats numériques obtenus par simulation (Figure **5.37.c** et **d**) montrent bien l'effet de la limite élastique et de la même manière que celle des résultats expérimentaux.

- **Essai en V :**





b)



c)

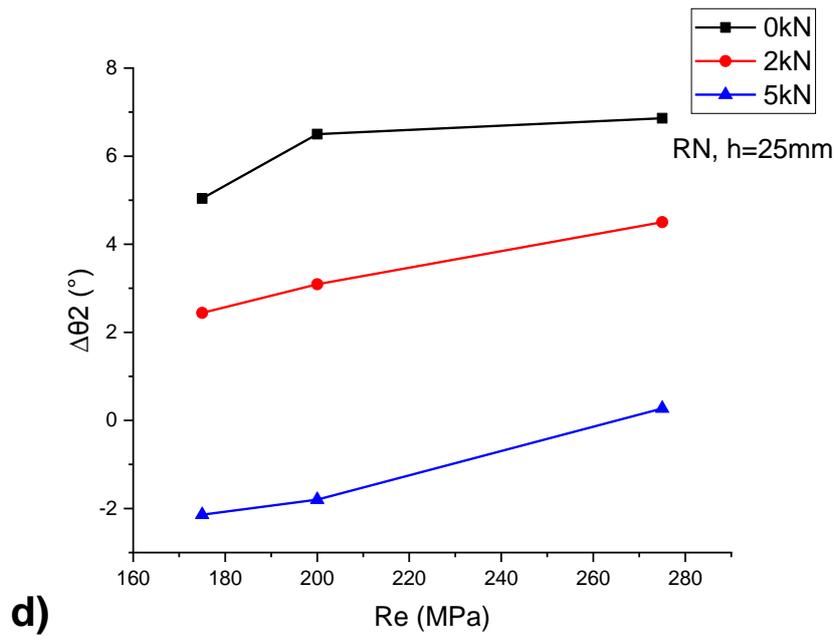
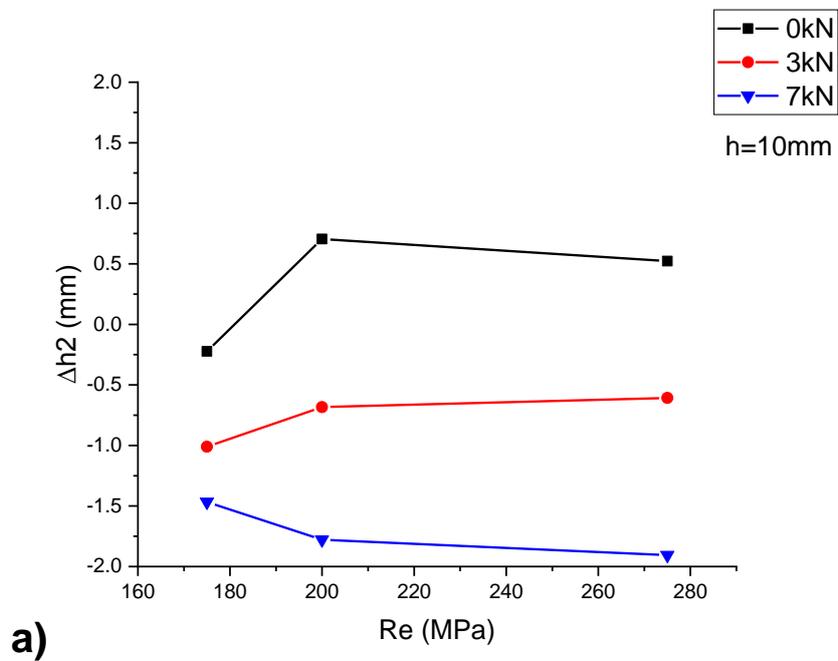


Figure 5. 37. Effet de la limite élastique (Re) sur l'angle final du R.E ($\Delta\theta_2$) dans l'essai d'étirage-plier en V. (a et b) Courbes expérimentales, (c et d) Courbes de simulation

- Essai en U :



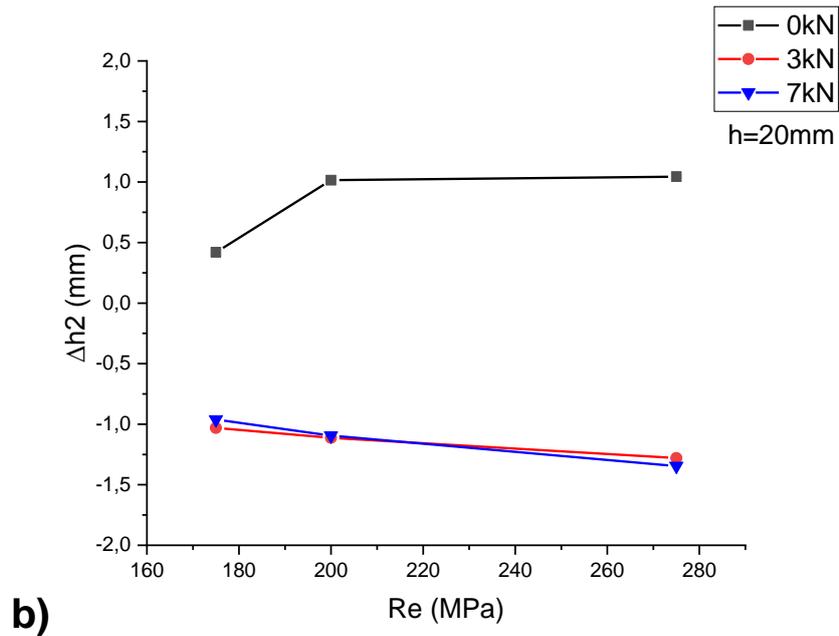


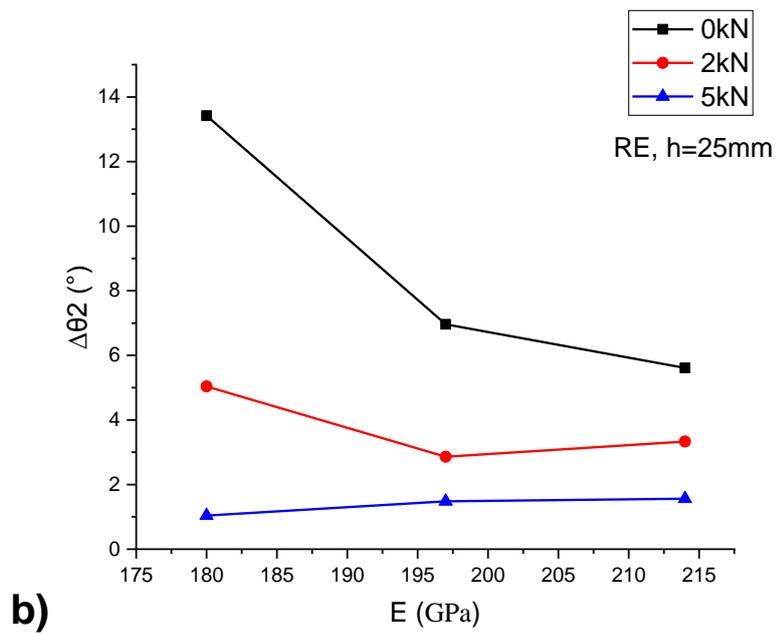
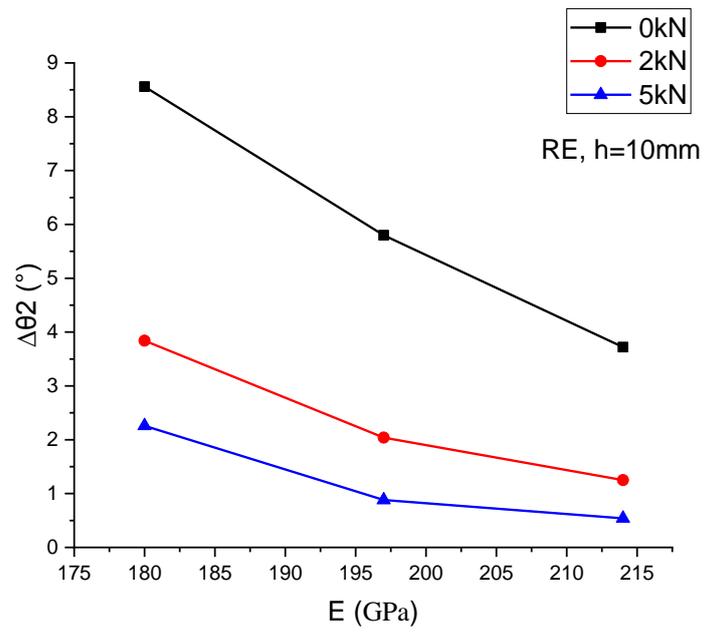
Figure 5. 38. Effet de la limite élastique Re sur le R.E final (Δh_2) dans l’essai d’étirage-plier en U. (Courbes expérimentales)

b. Effet du Module de Young E

Les courbes présentées sur les Figures 5.39 et 5.40, montrent bien que le retour élastique en V ou en U diminue progressivement avec l’augmentation du module de Young particulièrement pour un faible serrage ($BHF=2kN$) ou en absence de serrage ($BHF=0$). Ces résultats sont bel et bien conformes à ceux obtenus les travaux de (Karanjule et al., 2018) et (Alhammadi et al., 2018). Par contre pour les forts serrages (5 et 7kN) les valeurs de ($\Delta\theta_2$) sont très proches faibles de 1° pour l’essai en V et les valeurs de et Δh_2 sont au voisinage de **-1mm** pour l’essai en U. Ceci est expliqué par le fait que, dans le cas d’un étirage excessif, la composante de déformation élastique est très petite par rapport à déformation plastique.

Les résultats numériques obtenus par simulation (Figure 5.39.c et d) montre bien l’effet du module de Young et la même évolution que celle des résultats expérimentaux.

