



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE



**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue d'obtention du diplôme Master Académique en**  
**Génie Mécanique**

Domaine : Génie de la Construction  
Filière : Génie Mécanique

Spécialité : **Fabrication Mécanique et Productique**

*Présenté par*

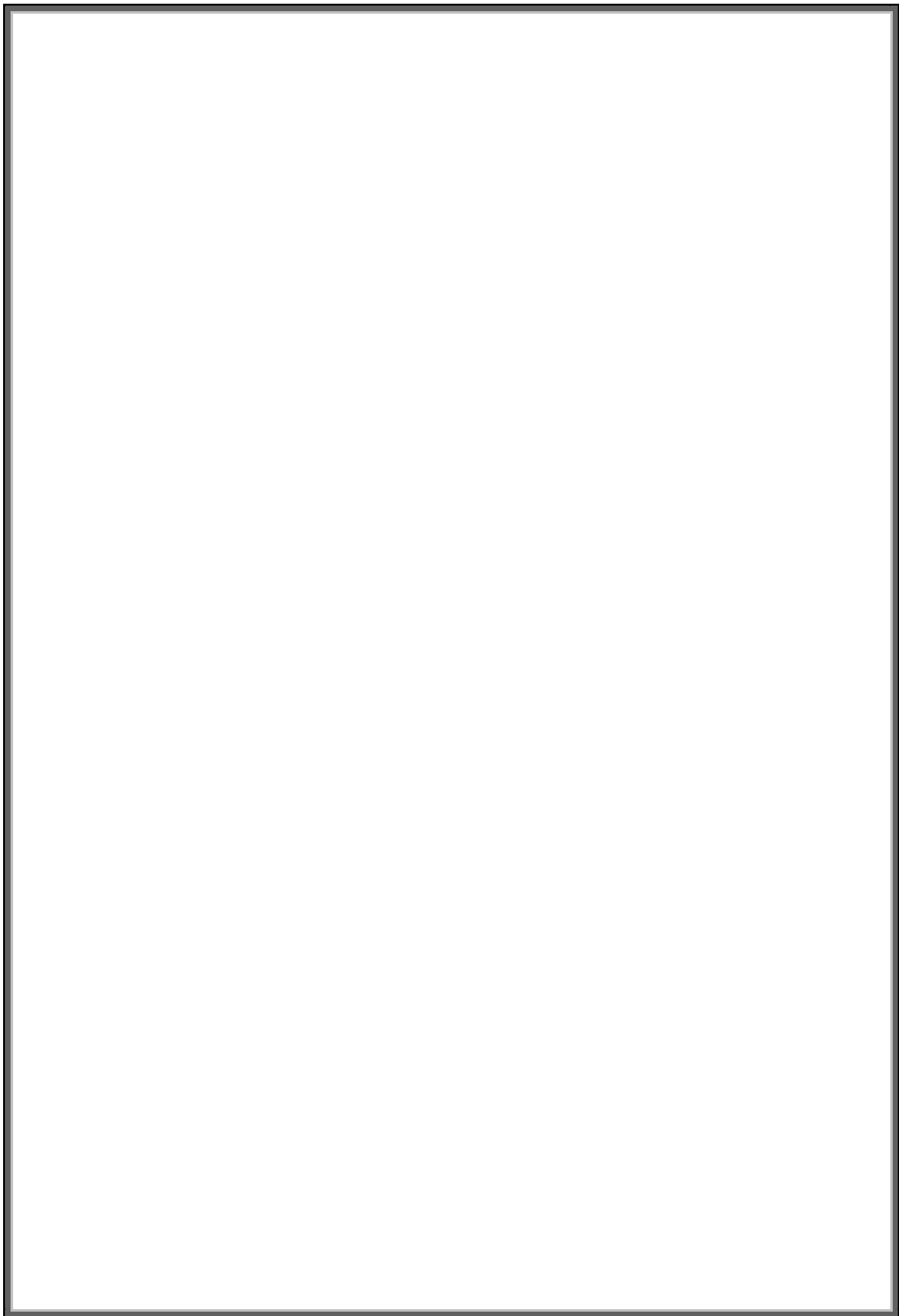
**SAIDANI AbdelKrim**

**Thème :**

**Simulation et Optimisation du procédé  
de pliage en V sur une tôle d'acier  
inoxydable austénitique 304L.**

*Mémoire soutenu publiquement le 09/07/2025, devant le jury composé de :*

<b>Mme. T. ABERKANE</b>	<b>Maitre de Conférence A, UMMTO</b>	<b>Présidente</b>
<b>Mr. R. DJERIDI</b>	<b>Maitre de Conférence A, UMMTO</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. M. ALMANSBA</b>	<b>Professeur, UMMTO.</b>	<b>Encadrant</b>
<b>Mr. M. BENCHERIF</b>	<b>Doctorant, UMMTO</b>	<b>Co-Encadrant</b>



# Remerciements

En premier lieu je voudrais remercier à Mr ALMANSBA, Promoteur de ce mémoire, pour son encadrement rigoureux, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de ce travail.

J'adresse également mes sincères gratitudees à Mr BENCHERIF M, Co-Promoteur pour son appui scientifique et son accompagnement sans faille tout au long de la réalisation du mémoire.

J'insiste aussi à adresser un merci tout particulier et appuyé à l'ensemble des membres du Laboratoire Élaboration et Caractérisation des Matériaux et Modélisation (LEC2M), pour leur accueil chaleureux, leur soutien technique et scientifique, ainsi que pour l'environnement de travail épanoui qu'ils m'ont offert tout au long de cette étape.

# Dédicaces

*Je tien à dédier ce travail*

*Tout d'abord mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

*A mes chers amis, pour leurs appuis et leurs encouragements, et les personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidé ou soutenu durant ce parcours*

*A toute la promotion M2 Fabrication Mécanique et Productique 2024/2025 pour tous les bons moments que nous avons partagé pendant nos études*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

***Karim***

# Table des matières

Remerciements .....	ii
Dédicaces .....	iii
Table des figures.....	vii
Liste des tableaux .....	ix
Résumé .....	x
Abstract .....	xi
Introduction Générale.....	12
I. Chapitre 1 : Généralités sur la mise en forme des tôles et du matériau étudié.....	14
I.1 Introduction .....	15
I.2 Les procédés de mise en forme dans le formage de tôles .....	15
I.2.1 Cintrage :.....	15
I.2.2 Emboutissage : .....	17
I.2.3 Étirement :.....	18
I.2.4 Formation de brides.....	19
I.2.5 Cisailage, poinçonnage et découpage : .....	20
I.2.6 Pliage de la tôle .....	22
I.2.7 Pliage en V .....	23
I.2.7.1 Définition du pliage en V .....	24
I.3 Retour élastique.....	25
I.4 Matériau de l'étude : .....	25
I.5 L'acier inoxydable 304L.....	26
I.6 Défauts associés au formage de la tôle .....	28
I.7 Conclusion.....	29
II. Chapitre 2 : Présentation de la méthodologie expérimentale et numérique.....	30
II.1 Introduction .....	31

II.2	Présentation des géométries .....	32
II.2.1	Présentation de l'éprouvette : .....	33
II.2.2	Machine utilisée : .....	33
II.3	Caractérisation du matériau : .....	35
II.4	Processus de pliage en V : .....	35
II.5	Simulation numérique : .....	36
II.5.1	Simulation sur ABAQUS .....	37
II.5.2	Simulation du pliage.....	37
II.5.3	Préparation de la simulation .....	38
II.5.4	Présentation des pièces.....	38
II.5.5	Présentation des conditions au limites .....	39
II.5.6	Présentation des interactions .....	40
II.6	Présentation du model d'optimisation.....	40
II.6.1	Optimisation avec solveur EXCEL .....	40
II.6.2	Étapes Méthodologiques de l'Optimisation avec Excel Solver .....	40
II.7	Cas d'application : prédiction du retour élastique .....	42
II.7.1	Utilisation de jeux de données variés.....	42
II.8	Analyse statistique et validation du modèle : .....	42
II.8.1	Coefficient de Détermination ( $R^2$ ).....	43
II.8.2	Mean Absolute Error (MAE).....	43
II.8.3	Organigramme de résolution.....	44
II.9	Conclusion.....	45
III.	<a href="#">Equation Chapter 3 Section 1</a> Chapitre III : Etude expérimentale et numérique du pliage et optimisation du retour élastique	46
III.1	Introduction .....	47
III.2	Traitement des données expérimentales (Retour Elastique) .....	48
III.3	Résultats de la simulation numérique de pliage : .....	49

III.3.1	Résultats simulation de pliage.....	51
III.4	Comparaison des résultats :.....	53
III.5	Le retour élastique.....	53
III.6	Résultats après retour élastique :.....	55
III.7	Discussion des résultats :.....	55
III.8	Résultats et données de bases pour l'optimisation.....	58
III.9	Résultats et discussions de la procédure d'optimisation.....	60
	<i>Conclusion et perspectives</i> .....	62
	Références.....	64

# Table des figures

Figure I-1 : Procédés de cintrage.....	16
Figure I-2 : Rouleuse 4 rouleaux.....	16
Figure I-3 : Rouleuse Planeur 3 rouleaux.....	17
Figure I-4 Rouleuse pyramidale.....	17
Figure I-5 Procédé d'emboutissage[4].....	18
Figure I-6 répartition des forces lors de l'emboutissage.....	18
Figure I-7 Procédé d'étirement d'une tôle.....	19
Figure I-8 Pièces obtenues par étirement.....	19
Figure I-9 principe de formation de bride.....	20
Figure I-10 Procédé de poinçonnage.....	20
Figure I-11 Procédé de poinçonnage.....	21
Figure I-12 Procédé de pliage.....	22
Figure I-13 Machine de pliage de tôle.....	23
Figure I-14 : Procédé de Pliage en V.....	25
Figure I-15 Représentation du retour élastique.....	25
Figure I-16 Image MEB de la microstructure de l'échantillon recuit à 650°C pendant 240 min, et histogramme de la taille des grains correspondant [14].....	27
Figure I-17 Courbe contraintes-déformation typiques à différentes températures du 304L[15].....	27
Figure II-1 : Exemples de géométries de matrices en 2D pour les angles de pliage de 30° et 45°.....	32
Figure II-2 Dimensions géométrique de l'éprouvette de pliage en V (304L AISI).....	33
Figure II-3 Machine de traction IBERTEST mod. ELIB-200E/W.....	33
Figure 21 Courbe Expérimentale (Force-Allongement) de l'acier inoxydable 304L.....	35
Figure II-5 Organigramme Etape de Simulation Abaqus.....	36
Figure II-6 : Courbe traction de l'acier inoxydable 304L.....	37
Figure II-7 Assemblage du Pliage sur ABAQUS.....	38
Figure II-8 Assemblage pour le Pliage à 60°.....	39
Figure II-9 Conditions aux limites.....	39
Figure II-10 Interactions (Contacts) appliqués.....	40
Figure II-11 : Représentation du retour élastique [21].....	42
Figure II-12 Organigramme d'élaboration du programme d'optimisation avec Python.....	44

Figure III-1 Exemple de mesure d'angle après retour élastique des éprouvettes 45° et 60°....	48
Figure III-2 : Courbe Angles voulu VS angles après retour élastique et courbe tendance.....	49
Figure III-3 Répartition de la contrainte de Von Mises sur l'éprouvette de traction à différents instant (Début de plasticité, Striction et à la rupture).....	50
Figure III-4 Courbe de traction numérique vs expérimentale .....	50
Figure III-5 Résultat du pliage à 30° .....	51
Figure III-6 Résultat de pliage à 45° .....	51
Figure III-7 Résultat du pliage à 90° .....	52
Figure III-8 : Outil de mesure QUERY intégré à ABAQUS .....	53
Figure III-9 : Distribution de la contrainte de Von Mises sur les éprouvettes en fin de simulation .....	54
Figure III-10 Angle de pliage et pourcentage de retour élastique .....	56
Figure III-11 Angle obtenus après pliage en fonction des angles de consigne .....	58
Figure III-12 : Optimisation du modèle linéaire .....	60

# Liste des tableaux

Tableau I-1 Composition de l'acier inoxydable 304L.....	26
Tableau I-2 Propriétés mécanique de l'acier inoxydable 304L.....	28
Tableau II-1 Fiche technique de la machine de traction.....	34
Tableau II-2 : Caractéristique mécanique de l'acier 304L.....	37
Tableau II-3 Avantages et détails du solveur EXCEL.....	41
Tableau II-4 Limites du solveur EXCEL.....	41
Tableau III-1 Proportion de retour élastique.....	48
Tableau III-2 : Angle de pliage et % de retour élastique.....	55
Tableau III-3 Données expérimentales Angle obtenus.....	58
Tableau III-4 Erreur pour les angles d'essais.....	59
Tableau III-5 Résumé des métriques obtenus après optimisation.....	60

# Résumé

Le pliage en V est un procédé de mise en forme largement utilisé dans le domaine de la transformation des tôles métalliques en raison de sa flexibilité, de sa simplicité de mise en œuvre et de sa pertinence pour une grande variété d'applications industrielles. Cependant, ce procédé est particulièrement sensible au phénomène de retour élastique, qui altère la précision géométrique de la pièce finale. Ce phénomène, lié à la nature élastoplastique des matériaux métalliques, est d'autant plus marqué dans les aciers inoxydables austénitiques tels que le 304L AISI, caractérisés par leur grande ductilité et leur résilience. L'objectif de ce travail est de mieux comprendre le comportement de l'acier inoxydable 304L lors du pliage en V, en mettant l'accent sur le retour élastique, et de proposer une méthode d'optimisation des paramètres de pliage permettant de le compenser efficacement. Des essais expérimentaux réalisés sur éprouvettes normalisées ont permis de mesurer les angles réels après décharge. Ces données ont été confrontées à une modélisation par éléments finis réalisée sous le logiciel ABAQUS afin de simuler le comportement mécanique de la tôle durant le pliage. Parallèlement, une optimisation mathématique du procédé a été effectuée à l'aide d'un modèle de régression linéaire validé statistiquement et intégré dans Excel, aboutissant à une prédiction fiable de l'angle de pliage avec un écart moyen inférieur à 1,5 %. Les résultats ont mis en évidence une très bonne concordance entre les mesures expérimentales et les simulations numériques, confirmant la robustesse du modèle développé. Ce mémoire démontre également la pertinence de l'utilisation d'outils simples et accessibles dans des problématiques complexes d'ingénierie, tout en ouvrant la voie à des approches plus avancées intégrant l'intelligence artificielle pour une compensation adaptative du retour élastique en contexte industriel.

**Mots Clés :** pliage en V, retour élastique, acier inoxydable 304L, éléments finis, optimisation, fabrication intelligente

# Abstract

V-bending is a widely employed metal forming process in sheet metal manufacturing due to its versatility, ease of implementation, and suitability for various industrial applications. However, one of the main challenges associated with this process is springback, a mechanical phenomenon resulting from the elastoplastic behavior of metallic materials, which compromises the geometric accuracy of the final bend angle. This effect is particularly pronounced in austenitic stainless steels such as AISI 304L, known for their high ductility and mechanical resilience. The aim of this study is to investigate the springback behavior in AISI 304L stainless steel during V-bending and to develop a method for optimizing bending parameters to effectively compensate for this phenomenon. Experimental tests were carried out on standardized specimens using an instrumented mechanical press to measure post-unloading bend angles. These measurements were complemented by finite element simulations using ABAQUS software, allowing for detailed analysis of stress and strain distributions during bending. Additionally, mathematical optimization was performed using a statistically validated linear regression model implemented in Excel, achieving accurate predictions with a mean angular deviation of less than 1.5%. The results show strong agreement between experimental observations and numerical simulations, confirming the reliability and robustness of the proposed model. This work also highlights the feasibility of integrating accessible and user-friendly tools into complex manufacturing challenges, while paving the way for future approaches based on artificial intelligence for adaptive springback compensation in smart industrial environments.

**Keywords:** V-bending, springback, AISI 304L stainless steel, finite element analysis, optimization, smart manufacturing

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

La transformation plastique des matériaux métalliques constitue un domaine stratégique du génie mécanique, en particulier dans les industries où la légèreté, la précision géométrique et la performance structurelle sont des critères essentiels. Parmi les procédés de mise en forme des tôles, le **pliage en V** représente une technique de référence, notamment en raison de sa simplicité de mise en œuvre, de sa flexibilité géométrique, et de sa pertinence pour la production de pièces à géométrie angulaire contrôlée. Cependant, malgré ses avantages indéniables, ce procédé est confronté à un défi majeur : le **retour élastique** (springback), qui désigne la récupération partielle de la déformation après retrait de la charge, compromettant ainsi la conformité dimensionnelle des pièces pliées.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique industrielle concrète et propose une démarche méthodologique rigoureuse pour **étudier, modéliser et optimiser le pliage en V de tôles en acier inoxydable 304L AISI**, un matériau connu pour ses excellentes propriétés mécaniques, mais également pour son comportement élastoplastique complexe. L'objectif principal de ce travail est double : d'une part, **quantifier expérimentalement le retour élastique** pour différents angles de pliage, et d'autre part, **développer un modèle prédictif** permettant de corriger ce phénomène à l'aide d'outils numériques et analytiques.