- Essai en V :



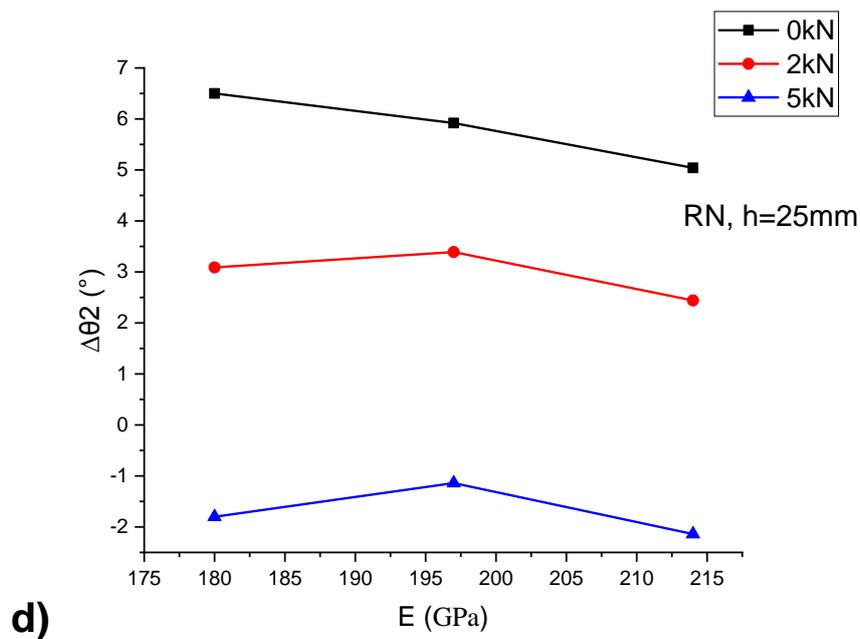
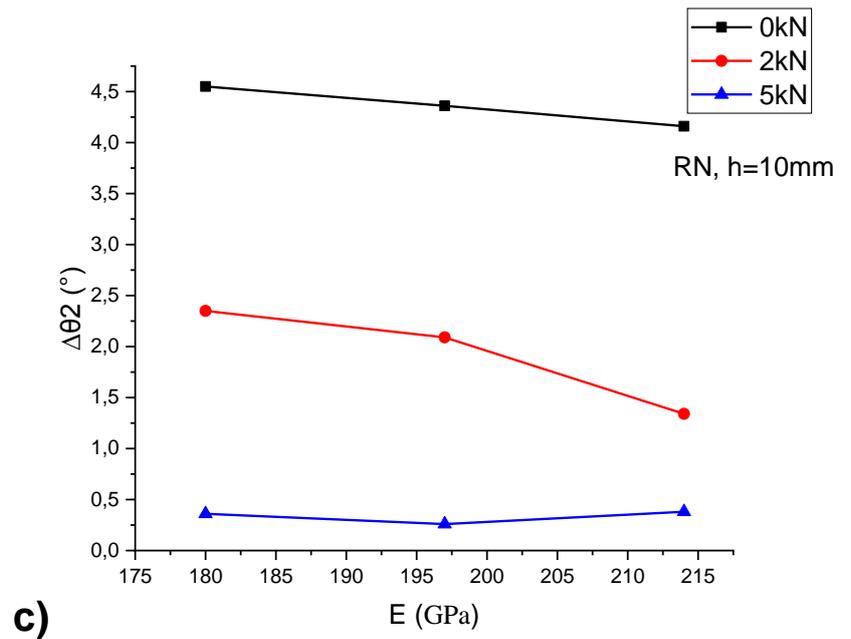


Figure 5. 39. Effet du module de Young (E) sur l'angle final du R.E ($\Delta\theta_2$) dans l'essai d'étirage-plierage en V. (Courbes expérimentales)

- Essai en U :

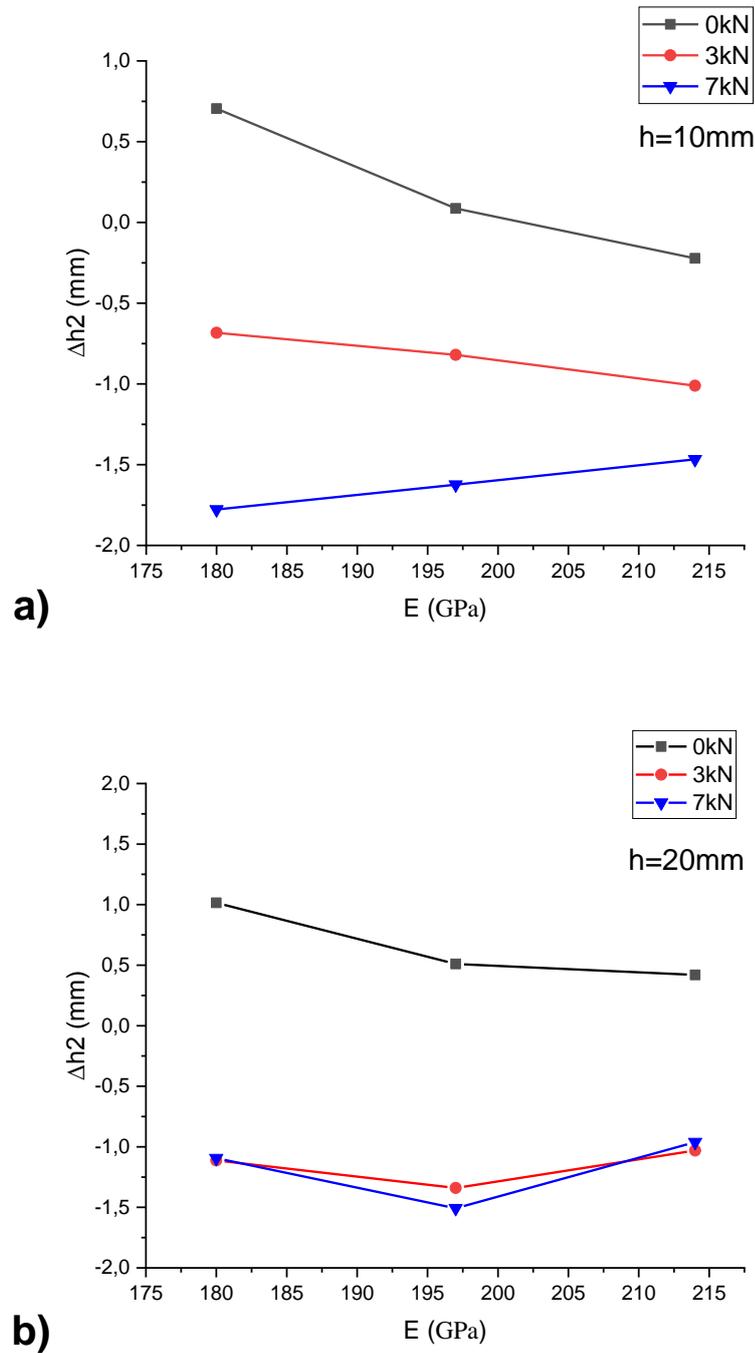


Figure 5. 40. Effet du module de Young (E) sur le R.E final (Δh_2) dans l'essai d'étirage-plier en U. (Courbes expérimentales)

5.7. Simulation numérique :

Dans cette partie, le modèle de simulation du processus d'étirage-pliage en V a été établi en utilisant le logiciel Abaqus/standard et l'algorithme implicite statique. **Figure 5.41.** Les dimensions géométriques et les caractéristiques de charge de l'éprouvette et des outils correspondent à celles utilisées dans l'expérience. Les outils sont modélisés sous forme d'élément rigide et les flans revêtus et non revêtus sous forme d'un élasto-plastique élément. Par conséquent, le processus de flexion est analysé à l'aide d'éléments de déformation plane quadratique à quatre nœuds. En raison de la nature symétrique du problème et afin d'augmenter l'efficacité du calcul, l'éprouvette a une structure symétrique et un seul côté de celui-ci a été simulé et analysé. Puisque le revêtement est très fin, il est considéré comme un seul élément avec le substrat. Le maillage a été fait en utilisant 1575 éléments. Le coefficient de frottement entre la tôle et les outils a été fixé à 0,15, l'effet de frottement entre le poinçon et l'éprouvette a été ignoré. La variation du module de Young et de la déformation plastique des tôles non revêtues et revêtues a été incluse dans le modèle aux éléments finis. La géométrie finale de l'éprouvette déformable en fonction de la modélisation du comportement du matériau est illustrée à la **Figure 5.42.**