Pour ce faire, une **approche combinée expérimentale et numérique** a été adoptée. Des essais de pliage ont été réalisés en laboratoire sur des éprouvettes normalisées, tandis qu'une simulation par éléments finis via le logiciel **ABAQUS** a permis de reproduire fidèlement les phénomènes mécaniques associés au pliage. Ensuite, une phase d'**optimisation mathématique** à l'aide du **Solveur Excel** a permis d'ajuster les paramètres du modèle afin d'améliorer la précision angulaire des pièces finales. L'ensemble des résultats a été validé par une analyse statistique rigoureuse (MAE,  $R^2$ ), confirmant la fiabilité du modèle proposé.

Ce travail s'inscrit ainsi dans une perspective d'amélioration des procédés de formage, en vue de proposer une **solution prédictive, flexible et industrialisable**, répondant aux besoins actuels de la fabrication intelligente (Smart Manufacturing).

# **Chapitre 1 : Généralités sur la mise en forme des tôles et du matériau étudié**

## **I.1 Introduction**

Le formage des tôles est un pilier central de la fabrication mécanique moderne, jouant un rôle déterminant dans la production de composants aux formes complexes et aux performances fonctionnelles précises. Ce premier chapitre a pour objectif de présenter un panorama des principaux procédés de mise en forme des tôles, en mettant en exergue les mécanismes physiques, les machines utilisées ainsi que les défauts potentiels associés. Une attention particulière est portée au pliage en V, procédé essentiel dans l'industrie, notamment pour les applications nécessitant une grande précision géométrique et une adaptabilité des formes. Ce chapitre introduit également le matériau central de cette étude : l'acier inoxydable austénitique 304L (AISI), reconnu pour sa formabilité, sa résistance à la corrosion et ses propriétés mécaniques stables, bien que sujet à des phénomènes comme le retour élastique. L'analyse des procédés permet d'ancrer le travail dans une compréhension globale des enjeux industriels liés à la mise en forme des tôles métalliques.

## **I.2 Les procédés de mise en forme dans le formage de tôles**

Nous exposons une exploration approfondie des différents procédés de façonnage utilisés dans le formage de la tôle, chacun ayant des caractéristiques et des applications distinctes.

### **I.2.1 Cintrage :**

Le cintrage est un processus de mise en forme fondamental dans lequel des tôles plates sont déformées autour d'un axe linéaire de manière à obtenir une surface cylindrique ou conique. La surface extérieure de la courbure est soumise à une contrainte de traction, tandis que la surface intérieure est soumise à une contrainte de compression. Ce processus est utilisé pour créer des

angles, des brides et d'autres caractéristiques dans les pièces métalliques, et ce en utilisant différentes machines

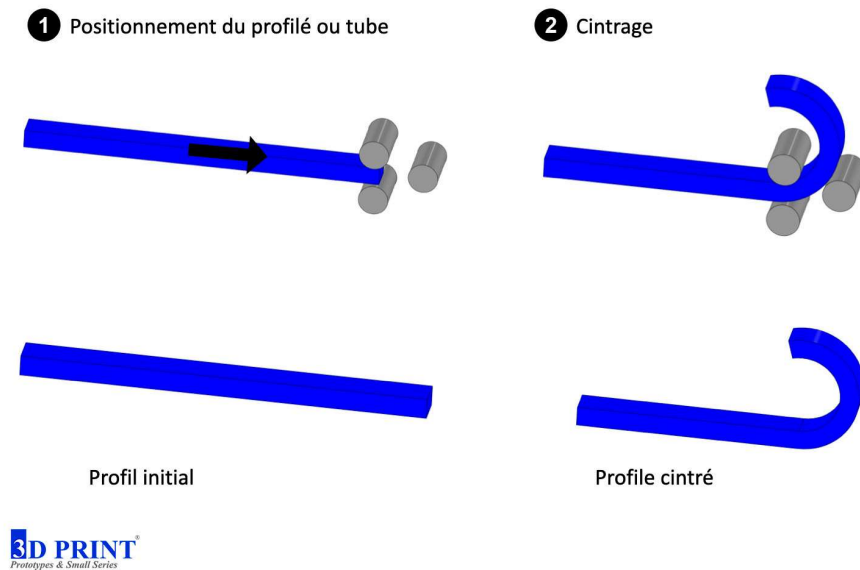


Figure I-1 : Procédés de cintrage

### I.2.1.1 Principe de cintrage

Le cintrage consiste à faire translater une tôle entre des rouleaux positionnés de manière à faire adopter une trajectoire circulaire à cette tôle et en fonction des diamètres et positions des rouleaux obtenir une forme cylindrique ou conique fermée ou ouverte selon la demande [1]

### I.2.1.2 Différents types de rouleuses

Il existe en effet plusieurs types de rouleuse différant selon le nombre la disposition et les mouvements des rouleaux, on distingue principalement :

#### 1. Les rouleuses 4 rouleaux :

Cette machine est conçue en ayant un 4<sup>ème</sup> rouleau permettant d'éviter le retournement de la tôle lors de l'opération



Figure I-2 : Rouleuse 4 rouleaux

## 2. Rouleuse a 3 rouleaux :

Cette machine dispose de 2 rouleaux placés verticalement entrainant par pression la tôle et un rouleau placé en amont permettant de définir le rayon de courbe selon sa trajectoire soit : translation ou déplacement oblique



Figure I-3 : Rouleuse Planeur 3 rouleaux

## 3. Rouleuse pyramidale :

Ce type de machine possède 3 rouleaux disposé de manière à former un triangle isocèle elle comporte 2 rouleaux d'entraînement et un rouleau de cintrage



Figure I-4 Rouleuse pyramidale

### I.2.1.3 Défaits rencontrés

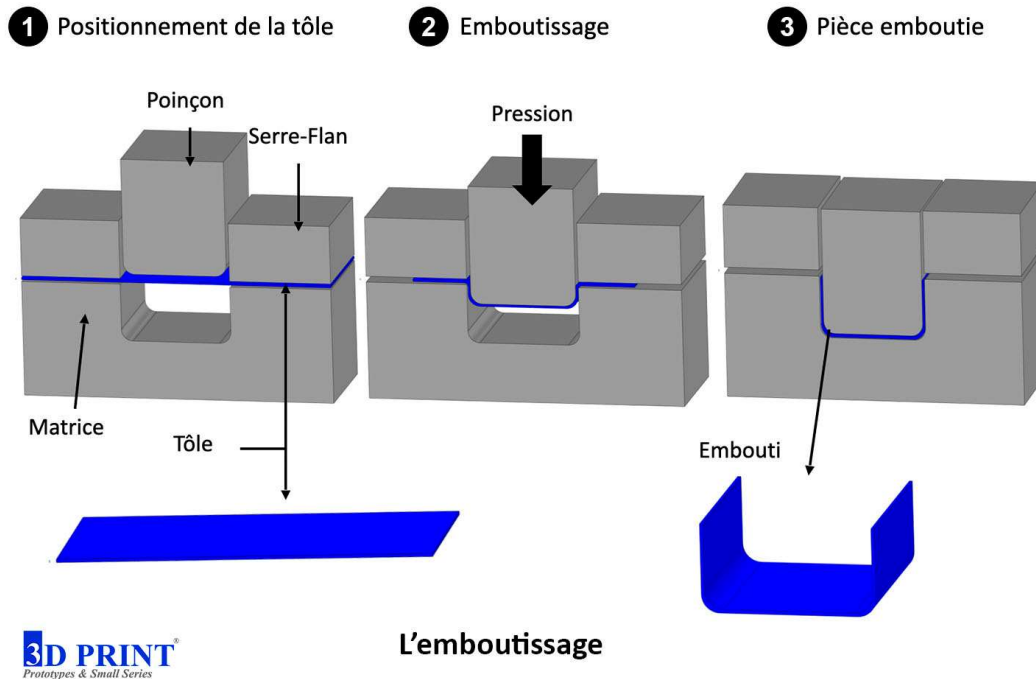
Les principaux défauts de ce procédé sont :

- Le retour élastique des tôles
- L'erreur de cylindrique
- L'erreur de l'ovalie
- L'erreur d'entortillage
- L'erreur de tonneau
- L'erreur de tonneau inversé
- L'erreur de trajectoire incorrecte

## I.2.2 Emboutissage :

L'emboutissage est un processus qui transforme une feuille plate en une forme creuse en la dessinant en matrice. Cette technique est largement utilisée pour produire des articles tels que des canettes, des pièces automobiles et des éviers de cuisine. Le processus nécessite un contrôle

minutieux du flux et de l'épaisseur du matériau pour éviter les défauts tels que le froissement ou la déchirure [2], [3].



L'emboutissage

Figure I-5 Procédé d'emboutissage[4]

### I.2.2.1 Principe de l'emboutissage :

L'emboutissage consiste à maintenir tout en étirant une tôle entre deux serre-flan ensuite appliquer une pression avec un poinçon sur la tôle pour obtenir la forme d'une matrice préalablement définie

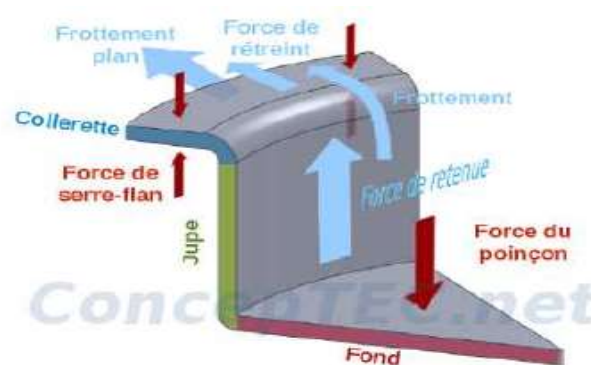


Figure I-6 répartition des forces lors de l'emboutissage

### I.2.3 Étirement :

L'étirement consiste à allonger la tôle pour obtenir la forme ou la dimension souhaitée. Ce procédé est souvent utilisé conjointement avec d'autres méthodes de formage de traction et

compression pour déformer les pièces au-delà de la limite élastique du matériau afin d'améliorer ses propriétés mécaniques finales, telles que l'amélioration de la résistance et de la ductilité [5].

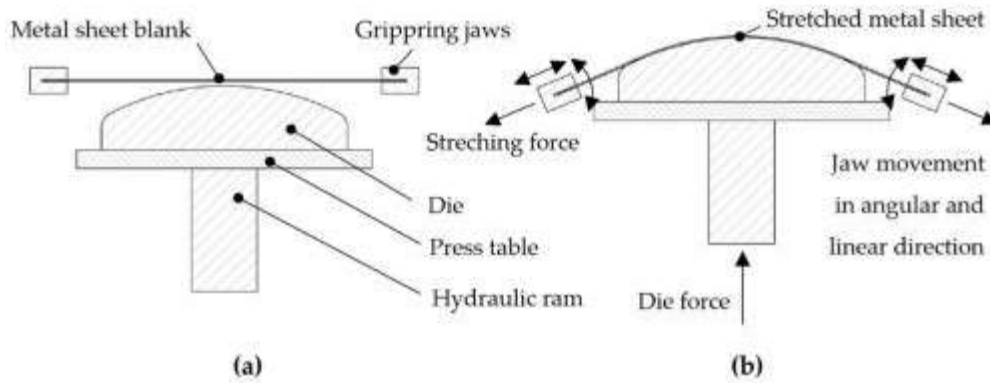


Figure I-7 Procédé d'étirement d'une tôle

### I.2.3.1 Principe de l'étirement d'une tôle :

Ce procédé consiste à étirer une tôle sur une matrice pour avoir des formes précise et des propriétés spécifiques après déformation plastique due à l'écroutissage agissant sur la tôle pendant cette opération

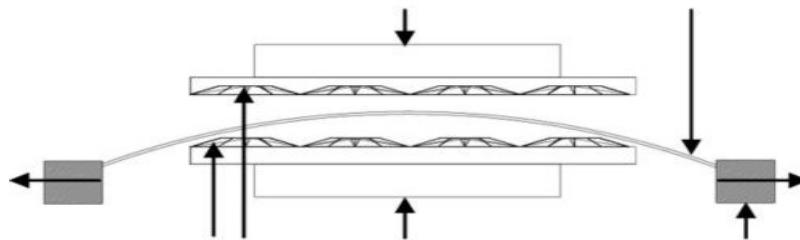


Figure I-8 Pièces obtenues par étirement

## I.2.4 Formation de brides

La fabrication en plusieurs étapes de pièces complexes nécessite d'agir par des procédés intermédiaires tel que la formation de brides afin d'obtenir des résultats géométriques et mécaniques précis

### I.2.4.1 Principe de formation de brides

Une tôle ayant effectué un poinçonnage nécessitant d'être pliée sera réalisée à l'aide du procédé de formation de bride afin de garantir l'étirement homogène et complète du poinçonnage précédemment reçu.

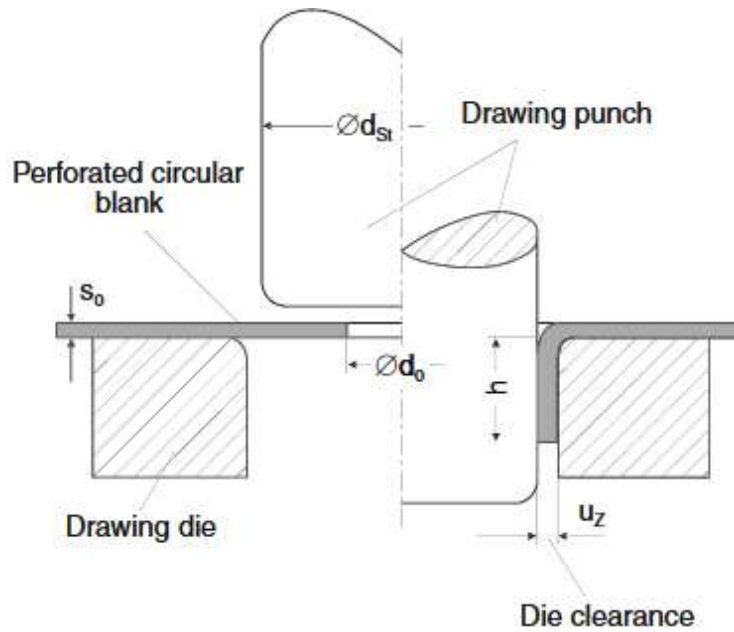


Figure I-9 principe de formation de bride

### I.2.5 Cisailage, poinçonnage et découpage :

Ces procédés impliquent de découper la tôle selon des formes et des dimensions spécifiques. Le cisaillement est utilisé pour couper le matériau, tandis que le poinçonnage crée des trous et que le découpage supprime des sections pour former le contour souhaité de la pièce.