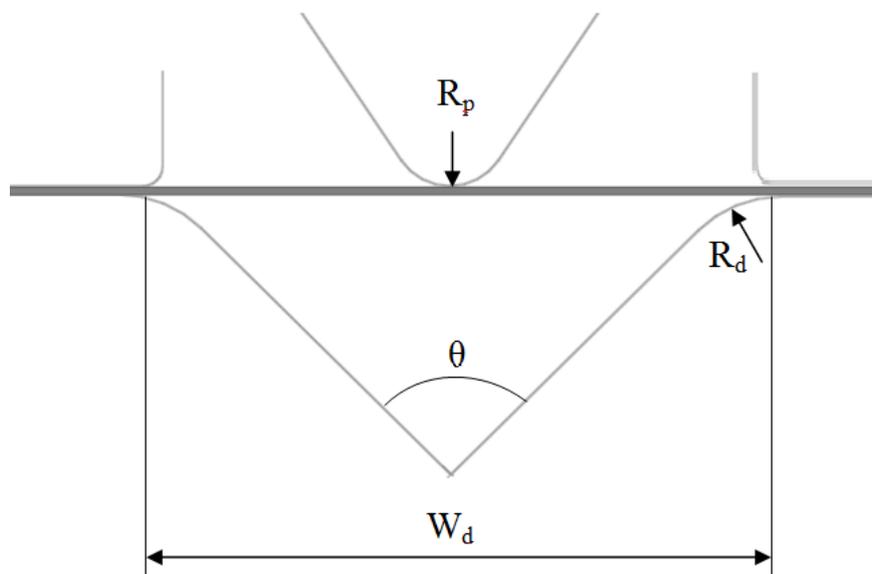
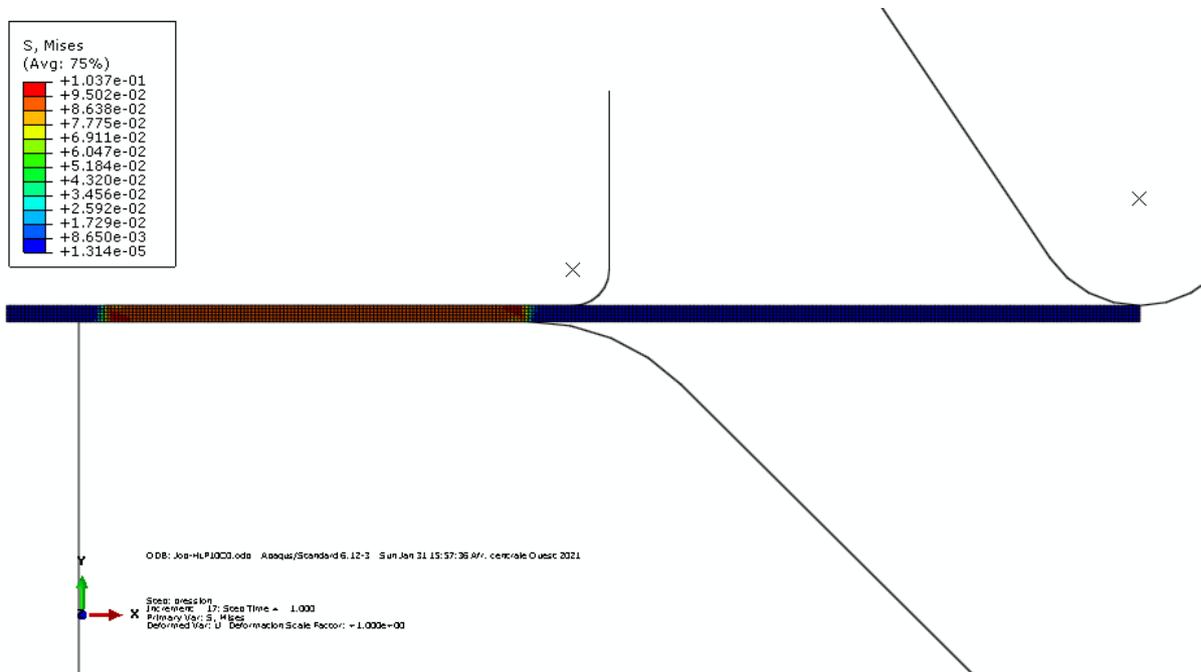


Figure 5. 41. Schéma de modélisation du processus d'étirage-pliage

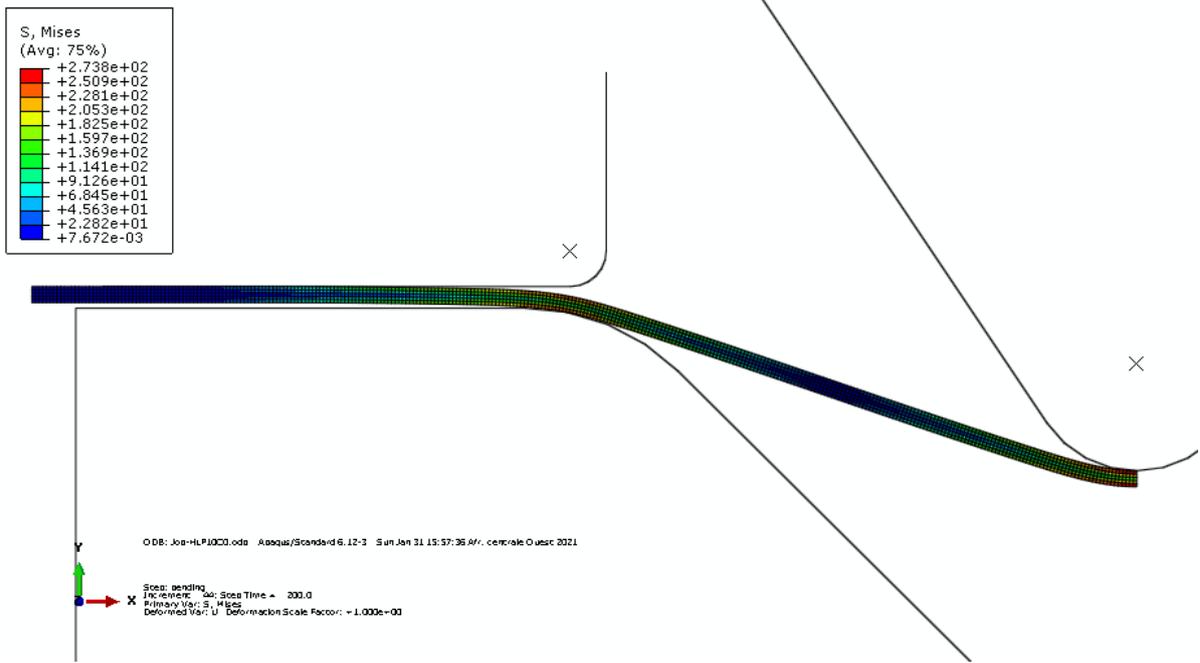
L'essai numérique d'étirage-pliage à été effectué en 4 étapes :

- La pression du serre flan. **Figure 5.42.a**
- La descente du poinçon. **Figure 5.42.b**
- La remontée du poinçon. **Figure 5.42.c**
- La remontée du serre flan. **Figure 5.42.c**
- La libération totale du flan. **Figure 5.42.d**

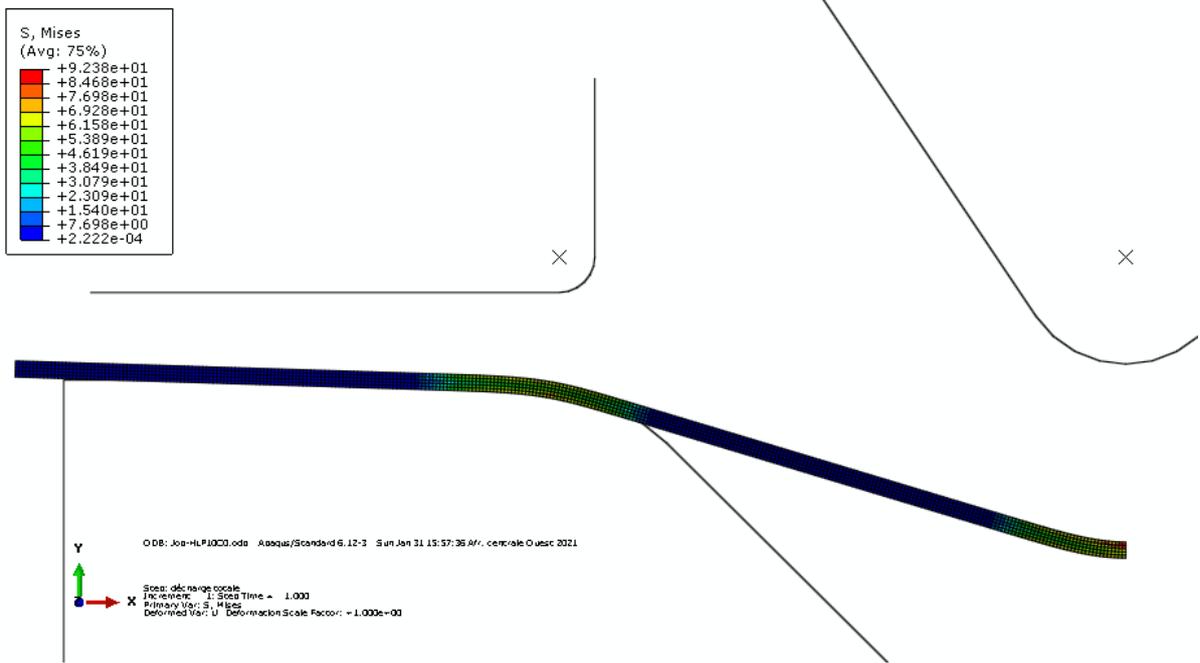
Chaque étape représente une répartition des contraintes différente à l'autre dans les zones A, B et C. **Figure 5.43.**



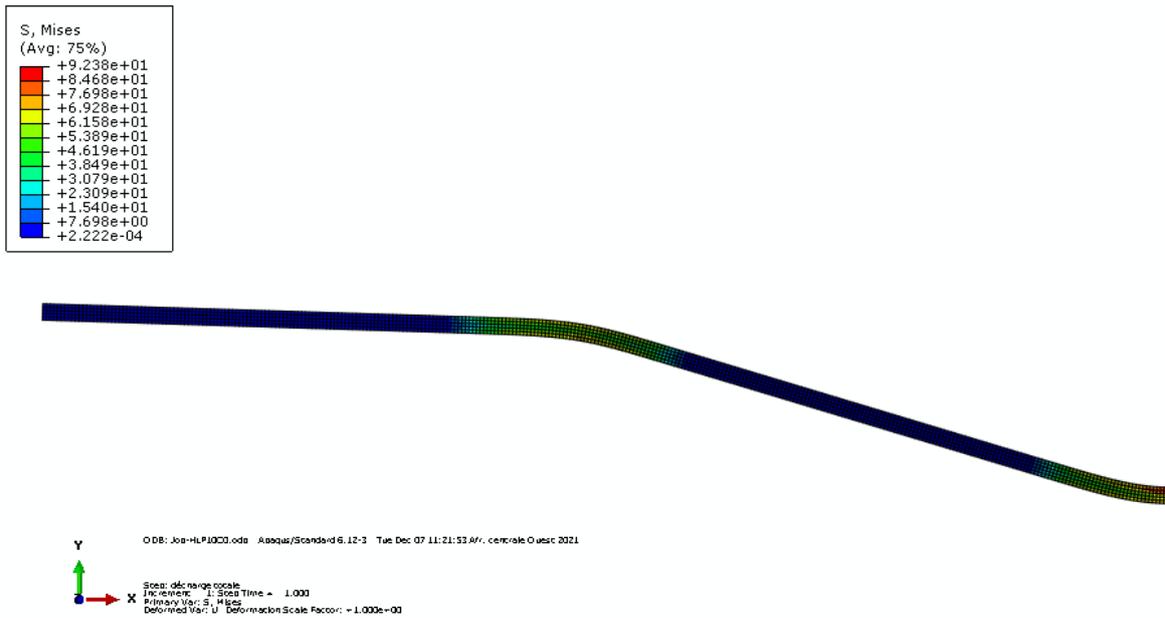
a) Pression



b) Etirage-Pliage



c) Retour élastique



d) Libération totale de l'échantillon

Figure 5. 42.Etapes de la simulation de l'étréage-pliage en V d'une éprouvette en acier C5. $h=10\text{mm}$, $BHF=0\text{kN}$

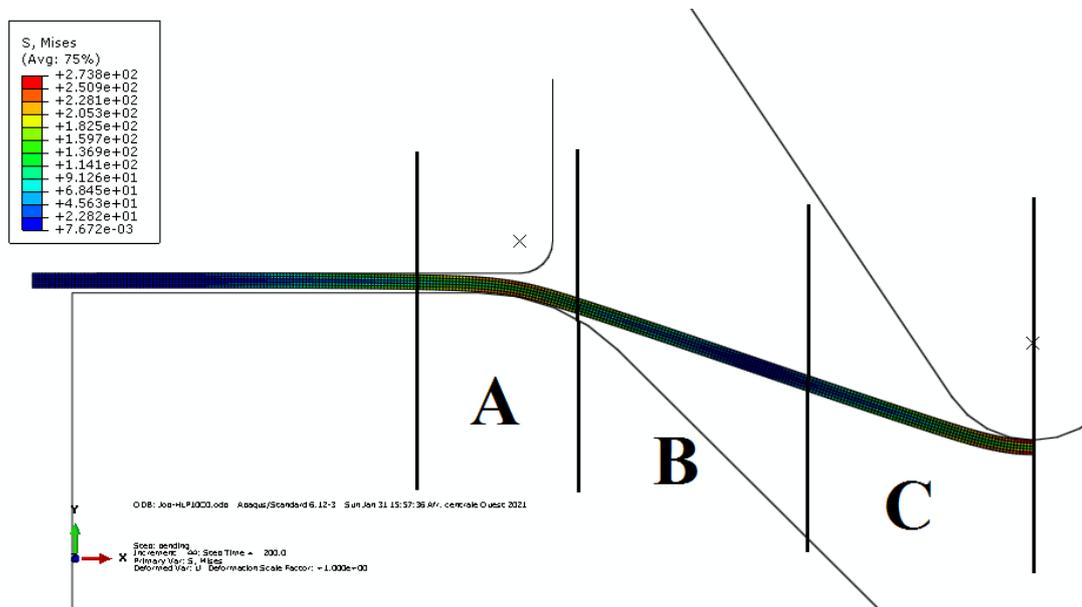


Figure 5. 43.Exemple de répartition des contraintes dans la tôle.

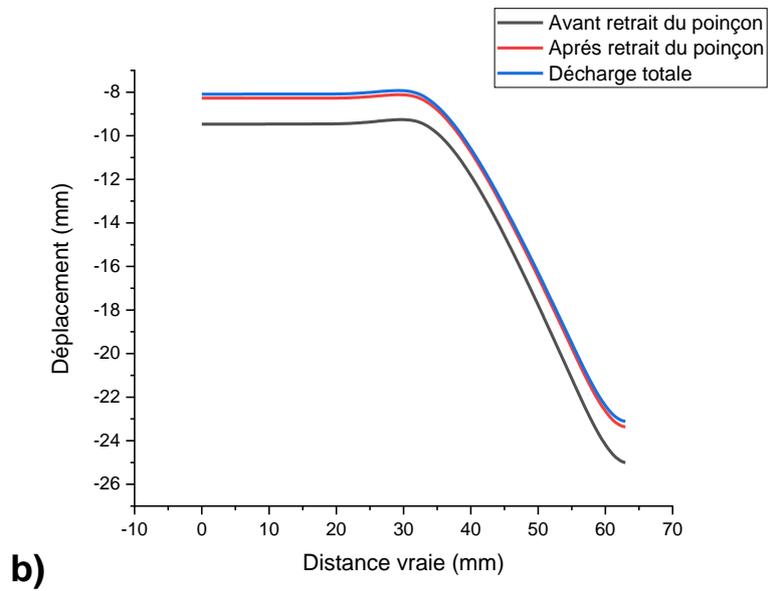
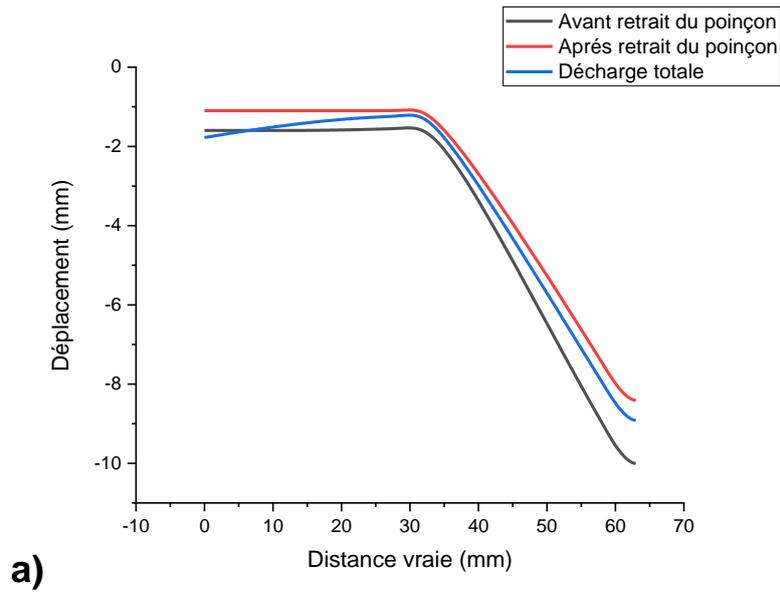


Figure 5. 44.Exemple de forme de la tôle au cours de la simulation.

a) $h=10\text{mm}$, $BHF=0\text{kN}$, b) $h=25\text{mm}$, $BHF=0\text{kN}$.

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse a pour but d'étudier la sensibilité du retour élastique des tôles revêtues lors d'un essai d'étirage-plier. Les revêtements choisis sont ceux connus contre la corrosion. Deux processus d'étirage-plier en V et en U, ont été étudiés. Plusieurs paramètres sont mis en jeu pour l'évaluation de leurs impacts sur le retour élastique tel que la force de serrage, la profondeur d'étirage, la nature de revêtement, l'épaisseur du revêtement, la rugosité de la surface, le module de Young, la limite élastique. Un modèle d'éléments finis d'essai d'étirage-plier en V a été développé en utilisant le code de calcul Abaqus. Les résultats expérimentaux et numériques de l'effet des différents paramètres, cités ci-dessus, sont évalués et discutés.

Sur la base des résultats, les conclusions suivantes se dégagent de cette étude :

- Les revêtements en Nickel et Chrome ont influé énormément sur le comportement en général de la tôle, sachant qu'ils ont accéléré la rupture en traction de l'éprouvette.
- Les surfaces de revêtement en Cr et Ni sont fortement dégradées en petits fragments parallèles par l'effet de traction.
- L'utilisation des revêtements en Cr et Ni est déconseillé pour les grands efforts de formage, par contre les revêtements en Sn et Zn donne des résultats acceptables.
- Une augmentation de BHF réduit le glissement de la feuille entre la matrice et le serre-flan et réduit le retour élastique en augmentant la tension d'étirage.
- L'angle du retour élastique est plus petit pour :
 - Les tôles non revêtues.
 - Une faible épaisseur de revêtement.
 - Une petite profondeur d'étirage ou un grand angle de pliage
 - Une petite limite d'élasticité ou grande valeur du module de Young
 - Une BHF et une rugosité de surface plus élevées.
- Les tôles ayant une rugosité de surface élevée exhibent un faible retour élastique, car l'augmentation des irrégularités superficielles de surface diminue le glissement

et accroît l'effort d'étirage-plier (ou emboutissage), ce qui engendre une grande déformation plastique des aspérités et induit un faible R.E.

- L'augmentation de l'épaisseur du revêtement fait accroître le retour élastique. Cela est dû à la diminution du frottement par l'action d'une faible rugosité de revêtement
- Les traitements de surfaces modifient les propriétés mécaniques du substrat durant l'écoulement plastique et jouent le rôle d'un lubrifiant durant la mise en forme.
- Les revêtements plastiques et par peinture ainsi que le traitement par cémentation produisent un retour élastique plus élevé par rapport aux revêtements métalliques.
- L'effet combiné d'un fort serrage et d'une grande profondeur d'étirage réduit énormément le R.E. à des valeurs très proches de « 0 » ou négatives.
- Le retour élastique de la tôle peut être influencé par la limite d'élasticité du matériau. Des valeurs de limite d'élasticité plus élevées produisent un retour élastique plus élevé suite aux grandes déformations élastiques.
- Le retour élastique des tôles revêtues de nickel et de chrome est supérieur à celui des tôles revêtues par le zinc et l'étain.
- En absence d'un serrage ($BHF=0$), une éprouvette avec un revêtement (Ni, Cr) induit un grand retour élastique par rapport à celui d'une éprouvette nue.
- En présence d'un fort serrage, dans un essai en U, une éprouvette avec un revêtement fragile (Ni, Cr) induit un faible retour élastique par rapport à celui d'une éprouvette nue.
- La comparaison entre la simulation et les résultats expérimentaux montre un bon accord entre eux. Les différences entre les valeurs estimées et mesurées sont acceptables.
- L'influence de BHF sur le retour élastique est le paramètre le plus significatif.
- L'épaisseur du revêtement, la rugosité de surface et la limite d'élasticité ont des effets non négligeables sur la mise en forme et sur le retour élastique. Leur rôle vient en deuxième position par rapport à celui du BHF.
- Un fort serrage ou grande valeur de BHF permet d'atténuer l'effet tribologique de la rugosité et l'effet des paramètres mécaniques (module de Young et limite élastique).