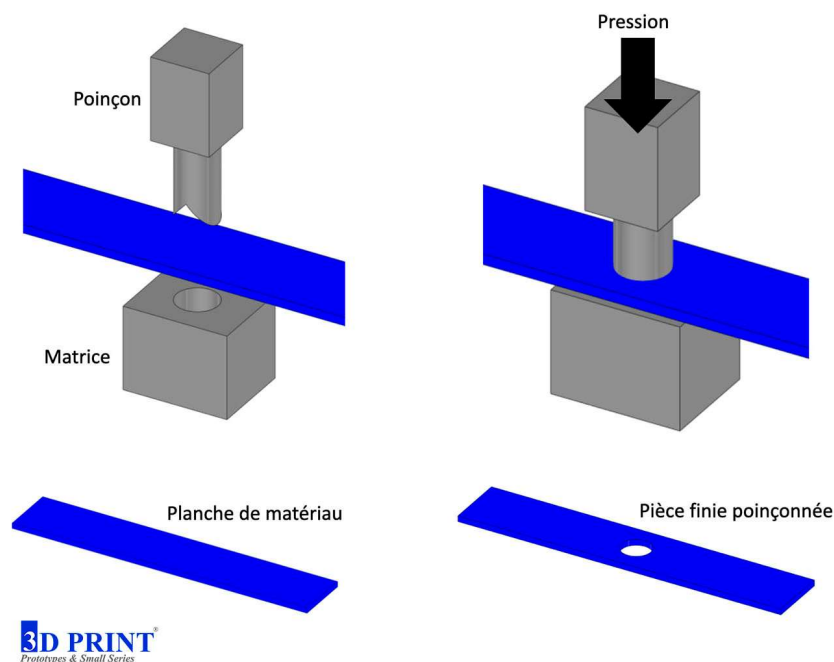
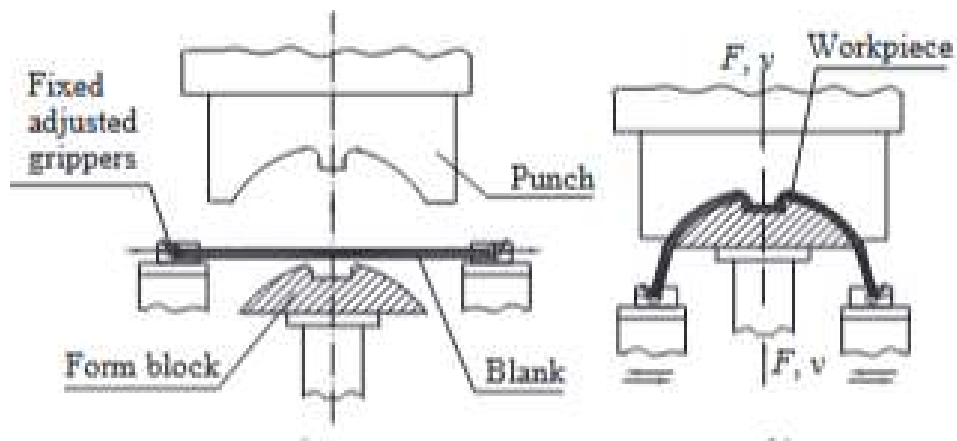


Figure I-10 Procédé de poinçonnage

**I.2.5.1 1.Principe :**

La tôle maintenue entre deux serre-flanc subit une pression avec poinçon et ainsi la forme de la matrice est obtenue. Le résultat obtenu varie selon le poinçon, la matrice et les forces appliquées.



*Figure I-11 Procédé de poinçonnage*

**I.2.5.2 Inconvénients du procédé :**

- Limite d'épaisseur des tôles
- Usure des poinçons
- Défauts de surface sur les contours découpés
- Déformation de la tôle après plusieurs opérations

## I.2.6 Pliage de la tôle

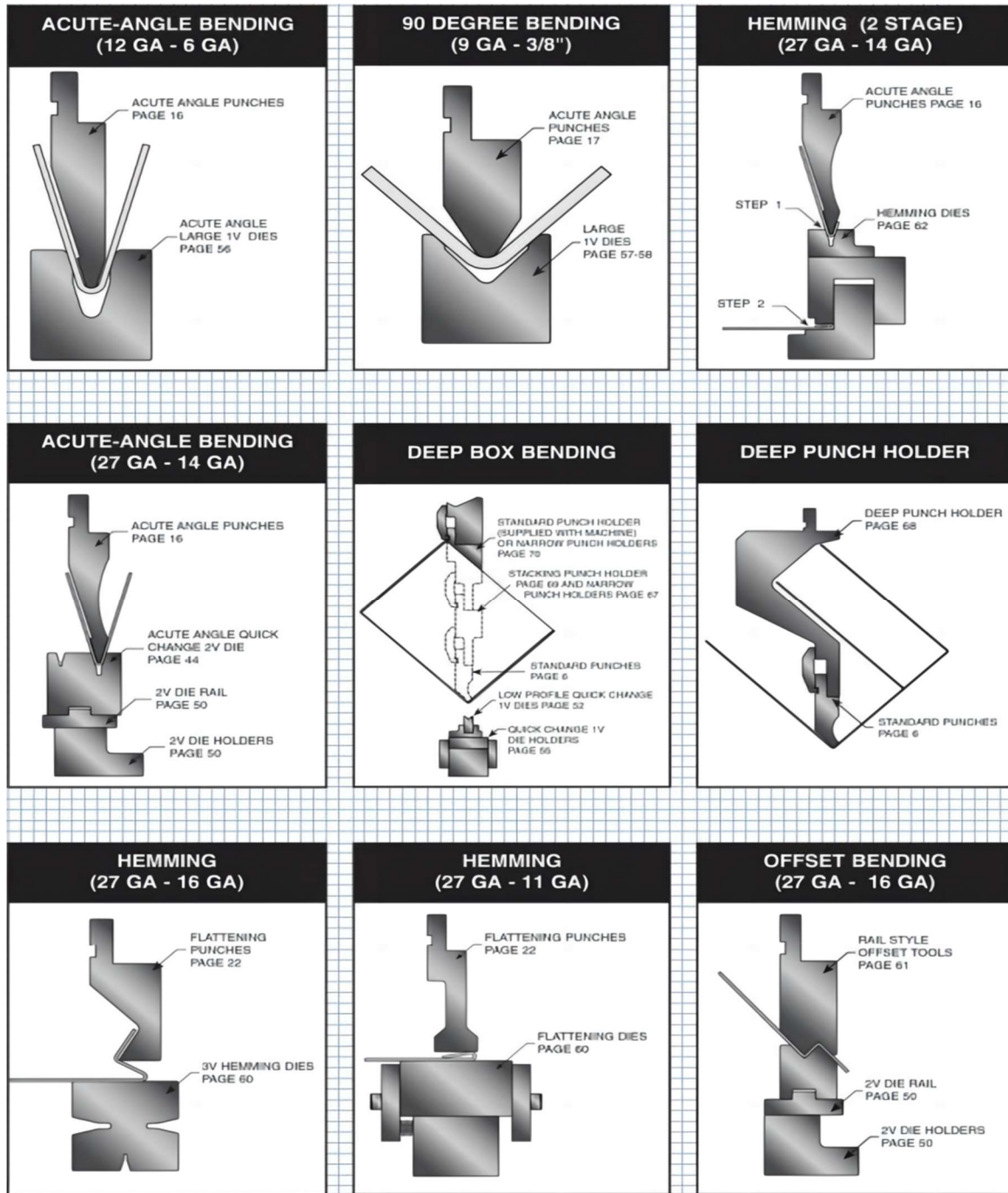


Figure I-12 Procédé de pliage

### I.2.6.1 Description du processus de pliage :

Le processus de pliage consiste à serrer la feuille entre les ailes supérieure et inférieure, l'extrémité libre étant formée en faisant pivoter l'aile de pliage. Cet angle d'oscillation est critique car il correspond à l'angle de flexion de la feuille plus la valeur du retour élastique, qui est la tendance du matériau à reprendre sa forme d'origine après le pliage

**Comparaison avec le pliage** : Contrairement au pliage à matrice, où l'outil se déplace de manière linéaire, les machines à plier utilisent un mouvement de pivotement. Cette différence de mouvement affecte la mécanique du processus de pliage et la forme résultante de la pièce

**Simulations FEM** : les simulations de la méthode des éléments finis (FEM) sont mentionnées comme un outil permettant de déterminer l'angle de pivotement requis et d'analyser les contraintes résiduelles dans la tôle après pliage. Cela indique que l'accent est mis sur les aspects techniques du processus de pliage et sur la manière dont les simulations peuvent aider à optimiser les paramètres de pliage

**Influence de la cinématique** : La ligne de flexion et les forces impliquées lors du pliage dépendent fortement de la cinématique de l'aile repliable. Cela suggère que la conception et le fonctionnement de la plieuse jouent un rôle important dans l'efficacité du processus de pliage.