Perspectives :

A travers les différents résultats obtenus, d'autres recherches peuvent être menées afin d'améliorer les performances du procédé d'emboutissage. Les perspectives ci-dessous, méritent d'être approfondies par des études appropriées :

- Remplacer le revêtement des tôles par le revêtement des outils.
- Introduire l'effet d'autres paramètres sur le retour élastique.
- Résoudre des problèmes réels de la mise en forme, au niveau des unités industrielles, telle que la déchirure des tôles étudiées (C5, C6) en introduisant les différents traitements, revêtements et lubrifications.
- Mettre ces résultats expérimentaux à la disposition des chercheurs travaillant sur la simulation.

Références

- Agrawal, A., Reddy, N. V., & Dixit, P. M. (2007). Determination of optimum process parameters for wrinkle free products in deep drawing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 51-54. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.050>
- Alhammadi, A., Rafique, H., Alkaabi, M., & Abu Qudeiri, J. (2018). Experimental investigation of springback in air bending process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 323, 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/323/1/012021>
- Allemand, M. (2011). Synthèse et caractérisation de films minces électrodéposés de cuivre— Palladium [M. Sc]. Université du Québec.
- Almeida, C. O. L., Lima, L. H. L., & dos Santos Pereira, M. (2020). Springback comparison between DP600 and DP800 steel grades. *Materials Research Express*, 7(1), 016598. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab664e>
- Alsaadi, M. K. A. (2017). Bending Characteristics of Carburized Low Carbon Steel Experimental and Numerically Study. *Engineering Sciences*, 25(2), 761-773.
- Andersson, A., & Holmberg, S. (2002). Simulation and verification of different parameters effect on springback results. *Proceedings of the 5th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes (NUMISHEET 2002)*, 201-210.
- Anggono, A. D., Siswanto, W. A., & Omar, B. (2011). Finite Element Simulation for Springback Prediction Compensation. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 1, 564. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.1.5.114>
- Ankėnas, R., & Barauskas, R. (2006). Finite element investigation on parameters influencing the springback during sheet metal forming. *Mechanika*, 61(5).
- Arab, N., & Javadimanesh, A. (2013). Theoretical and Experimental Analysis of Deep Drawing Cylindrical Cup. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 01(06), 336-342. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2013.16051>

- Arwidson, C. (2005). Numerical simulation of sheet metal forming for high strength steels [Doctorat]. Luleå tekniska.
- Ashby, M., Bréchet, Yves, & Salvo, L. (2001). Sélection des matériaux et des procédés de mise en oeuvre (1^{re} éd.). Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Azaouzi, M. (2007). Modélisation et optimisation numérique de l'emboutissage de pièces de précision en tôlerie fine [Doctorat]. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Bahloul, R. (2002). Optimisation du procédé de pliage sur presses de pièces en tôles à haute limite d'élasticité [Doctorat]. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre d'Angers.
- Banabic, D. (2010). Sheet Metal Forming Processes. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1>
- Baseri, H., Bakhshi-Jooybari, M., & Rahmani, B. (2011). Modeling of spring-back in V-die bending process by using fuzzy learning back-propagation algorithm. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8894-8900. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.102>
- Bate, P. S., & Wilson, D. V. (1986). Analysis of the bausinger effect. *Acta Metallurgica*, 34(6), 1097-1105. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90220-8](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90220-8)
- Benaben, P., & Durut, F. (2008). Nickelage électrolytique—Mise en œuvre. *Techniques de l'Ingénieur*, 1(M1611). <https://www.techniques-ingenieur.fr/doi/10.51257/a/v1/m1611>
- Ben-Elechi, S., Bahloul, R., & Potiron, A. (2006). Optimisation des paramètres du procédé de pliage en tombé de bord par plan d'expériences numérique et méthode des surfaces de réponse. *Mécanique & Industries*, 7(5-6), 475-485. <https://doi.org/10.1051/meca:2007005>
- Bensaada, S., BENDRIHEM, N., & Bensaada, O. (2015). *Science des matériaux* (Tom 2).
- Bouhêlier, C. (1982). Formage des tôles fortes. *Techniques de l'Ingénieur*, B7630, 49.
- Bouhêlier, C. (1988). Chaudronnerie lourde. *Techniques de l'Ingénieur*, 1(A866).
- Bruni, C., Celeghini, M., Geiger, M., & Gabrielli, F. (2007). A study of techniques in the evaluation of springback and residual stress in hydroforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(9-10), 929-939. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0539-x>

- Buang, M. S., Abdullah, S. A., Saedon, J., & CADEM Center, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi MARA, 40450 Shah Alam, Selangor. (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.
<https://doi.org/10.15282/jmes.8.2015.7.0129>
- Burchitz, I. (2005). Springback : Improvement of its predictability (MC1.02121). Netherlands Institute for Metals Research.
- Carbonniere, J. (2009). Contribution à l'analyse du retour élastique en emboutissage [Doctorat]. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Carden, W. D., Geng, L. M., Matlock, D. K., & Wagoner, R. H. (2002). Measurement of springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(1), 79-101. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00082-0)
- Chan, K. C., & Wang, S. H. (2001). The effect of a coating on the springback of integrated circuit leadframes. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(2-3), 231-234.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01048-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01048-2)
- Chatti, S. (2009). Choix d'un algorithme explicite ou implicite pour la simulation du retour élastique. 6.
- Chen, P., & Koç, M. (2007). Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 190(1-3), 189-198.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.046>
- Cheraghi, M., Adelkhani, A., & Attar, M. (2021). The Experimental and Numerical Study of the Effects of Holding Force, Die Radius, Pin Radius and Pin Distance on Springback in a Stretch Bending Test. *Iranian Journal of Materials Forming*, 8(2).
<https://doi.org/10.22099/ijmf.2021.39387.1172>
- Chevalier, J. (2012). Guide de sous-traitance des traitements de surface et de la peinture industrielle. Tec & Doc Lavoisier.

- 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. <https://doi.org/10.1177/0954405413514225>
- Coër, J. (2013). Mise en forme par emboutissage en température d'un alliage d'aluminium AA5754-O [Doctorat]. Bretagne Sud.
- Col, A. (2010). L'emboutissage des aciers. DUNOD.
- Colombié, M. (2008). Matériaux métalliques (2ème édition). Dunod.
- Corvée, G. (1999). Étamage chimique. Techniques de l'Ingénieur, 1(M1565).
- Da Silva, M. F., K. Shimizu, K. Kobayashi, P. Skeldon, G.E. Thompson, & G.C. Wood. (1995). On the nature of the mechanically polished aluminium surface. Corrosion Science, 37(9), 1511-1514. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(95\)00067-T](https://doi.org/10.1016/0010-938X(95)00067-T)
- Del Pianta, D. (2017). Détermination des paramètres physico-chimiques régissant l'électrodeposition d'une couche de chrome métallique à partir d'une solution à base de chrome trivalent [Doctorat]. Université de PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR.
- Delfina, J., Crisbon. (2003). Experimental measurement and finite element simulation of springback in stamping aluminum alloy sheets for auto-body panel application [Doctorat]. Mississippi State.
- Demirci, I., Mezghani, S., Yousfi, M., Zahouani, H., & Mansori, M. E. (2013). Influence de l'échelle de rugosité sur le frottement dans les contacts lubrifiés. 8.
- Depetris-wery, M., & Ayedi, H. F. (2007). Électrozingage. Techniques de l'Ingénieur, 2(M1600).
- Deruelle, J. (2008). Préparation des surfaces. Techniques de l'Ingénieur, 1(M1435).
- Di Bari, G. A. (2011). Electrodeposition of Nickel. In Modern Electroplating (p. 79-114). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470602638.ch3>
- EL Kacimi, Y., & Ebn Touhami, M. (2013). Anticorrosion : Applications Industrielles et Modélisation. La 2ème Edition de l'Ecole de Traitements de Surface et Environnement - ECOTSE-2013.

- Endlé, J., & Aubrun, P. (1989). Traitements de surface des métaux. *Techniques de l'Ingénieur*, 1(M1528), 5.
- Erdin, M. E., & Atmaca, A. (2016). Effects of Holding Force on the Springback Behavior of Annealed Aluminum Plates. *Procedia Engineering*, 149, 56-61.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.638>
- 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(18), 1847-1851.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.01.016>
- Felder, É. (2000). Procédés de mise en forme. *Techniques de l'Ingénieur*, 1(M3000), 6.
- Felder, É. (2006). Lubrification en mise en forme. *Techniques de l'Ingénieur*, 1, 1-17.
- Gau, J.-T., & Kinzel, G. L. (2001). An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions. *Journal of Materials Processing Technology*, 108(3), 369-375. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00834-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00834-7)
- G.M. Goodwin. (1968). Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop. 77, 380-387. <https://doi.org/10.4271/680093>
- Godon, A. (2010). Relations Structure/Composition/Propriétés de revêtements électrodéposés de nickel de taille de grain nanométrique [Doctorat]. Université de La Rochelle.
- Grèze, R. (2009). Étude expérimentale et numérique du retour élastique des alliages d'aluminium après emboutissage [Doctorat]. Université de Bretagne-sud.
- Guillais, J.-C. (2008). Aspects économiques et perspectives. *Techniques de l'Ingénieur*, 1(M1422), 4.
- Gupta, T. R., & Payal, H. S. (2016). Investigative Study on Bending and Spring Back of Electro Galvanized Steel. 1, 461-465. <https://doi.org/2016-ISFT-348>
- Haddag, B. (2007). Contribution à la modélisation de la mise en forme des tôles métalliques : Application au retour élastique et à la localisation. *Engineering Sciences [physics]. Arts et Métiers ParisTech*.

- Hamdi, M., Benhorma, H. A., Hadjaj, A., & Benchatti, A. (2017). Residual Stresses Measurement in the Weld Seam of X70 Steel, Analyzed by XRD. *Acta Physica Polonica A*, 132(3-II), 866-868.
<https://doi.org/10.12693/APhysPolA.132.866>
- Heuzé, T. (2015). *Plasticité des structures*. Ecole Centrale de Nantes.
- Hirschi, K. (1999). *Analyse des contraintes résiduelles et des paramètres microstructuraux par diffraction de neutrons dans un acier inoxydable austénitique [Doctorat]*. Reims Champagne-Ardenne.
- Ho, K. C., Lin, J., & Dean, T. A. (2004). Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets. *International Journal of Plasticity*, 20(4-5), 733-751. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(03\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(03)00078-0)
- Hosford, W. F., & Caddell, R. M. (2007). *Metal forming : Mechanics and Metallurgy (3^e éd.)*. Cambridge University Press.
- Huang, M. dong, Li, C., Fu, L., Li, L., & Liu, C. (2018). Stamping Parameters Optimization of an AA5754 A-pillar by Response Surface Methodology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1063, 012187. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1063/1/012187>
- Incandela, O. (2007). *Définition de protocoles rationnels d'identification de loi de comportement élastoplastique :Application à la simulation éléments finis d'opérations industrielles d'emboutissage [Doctorat]*. Savoie.
- Jiang, Z. Q., Yang, H., Zhan, M., Xu, X. D., & Li, G. J. (2010). Coupling effects of material properties and the bending angle on the springback angle of a titanium alloy tube during numerically controlled bending. *Materials & Design*, 31(4), 2001-2010.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.029>
- Joannic, D. (1998). *Modélisation mécanique et simulation numérique du retour élastique en emboutissage des tôles minces et optimisation paramétriques [Doctorat]*. Université de Franche-Comté des Sciences et Techniques.

- Kadkhodayan, M., & Pourhasan, R. (2009). Springback simulation of friction aided deep drawing process. Iran International Aluminum Conference-IIAC2009.
- Karağaç, İ., Önel, T., & Uluer, O. (2020). The effects of local heating on springback behaviour in v bending of galvanized DP600 sheet. *Ironmaking & Steelmaking*, 47(7), 807-813.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1615308>
- Karanjule, D. B., Bhamare, S. S., & Rao, T. H. (2018). Effect of young's modulus on springback for low, medium and high carbon steels during cold drawing of seamless tubes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 346, 012043. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/346/1/012043>
- Kayas, G. (2020). Électrolytes. In *Universalis*. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/electrolytes/>
- Keeler, S. P. (1965). Determination of Forming Limits in Automotive Stampings. 9.
<https://doi.org/10.4271/650535>
- Khamneh, M. E., Askari-Paykani, M., Shahverdi, H., Hadavi, S. M. M., & Emami, M. (2016). Optimization of spring-back in creep age forming process of 7075 Al-Alclad alloy using D-optimal design of experiment method. *Measurement*, 88, 278-286.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.003>
- Kim, H. S., & Koç, M. (2008). Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1-3), 370-383. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.059>
- Kiswanto, G., Mahmudah, A., & Priadi, D. (2017). Preliminary Investigation of Micro-V-Bending. *MATEC Web of Conferences*, 108, 06001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710806001>
- Laurent, H., Simões, V. M., Oliveira, M. C., & Menezes, L. F. (2018). The influence of warm forming conditions on the natural aging and springback of a 6016-T4 aluminum alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 418, 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/418/1/012020>

- Ledoux, Y. (2005). Optimisation des procédés d'emboutissage par caractérisation géométrique et essais numériques [Doctorat]. Savoie.
- Lee, S. W., & Yang, D. Y. (1998). An assessment of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81, 60-67. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00177-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00177-0)
- Lepadatu, P. D. (2006). Optimisation des procedes de mise en forme par approche couplee plans d'experiences, elements finis et surface de reponse [Doctorat]. Angers.
- Leu, D.-K. (2016). A simplified approach for distinguishing between spring-back and spring-go in free U-die bending process of SPFC 440 sheets. *Materials & Design*, 94, 314-321. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.020>
- Lévêque, R. (2013). Traitements et revêtements de surface des métaux. Dunod.
- Li, K. P., Carden, W. P., & Wagoner, R. H. (2002). Simulation of springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(1), 103-122. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00083-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00083-2)
- Li, K. P., Geng, L. M., & Wagoner, R. H. (1999). Simulation of springback with the draw/bend test. *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials. IPMM'99 (Cat. No.99EX296)*, 91-104 vol.1. <https://doi.org/10.1109/IPMM.1999.792458>
- Lin, C.-W., & Chen, F.-K. (2019). Formability study on stamping an engine hood with aluminum alloy sheet. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 651(1), 012103. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/651/1/012103>
- Liu, G., Lin, Z., Xu, W., & Bao, Y. (2002). Variable blankholder force in U-shaped part forming for eliminating springback error. *Journal of Materials Processing Technology*, 120(1-3), 259-264. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01110-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01110-4)
- Liu, J. G., Fu, M. W., Lu, J., & Chan, W. L. (2011). Influence of size effect on the springback of sheet metal foils in micro-bending. *Computational Materials Science*, 50(9), 2604-2614. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.04.002>

- Luo, D. (2009). Selection of coatings for tribological applications [Doctorat]. Université Jiaotong du Sud-Ouest.
- Ma, W., Zheng, X., Li, T., Yao, Y., Li, S., & Zhu, H. (2018). Influence of Process Parameters on Springback of S-Shaped U-Channel Stamping. 2nd International Conference on Applied Mathematics, Modelling and Statistics Application (AMMSA 2018), Sanya, China.
<https://doi.org/10.2991/ammsa-18.2018.16>
- Maati, A. (2016). Contribution à l'étude de la déformabilité des métaux lors de la mise en forme [Doctorat]. Université Ferhat Abbas Setif 1.
- Martin, R. (1985). Formage à la presse. *Techniques de l'Ingénieur*, 1(B7510), 6.
- Meinders, T., Konter, A. W. A., Meijers, S. E., & Atzema, E. H. (2005). A sensitivity analysis on the springback behavior of the Unconstrained Bending Problem. *AIP Conference Proceedings*, 778(1), 37. <https://doi.org/10.1063/1.2011232>
- Meslameni, W., & Salem, C. B. (2018). Optimisation du retour élastique en pliage par les plans d'expériences. *Conference Paper*, 5.
- Michaud, C. (2020). Qu'est ce que le traitement de surface. https://at-michaud.fr/principes_traitement_de_surface.php
- 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. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1-3), 365-368. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00925-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00925-1)
- Morestin, F., & Boivin, M. (1996). On the necessity of taking into account the variation in the Young modulus with plastic strain in elastic-plastic software. *Nuclear Engineering and Design*, 162(1), 107-116. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(95\)01123-4](https://doi.org/10.1016/0029-5493(95)01123-4)
- Mori, K., Akita, K., & Abe, Y. (2005). Springback of high strength steel and aluminium alloy sheets in bending using CNC servo press. 87-88.
- Mura, T. (1987). *Micromechanics of defects in solids* (Vol. 3). Springer Netherlands.
<https://doi.org/10.1007/978-94-009-3489-4>

- Nakagawa, Y., Mori, K., Yashima, S., & Kaido, T. (2018). Springback behaviour and quenchability in hot stamping of thick sheets. *Procedia Manufacturing*, 15, 1071-1078.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.385>
- Narayanasamy, R., & Padmanabhan, P. (2009). Modeling of springback on air bending process of interstitial free steel sheet using multiple regression analysis. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 3(1), 25-33. <https://doi.org/10.1007/s12008-009-0059-7>
- Normand, B. (2001). *Prévention et lutte contre la corrosion*.
<https://books.google.dz/books?id=wBTT4uUyJIUC>
- Ogier, A. (2021). *Pliage en l'air et pliage en frappe : Quelques notions techniques*.
http://cnrsm.fr/c_ressources_cnrsm/5_divers/510_pliage_toullec/DOSSIER%20COMPLET/Pdf/09_pliage_en_frappe_p83_87.pdf
- Ouakdi, E. H., Louahdi, R., Khirani, D., & Tabourot, L. (2012). Evaluation of springback under the effect of holding force and die radius in a stretch bending test. *Materials & Design*, 35, 106-112.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.003>
- Palaniswamy, H., Ngaile, G., & Altan, T. (2004). Optimization of blank dimensions to reduce springback in the flexforming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 146(1), 28-34. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00841-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00841-0)
- Panthi, S. K., Ramakrishnan, N., Ahmed, M., Singh, S. S., & Goel, M. D. (2010). Finite Element Analysis of sheet metal bending process to predict the springback. *Materials & Design*, 31(2), 657-662. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.022>
- Papeleux, L., & Ponthot, J.-P. (2002). Finite element simulation of springback in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 785-791.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00393-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00393-X)
- Peng, J. (2006). *Determination of residual stresses in coating by pseudo-grazing incidence X-Ray diffraction method [Doctorat]*. Engineering Sciences [physics]. Arts et Métiers ParisTech.