**Considérations relatives aux rayons de courbure** : Pour obtenir des rayons de courbure précis, il est nécessaire d'ajuster la distance entre les ailes en conséquence. Cela met en évidence la précision requise dans le processus de pliage pour répondre à des exigences de conception spécifiques. [6]

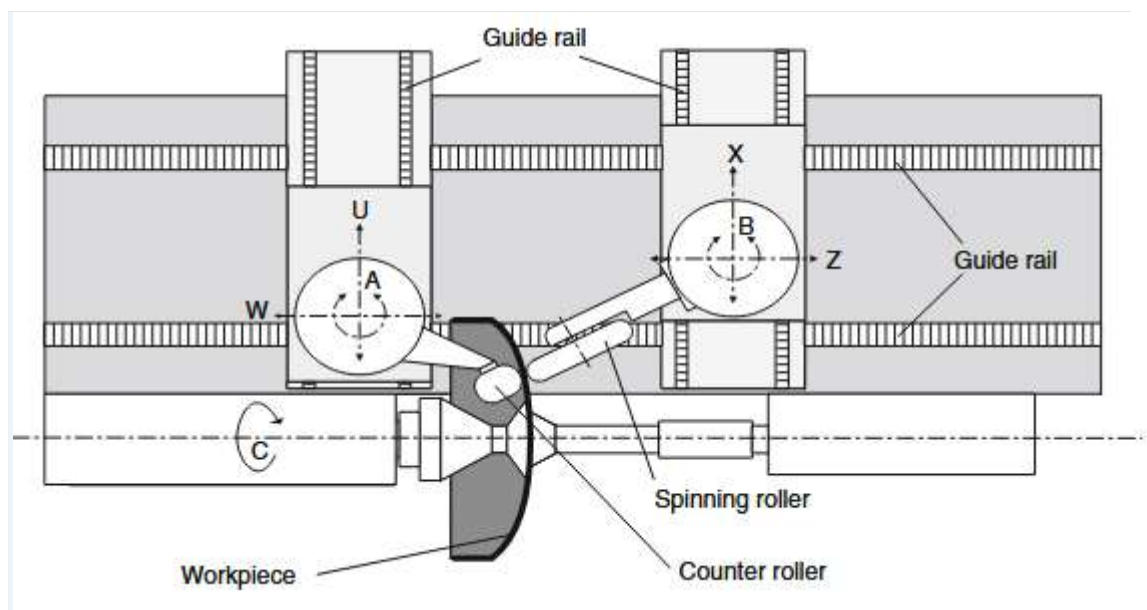


Figure I-13 Machine de pliage de tôle

### I.2.7 Pliage en V

Le pliage en V est une technique spécifique utilisée dans le formage de la tôle. Ses principales caractéristiques sont :

### ***1.2.7.1 Définition du pliage en V :***

Le pliage en V est une méthode dans laquelle la tôle est pliée en forme de V. Ce processus est essentiel pour créer des angles et des formes spécifiques dans les composants métalliques, qui sont souvent nécessaires dans diverses applications.

### ***1.2.7.2 Mécanique du pliage en V :***

Les mécanismes impliqués dans le pliage en V incluent généralement l'utilisation d'une machine à plier qui applique un mouvement de translation verticale à un poinçon qui fait pression sur une tôle afin d'obtenir un angle en V selon les paramètres prédéfinis du pliage.

### ***1.2.7.3 Importance de l'angle d'oscillation :***

L'angle de pivotement pendant le processus de pliage en V est crucial car il détermine l'angle final du pli. Il est essentiel de tenir compte de l'effet de retour élastique.

### ***1.2.7.4 Simulations FEM dans le processus de pliage en V :***

L'utilisation de simulations par éléments finis (FEM) est considérée comme un outil précieux dans le processus de pliage en V. Ces simulations permettent de prévoir l'angle de pivotement requis et de comprendre les contraintes résiduelles qui persistent dans la tôle après le pliage. Cette approche analytique permet d'optimiser le processus de pliage pour une précision et une efficacité accrue.

### ***1.2.7.5 Cinématique et dépendance à la force :***

Les forces impliquées dans le pliage en V et la ligne de flexion qui en résulte sont influencées de manière significative par la cinématique de l'aile repliable. Cela signifie que la conception et le fonctionnement de la plieuse sont essentiels pour obtenir les résultats souhaités dans le processus de pliage en V.

### ***1.2.7.6 Applications et pertinence industrielle :***

Le pliage en V est largement utilisé dans des secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale et la construction, où des composants métalliques précis sont essentiels. La capacité de créer efficacement des formes complexes fait du pliage en V une technique précieuse dans la fabrication moderne.

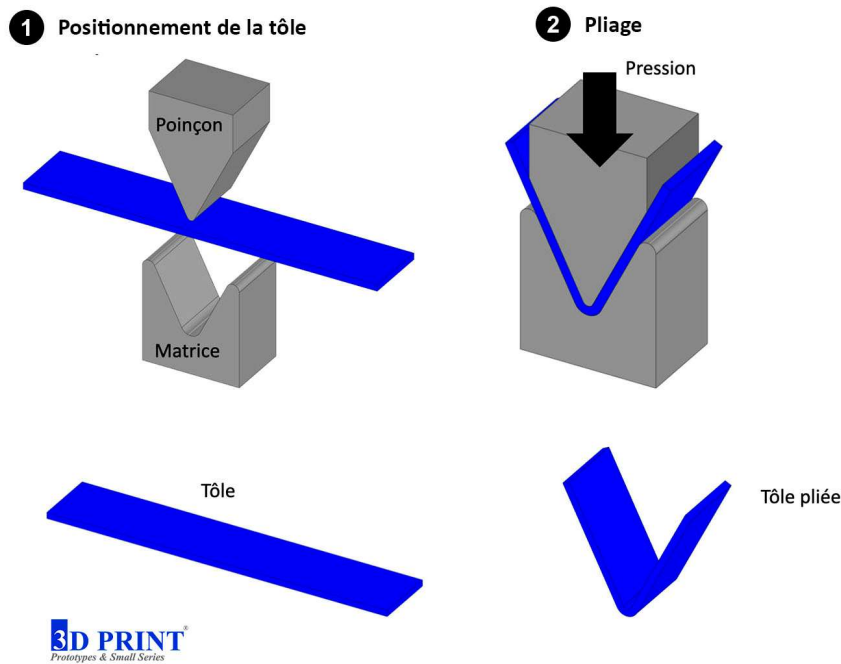


Figure I-14 : Procédé de Pliage en V

### I.3 Retour élastique

C'est est la tendance du matériau à reprendre sa forme d'origine une fois la force de flexion supprimée lors d'un pliage en V. Cela nécessite des calculs précis pour définir le retour élastique et garantir ainsi que le produit final répond aux spécifications

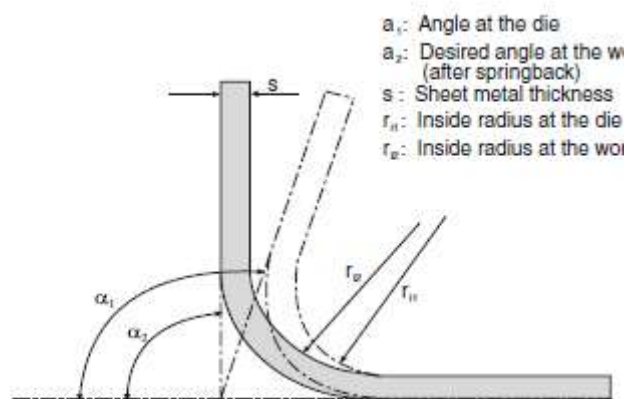


Figure I-15 Représentation du retour élastique

### I.4 Matériau de l'étude :

Les aciers inoxydables austénitiques représentent environ 70 % de la production mondiale d'acier inoxydable, soulignant leur prédominance industrielle et leur polyvalence d'utilisation dans des secteurs critiques tels que la chimie, l'énergie, les transports et les équipements ménagers [7]. Les nuances AISI 304 et AISI 316, issues du système d'alliage Fe-Cr-Ni, sont les

plus répandues, avec des compositions typiques de 18 % de chrome et 8 % de nickel. Cette configuration stabilise leur microstructure austénitique à température ambiante, rendant ces aciers non magnétiques [8]. Sur le plan mécanique, les aciers inoxydables austénitiques présentent une excellente combinaison de résistance à la corrosion, de ductilité, de ténacité et de soudabilité. Cependant, leur limite d'élasticité à l'état recuit reste relativement faible, typiquement autour de 200 MPa, ce qui limite certaines applications structurelles sans traitement mécanique ou thermique complémentaire [9].