- Pham, Q. T., Song, J. H., Park, J. C., & Kim, Y. S. (2019). Investigation of Springback Prediction for an Aluminum 7000 Sheet Subjected to Press Forming. *Applied Mechanics and Materials*, 889, 203-210. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.889.203>
- Pourboghraat, F., Chung, K., & Richmond, O. (1998). A Hybrid Membrane/Shell Method for Rapid Estimation of Springback in Anisotropic Sheet Metals. *Journal of Applied Mechanics*, 65(3), 671-684. <https://doi.org/10.1115/1.2789110>
- Pouzols, V. (2011). Optimisation d'opérations industrielles de pliage par la méthode des éléments finis [Doctorat]. Grenoble.
- Pritima, D., & Padmanabhan, P. (2018). Investigation of sheet bending parameters on springback in nickel coated mild steel sheets using response surface methodology. *Mechanics & Industry*, 19(2), 206. <https://doi.org/10.1051/meca/2018009>
- 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(1), 116-127. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.08.007>
- Rajhi, W., Labergère, C., Badreddine, H., Saanouni, K., & Rassineux, A. (2009). Simulation numérique de l'endommagement ductile d'aciers à hautes performances. Essais d'expansion et de pliage. 19^{ème} Congrès Français de Mécanique, 6.
- Reddy, A. C. S., Rajesham, S., Reddy, P. R., Kumar, T. P., & Goverdhan, J. (1970). An experimental study on effect of process parameters in deep drawing using Taguchi technique. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 7(1), 21-32. <https://doi.org/10.4314/ijest.v7i1.3>
- Samuel, M. (2000). Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bendings of anisotropic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 105(3), 382-393. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00587-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00587-2)
- Saravanan, S., Saravauna, M., & Jeyasimman, D. (2018). Study on Effects of Spring Back on Sheet Metal Bending Using Simulation Methods. *International Journal of Mechanical and*

- Production Engineering Research and Development, 8(2), 923-932.
<https://doi.org/10.24247/ijmperdapr2018106>
- Sen, H., Yilmaz, S., & Yildiz, R. A. (2020). Springback Behavior of DP600 Steel : An Implicit. *Journal of Engineering Research*, 8, 252-264.
- Sniekers, R. R. (1996). Friction in deep drawing [Doctorat, echnische Universiteit Eindhoven.].
[https://research.tue.nl/en/publications/friction-in-deep-drawing\(4674fa4e-24af-4b34-a16e-9ff806bdef80\).html](https://research.tue.nl/en/publications/friction-in-deep-drawing(4674fa4e-24af-4b34-a16e-9ff806bdef80).html)
- Spathopoulos, S. C., & Stavroulakis, G. E. (2020). Springback Prediction in Sheet Metal Forming, Based on Finite Element Analysis and Artificial Neural Network Approach. *Applied Mechanics*, 1(2), 97-110. <https://doi.org/10.3390/applmech1020007>
- Srinivasan, R., & Karthik Raja, G. (2019). Experimental study on bending behaviour of aluminium-copper clad sheets in V-bending process. *Mechanics & Industry*, 20(6), 618.
<https://doi.org/10.1051/meca/2019059>
- Srinivasan, R., Vasudevan, D., & Padmanabhan, P. (2013). Application of response surface methodology for predicting springback in air bending of electro galvanised steel sheets. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 4(1), 35.
<https://doi.org/10.1504/IJMATEI.2013.052809>
- Srinivasan, R., Vasudevan, D., & Padmanabhan, P. (2014). Influence of friction parameters on springback and bend force in air bending of electrogalvanised steel sheet : An experimental study. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36(2), 371-376. <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0097-8>
- Sulaiman, S., Ariffin, M. K. A. M., & Lai, S. Y. (2012). Springback Behaviour in Sheet Metal Forming for Automotive Door. *AASRI Procedia*, 3, 224-229. <https://doi.org/10.1016/j.aasri.2012.11.037>
- Sumikawa, S., Ishiwatari, A., Hiramoto, J., & Urabe, T. (2016). Improvement of springback prediction accuracy using material model considering elastoplastic anisotropy and Bauschinger effect.

- Journal of Materials Processing Technology, 230, 1-7.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.004>
- Sun, P., Grácio, J. J., & Ferreira, J. A. (2006). Control system of a mini hydraulic press for evaluating springback in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 176(1-3), 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.02.009>
- Taâmallah, O. (2012). Effet des traitements mécaniques de surface (TMS) sur l'écrouissage et la ténacité d'un acier [Magister]. Badji Mokhtar Annaba.
- Tabourot, L., Balland, P., Bizet, L., Maati, A., & Pouzols, V. (2013). Modélisation du comportement élasto-plastique des tôles par un modèle compartimenté. 9.
- Tan, Z., Persson, B., & Magnusson, C. (1995). Plastic bending of anisotropic sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*, 37(4), 405-421. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(94\)00069-V](https://doi.org/10.1016/0020-7403(94)00069-V)
- Terrat, J.-P., & Cartier, M. (2000, mars). Comment poser un problème de traitement de surface. *Conception et Production*, 1(M1423). <https://www.techniques-ingenieur.fr/doi/10.51257/a/v1/m1423>
- Toros, S., Kilic, S., & Ozturk, F. (2011). The Effects of Material Thickness and Deformation Speed on Springback Behavior of DP600 Steel. *Advanced Materials Research*, 264-265, 636-645.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.636>
- Trzepiecinski, T., & Lemu, H. (2017). Effect of Computational Parameters on Springback Prediction by Numerical Simulation. *Metals*, 7(9), 380. <https://doi.org/10.3390/met7090380>
- 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. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1000055>

- Verma, R. K., & Haldar, A. (2007). Effect of normal anisotropy on springback. *Journal of Materials Processing Technology*, 190(1-3), 300-304.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.033>
- Vorkov, V., Aerens, R., Vandepitte, D., & Duflou, J. R. (2014). Springback Prediction of High-strength Steels in Large Radius Air Bending Using Finite Element Modeling Approach. *Procedia Engineering*, 81, 1005-1010. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.132>
- Wagoner, R., & Li, M. (2007). Simulation of springback : Through-thickness integration. *International Journal of Plasticity*, 23(3), 345-360. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.04.005>
- Wang, G., Zhu, G., Kou, L., Li, T., Liu, Z., Shang, X., Jiang, X., & Zhu, X. (2020). Effect of heat treatment conditions on stamping deformation and springback of 6061 aluminum alloy sheets. *Materials Research Express*, 7(1), 016512. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5d54>
- Wang, W., Wagoner, R. H., & Wang, X.-J. (1996). Measurement of friction under sheet forming conditions. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27(12), 3971-3981.
<https://doi.org/10.1007/BF02595646>
- Wan-Nawang, W.-A., Qin, Y., & Liu, X. (2015). An experimental study on the springback in bending of w-shaped micro sheet-metal parts. *MATEC Web of Conferences*, 21, 09015.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/20152109015>
- Wei, L., Yuying, Y., Zhongwen, X., & Lihong, Z. (2009). Springback control of sheet metal forming based on the response-surface method and multi-objective genetic algorithm. *Materials Science and Engineering: A*, 499(1-2), 325-328. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.121>
- Xia, Z. C., Miller, C. E., & Ren, F. (2004). Springback Behavior of AA6111-T4 with Split-Ring Test. *AIP Conference Proceedings*, 712(1), 934. <https://doi.org/10.1063/1.1766647>
- Xu, W. L., Ma, C. H., Li, C. H., & Feng, W. J. (2004). Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3), 217-222.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.044>

- Yanagimoto, J., & Oyamada, K. (2007). Mechanism of Springback-Free Bending of High-Strength Steel Sheets under Warm Forming Conditions. *CIRP Annals*, 56(1), 265-268.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.099>
- Yoshihara, S., Manabe, K., & Nishimura, H. (2005). Effect of blank holder force control in deep-drawing process of magnesium alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 170(3), 579-585. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.028>
- Zazi, N. (2011). Influence des effets de vieillissement et du laminage à froid sur la microstructure, associés aux propriétés mécaniques et chimiques des alliages Aluminium-Magnésium [Doctorat]. Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- Zhan, M., Wang, Y., Yang, H., & Long, H. (2016). An analytic model for tube bending springback considering different parameter variations of Ti-alloy tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 236, 123-137. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.05.008>
- Zhang, D., Cui, Z., Ruan, X., & Li, Y. (2007). An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending. *Computational Materials Science*, 38(4), 707-715.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2006.05.001>
- Zhang, Z. T., & Hu, S. J. (1998). Stress and residual stress distributions in plane strain bending. *International Journal of Mechanical Sciences*, 40(6), 533-543.
[https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(97\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(97)00075-1)
- Zhang, Z., Zhang, H., Shi, Y., Moser, N., Ren, H., Ehmann, K. F., & Cao, J. (2016). Springback Reduction by Annealing for Incremental Sheet Forming. *Procedia Manufacturing*, 5, 696-706.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.057>
- Zheng, Q., Shimizu, T., & Yang, M. (2016). Scale effect on springback behavior of pure titanium foils in microbending at elevated temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 230, 233-243. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.025>

Liste des figures

Figure 1. 1. Principaux procédés de mise en forme.	7
Figure 1. 2. Principaux procédés de mise en forme.	7
Figure 1. 3. Pliage en V, U et L.	9
Figure 1. 4. Schéma de l'état de contrainte dans l'épaisseur du flan en flexion.	11
Figure 1. 5. Diagramme d'Ishikawa pour les défaillances mécaniques.	12
Figure 1. 6. Les principaux défauts pour les procédés de mise en forme.	12
Figure 1. 7. Essai de traction	13
Figure 1. 8. Effet Bauschinger	14
Figure 1. 9. Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques.	16
Figure 1. 10. Courbe limite de formage typique d'un acier pour emboutissage.	17
Figure 1. 11. Diagramme de limite de formage, distinguant différent domaines	18
Figure 2. 1. Phénomène du retour élastique.	23
Figure 2. 2. Exemple d'ouverture d'une pièce en U après retour élastique.	24
Figure 2. 3. Variation du retour élastique en fonction de la température du pliage.	25
Figure 2. 4. Effet de la température des outils sur la variation du retour élastique.	26
Figure 2. 5. Influence de la force de serrage sur le retour élastique.	28
Figure 2.6. Schéma d'étirage-plier.	29
Figure 2. 7. Répartition des contraintes normales à travers l'épaisseur dans les deux cas	29
Figure 2. 8. Effet de la profondeur d'étirage sur le retour élastique.	30
Figure 2. 9. Effet des conditions de lubrification sur le retour élastique.	31
Figure 2. 10. Influence de la vitesse du poinçon sur retour élastique	33
Figure 2. 11. Effet du recuit sur le comportement du retour élastique.	34
Figure 2. 12. Effet du temps de maintien sur le retour élastique.	35
Figure 2. 13. Effet du module de Young sur le retour élastique	36
Figure 2. 14. Effet de la limite d'élasticité sur le retour élastique.	37
Figure 2. 15. Variation du coefficient d'anisotropie (R).	38
Figure 2. 16. Effet du coefficient d'anisotropie sur le retour élastique.	39
Figure 2. 17. Mise en évidence du phénomène Bauschinger (écrouissage cinématique)	40
Figure 2. 18. Effet Bauschinger sur le retour élastique.	41