Des procédés comme la nitruration ou le formage à froid peuvent toutefois améliorer leur résistance superficielle ou induire localement une phase martensitique durcie. Grâce à leurs propriétés combinées, les aciers inoxydables austénitiques trouvent des applications variées dans les échangeurs thermiques, les systèmes de tuyauterie, les équipements biomédicaux et les composants automobiles, notamment en raison de leur aptitude à résister à des environnements agressifs et à des contraintes mécaniques modérées [10],[11]

*Tableau I-1 Composition de l'acier inoxydable 304L*

<i>EURONORM EN 10088-1</i>		<i>AISI</i>	<i>AFNOR NFA 35573/574</i>	<i>Valeur représentée en % de masse</i>		
<i>Numérique</i>	<i>Symbolique</i>	<i>Américaine</i>	<i>Française</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>
<b>14 301</b>	X5CrNi18 10	304	Z7CN 18 09	17–19,5	-	8 – 10,5
<b>14 307</b>	X2CrNi18 9	304L	Z3CN18 09	18 – 20	-	10 – 12
<b>14 401</b>	X5CrNiMo17 12 2	316	Z7CND17 11 02	16,5 – 18,5	2 – 2,5	oct-13
<b>14 404</b>	X2CrNiMo17 12 2	316L	Z6CND17 12	16,5 – 18,5	2 – 2,5	oct-13

## **I.5 L'acier inoxydable 304L**

L'acier inoxydable austénitique AISI 304L, variante à faible teneur en carbone du 304, est largement utilisé dans les industries chimique, pétrochimique, alimentaire et biomédicale en raison de sa remarquable résistance à la corrosion, sa bonne formabilité et sa soudabilité. Cette nuance est particulièrement prisée pour la fabrication de composants exposés à des environnements agressifs ou nécessitant des soudures critiques, du fait de sa résistance accrue à la corrosion intergranulaire. Les propriétés mécaniques typiques incluent une résistance à la traction d'environ 500–600 MPa et une limite d'élasticité de l'ordre de 200–250 MPa, combinées à une ductilité élevée, avec un allongement à la rupture dépassant souvent 40 % [12].

L'alliage 304L bénéficie également des récents développements en fabrication additive, notamment par fusion laser sur lit de poudre (SLM) ou dépôt dirigé, qui permettent de produire des composants complexes tout en maintenant d'excellentes performances mécaniques et une résistance à la corrosion satisfaisante [13]. Par ailleurs, des traitements thermomécaniques innovants, comme la réversion de martensite induite par déformation, permettent de raffiner la microstructure jusqu'à des grains nanométriques ( $\sim 85$  nm), conduisant à des résistances à la traction supérieures à 1200 MPa tout en conservant une ductilité notable (41 %), ce qui ouvre la voie à son utilisation dans l'industrie automobile pour des composants structurels à haute performance [14].

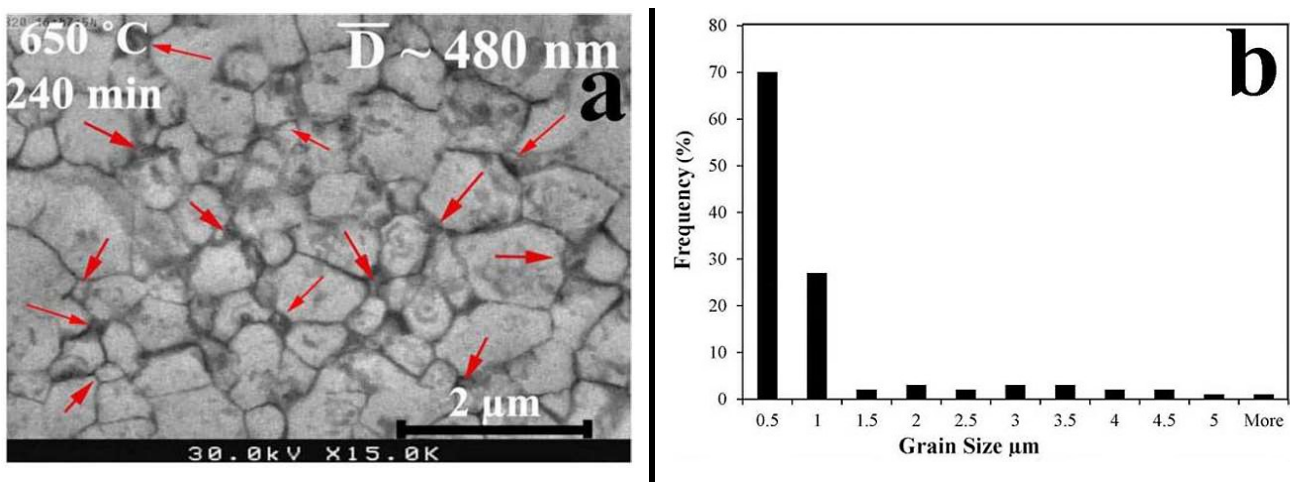


Figure I-16 Image MEB de la microstructure de l'échantillon recuit à 650°C pendant 240 min, et histogramme de la taille des grains correspondant [14].

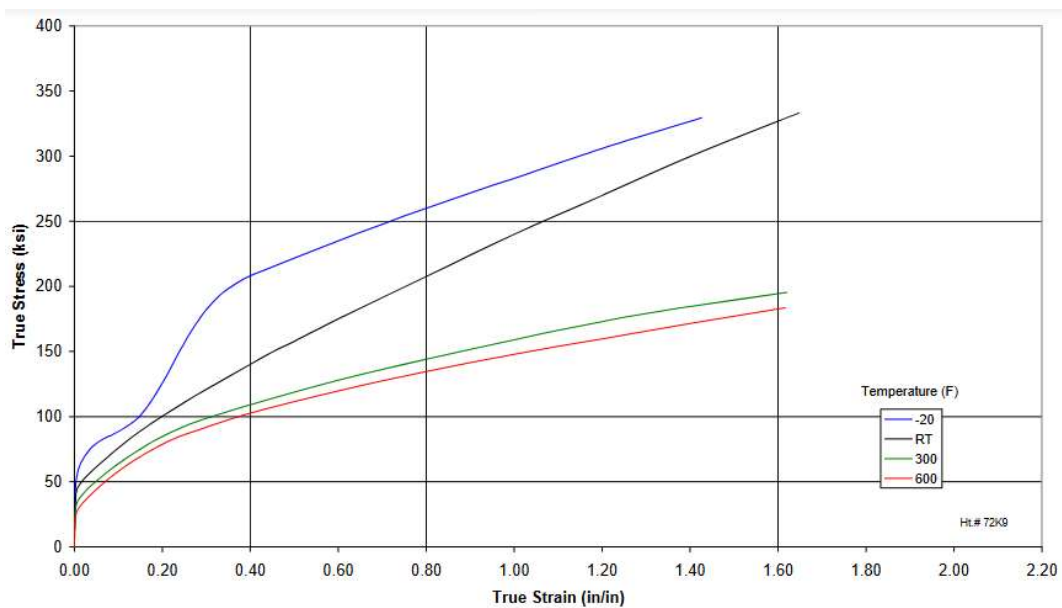


Figure I-17 Courbe contraintes-déformation typiques à différentes températures du 304L[15]

Les propriétés bénéfiques du 304L, telles qu'une résistance élevée et une ductilité exceptionnelle, sont attribuées à la martensite induite par la déformation (DIMIT) qui se produit pendant le traitement. Cette propriété est cruciale pour les applications nécessitant des matériaux capables de résister à des déformations importantes sans défaillance

Le 304L est largement utilisé dans diverses applications en raison de son excellente résistance à la corrosion et de ses propriétés mécaniques, ce qui le rend adapté aux environnements où ces caractéristiques sont critiques [11]

Tableau I-2 Propriétés mécanique de l'acier inoxydable 304L

Dénomination		Limite d'élasticité en MPa	Résistance à la traction en MPa	Allongement en %	Dureté HRB	Coefficient de dilatation thermique K
EN	AISI316					
1.4301	304	210-230	520-720	45	80	17.5
1.4307	304L	200-220	500-670	45	79	18
1.4401	316	220	530-730	40	-	17.5
1.4404	316L	220-240	520-680	40-45	79	17.5

### I.6 Défauts associés au formage de la tôle

**Fissuration et déchirure** : Lors de processus tels que l'emboutissage, des contraintes de traction élevées peuvent entraîner des fissures et des déchirures des bords métalliques, en particulier lorsque le rapport entre le diamètre de la bride et le diamètre du trou augmente. Il s'agit d'un défaut critique qui peut compromettre l'intégrité de la pièce formée. [16]

**Dimensions inexactes** : Si une grande précision est requise pour les pièces pliées, l'utilisation de matrices spéciales est essentielle. Une conception inadéquate de la matrice peut entraîner des imprécisions dans les dimensions finales de la pièce, affectant ainsi son ajustement et sa fonction. [16]

**Imperfections de surface** : Des défauts tels qu'une mauvaise finition de surface ou des marques indésirables peuvent survenir en raison d'une conception inappropriée de la matrice ou d'une manipulation des matériaux pendant le processus de formage. Ces imperfections peuvent affecter la qualité esthétique et fonctionnelle du produit final. [16]

**Déformation** : Le processus de pliage peut parfois entraîner une distorsion de la pièce, la forme finale s'écartant de la conception prévue en raison de forces inégales ou d'un mauvais alignement de la matrice. [16]

**Problèmes de flux de matières** : Un contrôle inadéquat du flux de matière pendant le formage peut entraîner une épaisseur inégale ou des points faibles dans le produit final, ce qui peut entraîner une défaillance sous charge. [16]

### I.7 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons pu mettre en lumière les différentes techniques de mise en forme des tôles, en détaillant leurs principes, leurs limitations et leurs applications. Le pliage, en particulier le **pliage en V**, s'est révélé être un procédé à la fois simple et complexe, en raison des phénomènes physiques comme le **retour élastique** qui influencent directement la précision dimensionnelle des pièces. La présentation du **matériau 304L**, avec ses caractéristiques spécifiques, constitue une base essentielle pour comprendre les défis liés à la modélisation et à l'optimisation de ce procédé. Ce socle théorique prépare ainsi le terrain pour les investigations expérimentales et numériques détaillées dans les chapitres suivants, en vue d'améliorer la maîtrise du processus et d'en accroître la précision.