Figure 2. 19. Effet du coefficient d'écrouissage sur le retour élastique.	42
Figure 2. 20. Evolution du retour élastique en fonction de l'épaisseur du revêtement.	43
Figure 2. 21. a) Effet du rapport Largeur/longueur sur le retour élastique.	44
Figure 2. 22. Effet de l'épaisseur de la tôle sur le retour élastique.	45
Figure 2. 23. Effet de l'ouverture de la matrice sur le retour élastique.	46
Figure 2. 24. Variation du retour élastique en fonction du rayon du poinçon.	47
Figure 2. 25. Influence de l'écart de la matrice sur le retour élastique.	47
Figure 2. 26. Variation du retour élastique en fonction du rayon de la matrice.	48
Figure 2. 27. Effet du nombre d'intégration et le temps de calcul sur le retour élastique.	51
Figure 2. 28. Effet du nombre de points d'intégration sur la valeur du coefficient du retour élastique pour Gauss'et Simpso.	52
Figure 2. 29. Effet du nombre d'éléments finis à travers l'épaisseur sur le retour élastique ...	53
Figure 2. 30. Comparaison expérimentale/numérique du rayon résiduel avec différents éléments pour différentes tailles de maille.	54
Figure 3. 1. Les propriétés fonctionnelles d'une surface.	59
Figure 3. 2. Principaux modes d'élaboration revêtement-traitement de surface.	60
Figure 3. 3. Domaines d'utilisation des revêtements et traitements de surface.	61
Figure 3. 4. Classification des revêtements.	62
Figure 3. 5. Schéma d'une cellule électrolytique.	65
Figure 3. 6. Schéma des principales étapes du procédé d'électrodéposition.	66
Figure 3. 7. Etat de surface d'une pièce non préparée.	67
Figure 3. 8. Exemple type d'une ligne industrielle de traitement de surface.	67
Figure 4. 1. Les paramètres de zingage et d'étamage.	76
Figure 4. 2. Les paramètres de nickelage et chromage.	76
Figure 4. 3. Le processus d'électrodéposition.	77
Figure 4. 4. Forme et dimensions de l'éprouvette de traction.	80
Figure 4. 5. Machine de traction de type MTS Criterion avec extensomètre.	80
Figure 4. 6. Courbes conventionnelles et rationnelle de traction des éprouvettes utilisées.	83
Figure 4. 7. Dispositif d'étirage-plier en U adapté sur la machine de traction.	85
Figure 4. 8. Dispositif d'étirage-plier en V adapté sur la machine de traction.	86
Figure 4. 9. Les différents cas du retour élastique final.	90

Figure 4. 10. Éprouvettes après étirage-plier en U et en V.....	91
Figure 4. 11 : Visualisation microscopique des tôles après un essai d'étirage-plier en V.....	94
Figure 5. 1. Effet de BHF sur l'angle du retour élastique primaire ($\Delta\theta_1$) d'essai d'étirage-plier en V.....	99
Figure 5. 2. Effet de BHF sur l'angle du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) d'essai d'étirage-plier en V.....	101
Figure 5. 3. Schéma représentatif explique les déformations sur les différentes zones, dans l'absence et la présence de la BHF.....	103
Figure 5. 4. Effet de BHF sur l'angle du retour élastique final aux extrémités ($\Delta\alpha$) d'essai d'étirage-plier en V.....	105
Figure 5. 5. Variation du retour élastique primaire (Δh_1) avec la force de serrage pour les différents types des revêtements métalliques d'essai d'étirage-plier en U.....	106
Figure 5. 6. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec la force de serrage pour les différents types des revêtements métalliques d'essai d'étirage-plier en U.....	108
Figure 5. 7. Effet de BHF sur l'angle du retour élastique final aux extrémités ($\Delta\alpha$) d'essai d'étirage-plier en U.....	109
Figure 5. 8. Variation du retour élastique primaire ($\Delta\theta_1$) avec la force de serrage pour les revêtements plastiques d'essai d'étirage-plier en V.....	111
Figure 5. 9. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) avec la force de serrage pour les revêtements plastiques d'essai d'étirage-plier en V.....	113
Figure 5. 10. Effet de BHF sur l'angle du retour élastique final aux extrémités ($\Delta\alpha$) d'essai d'étirage-plier en V.....	113
Figure 5. 11. Variation du retour élastique primaire ($\Delta\theta_1$) en fonction de la force de serrage pour revêtement par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-plier en V à deux profondeurs d'étirage.....	115
Figure 5. 12. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) en fonction de la force de serrage pour revêtement par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-plier en V à deux profondeurs d'étirage.....	116
Figure 5. 13. Variation du retour élastique primaire (Δh_1) avec la force de serrage pour revêtements par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-plier en U à deux profondeurs d'étirage.....	117

Figure 5. 14. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec la force de serrage pour revêtements par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-pliage en U.....	118
Figure 5. 15. Variation du retour élastique primaire ($\Delta \theta_1$) en fonction de la force de serrage pour acier cimenté d'essai d'étirage-pliage en V.	120
Figure 5. 16. Variation du retour élastique final ($\Delta \theta_2$) en fonction de la force de serrage pour acier cimenté d'essai d'étirage-pliage en V.....	121
Figure 5. 17. Variation du retour élastique final aux extrémités ($\Delta \alpha$) en fonction de la force de serrage pour acier cimenté d'essai d'étirage-pliage en V à deux profondeurs d'étirage.....	122
Figure 5. 18. Variation du retour élastique primaire (Δh_1) avec la force de serrage pour acier cimenté d'essai d'étirage-pliage en U.	123
Figure 5. 19. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec la force de serrage pour acier cimenté d'essai d'étirage-pliage en U.	124
Figure 5. 20. Variation du retour élastique final aux extrémités ($\Delta \alpha$) avec la force de serrage pour acier cimenté d'essai d'étirage-pliage en U.	124
Figure 5. 21. Variation du retour élastique primaire ($\Delta \theta_1$) avec l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-pliage en V.....	127
Figure 5. 22. Variation du retour élastique final ($\Delta \theta_2$) avec l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-pliage en V.....	128
Figure 5. 23. Variation du retour élastique final aux extrémités ($\Delta \alpha$) avec l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-pliage en V.....	129
Figure 5. 24. Variation du retour élastique primaire (Δh_1) avec l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-pliage en U.....	130
Figure 5. 25. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-pliage en U.....	131
Figure 5. 26. Variation du retour élastique final aux extrémités ($\Delta \alpha$) l'épaisseur du revêtement métallique d'essai d'étirage-pliage en U.....	132
Figure 5. 27. Effet de la profondeur d'étirage (h) sur l'angle final du R.E ($\Delta \theta_2$), pour les différents types des revêtements métalliques, durant l'essai d'étirage-pliage en V.....	134
Figure 5. 28. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec la profondeur d'étirage pour les différents types des revêtements métalliques d'essai d'étirage-pliage en U.....	136
Figure 5. 29. Variation du retour élastique final ($\Delta \theta_2$) avec la profondeur d'étirage pour les revêtements plastiques d'essai d'étirage-pliage en V.	138

Figure 5. 30. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) avec la profondeur d'étirage pour les revêtements par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-piage en V.....	139
Figure 5. 31. Variation du retour élastique final (Δh_2) avec la profondeur d'étirage pour revêtement par peinture cataphorèse d'essai d'étirage-piage en U.....	140
Figure 5. 32. Variation du retour élastique final ($\Delta\theta_2$) en fonction de la avec la profondeur d'étirage pour acier cimenté d'essai d'étirage-piage en V.	142
Figure 5. 33. Variation du retour élastique final (Δh_2) en fonction de la profondeur d'étirage pour acier cimenté d'essai d'étirage-piage en U.	143
Figure 5. 34. Effet de l'angle de pliage (θ°) sur l'angle final du retour élastique.....	144
Figure 5. 35. Effet de la rugosité (R_a) sur l'angle final du R.E ($\Delta\theta_2$) pour les différents types des revêtements métalliques d'essai d'étirage-piage en V.....	147
Figure 5. 36. Effet de la rugosité (R_a) sur le R.E final (Δh_2) pour les différents types des revêtements métalliques d'essai d'étirage-piage en U.	148
Figure 5. 37. Effet de la limite élastique (R_e) sur l'angle final du R.E ($\Delta\theta_2$) dans l'essai d'étirage-piage en V.	151
Figure 5. 38. Effet de la limite élastique R_e sur le R.E final (Δh_2) dans l'essai d'étirage-piage en U.	152
Figure 5. 39. Effet du module de Young (E) sur l'angle final du R.E ($\Delta\theta_2$) dans l'essai d'étirage-piage en V.	154
Figure 5. 40. Effet du module de Young (E) sur le R.E final (Δh_2) dans l'essai d'étirage-piage en U.	155
Figure 5. 41. Schéma de modélisation du processus d'étirage-piage	156
Figure 5. 42. Etapes de la simulation de l'étirage-piage en V d'une éprouvette en acier C5. $h=10\text{mm}$, $BHF=0\text{kN}$	159
Figure 5. 43. Exemple de répartition des contraintes dans la tôle.....	159
Figure 5. 44. Exemple de forme de la tôle au cours de la simulation..	160

Liste des tableaux

Tableau 2. 1. Paramètres influent sur le retour élastique.....	24
Tableau 3. 1. Différents procédés de traitement de surface à base de chrome.....	69
Tableau 4. 1. Composition chimique des aciers C5 et C6 respectivement.....	75
Tableau 4. 2. Les paramètres du processus d'électrodéposition	77
Tableau 4. 3. Les propriétés des revêtements.....	79
Tableau 4. 4. Propriétés mécaniques d'acier revêtu et non revêtu.....	84
Tableau 4. 5. Résultats de dureté.....	84
Tableau 4. 6. Caractéristiques des boulons utilisés.....	87
Tableau 4. 7. Relation entre BHF et le couple appliqué sur chaque boulon de serrage.....	87
Tableau 4. 8. Conditions expérimentales.	88