## **Chapitre 2 : Présentation de la méthodologie expérimentale et numérique**

### II.1 Introduction

Le pliage en V représente l'un des procédés les plus couramment utilisés dans l'industrie de la mise en forme des tôles, notamment en raison de sa simplicité de mise en œuvre, de sa flexibilité géométrique et de son adaptabilité aux petites et moyennes séries de production. Ce procédé repose sur un principe fondamental : la tôle métallique est positionnée sur une matrice en forme de V, puis déformée plastiquement par l'action d'un poinçon se déplaçant verticalement. La géométrie finale de la pièce est directement influencée par plusieurs paramètres, notamment l'angle de la matrice, la force appliquée, les propriétés mécaniques du matériau, et les conditions de contact entre les outils et la pièce.

Cependant, malgré sa large diffusion, le pliage en V reste sujet à des phénomènes indésirables, en particulier le **retour élastique** (springback), qui perturbe la précision angulaire des pièces après relâchement des efforts. Afin de mieux comprendre et maîtriser ce phénomène, une approche méthodologique combinant **expérimentation physique** et **simulation numérique** a été adoptée dans le cadre de ce travail. Ce chapitre a pour objectif de présenter de manière détaillée la méthodologie suivie dans cette étude. Dans un premier temps, les essais expérimentaux réalisés sur des éprouvettes en acier inoxydable 304L AISI seront décrits, en précisant les conditions de mise en œuvre, les outils utilisés ainsi que le protocole de mesure des angles de pliage avant et après relâchement. Dans un second temps, la simulation numérique du procédé sera exposée, en s'appuyant sur le logiciel **ABAQUS** pour l'analyse par éléments finis.

Cette approche a permis de reproduire virtuellement les conditions réelles du pliage et d'analyser, avec une grande précision, l'évolution des déformations et le comportement mécanique du matériau. Les données recueillies à l'issue de cette double approche (réelle et numérique) constituent un socle fondamental pour les étapes d'analyse, de validation et d'optimisation présentées dans le chapitre suivant.

## II.2 Présentation des géométries

Dans le cadre de cette étude, des essais de pliage en V ont été réalisés sur des éprouvettes planes en acier TRIP 304L, les éprouvettes ont été découpées selon des dimensions normalisées de 200 mm de longueur, 20 mm de largeur et 1,5 mm d'épaisseur, garantissant une reproductibilité adéquate des essais et une comparabilité avec les modèles numériques.

Le dispositif de pliage est constitué d'un poinçon, conçu en acier X210Cr12 (Z200), assurant une sollicitation uniforme sur la ligne de pliage. Le poinçon est monté sur une presse mécanique à déplacement vertical contrôlé, permettant une vitesse de descente constante de 5 mm/min. Ce choix de vitesse vise à maintenir des conditions de test fixes, minimisant ainsi les effets inertiels et thermiques pendant la déformation.

Quatre matrices de pliage en V ont été spécialement conçues pour l'étude, chacune présentant un angle de chanfrein différent pour chaque angle de pliage : 30°, 45°, 60° et 90°. Ces matrices ont été modélisées sous FreeCAD[17]. Hormis l'angle de chanfrein, les autres paramètres géométriques (largeur d'ouverture, profondeur de la matrice), n'ont pas été influant lors des essais le principal objectif étant d'isoler l'influence géométrique du chanfrein sur le retour élastique. Chaque matrice a été fixée de manière rigide à la base de la presse afin de garantir l'alignement et la répétabilité des opérations de pliage.

Ce système d'essai, combinant des éprouvettes représentatives et des outils précisément définis, constitue une base expérimentale fiable pour l'analyse fine du comportement mécanique en cours de pliage et la validation des modèles numériques et prédictifs, sachant que les essais ont été réalisés à température ambiante au sein du Labo RDM de la faculté du génie de la construction de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

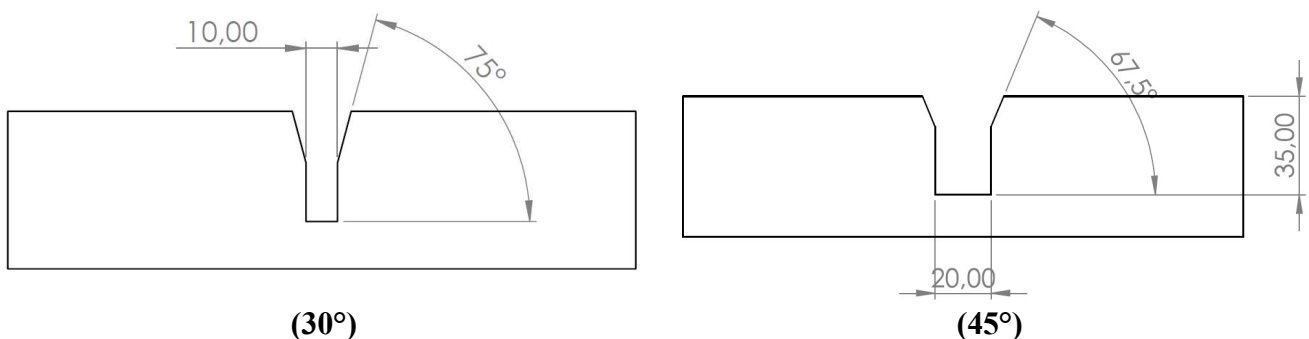
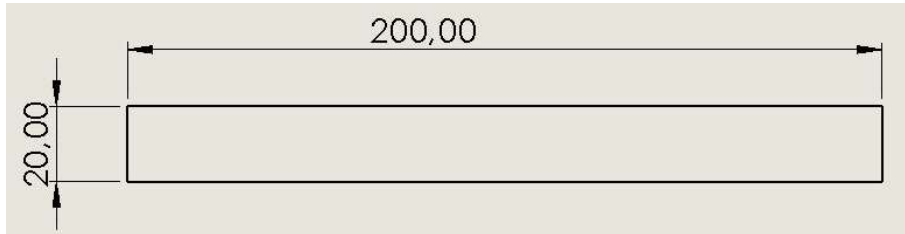


Figure II-1 : Exemples de géométries de matrices en 2D pour les angles de pliage de 30° et 45°

### II.2.1 Présentation de l'éprouvette :

La figure ci-dessous montre les dimensions de l'éprouvette de pliage en V faite à partir d'une tôle en acier 304L, découpé par guillotine. Elle est de forme rectangulaire d'une longueur de 200mm, largeur 20mm et d'épaisseur 1.5mm (200x20x1.5)



*Figure II-2 Dimensions géométrique de l'éprouvette de pliage en V (304L AISI)*

### II.2.2 Machine utilisée :

Afin de réaliser les opérations de pliage la machine universelle d'essais IBERTEST ELIB-200E/W a été utilisée vu qu'elle permet l'exécution de plusieurs types de test Traction, compression, flexion et notamment pliage



*Figure II-3 Machine de traction IBERTEST mod. ELIB-200E/W*

Tableau II-1 Fiche technique de la machine de traction

<b>Modèle</b>	<b>ELIB-200E/W</b>
<b>Force maximum</b>	200 KN
<b>Mesure de la force</b>	Cellule de charge universelle (traction-compression) à jauges De contraintes
<b>Nb de canaux de mesure</b>	5 canaux de mesure répartis de la façon suivante : 1 canal Pour la cellule de charge, 3 canaux libre pour le montage des Transducteurs, 1 canal numérique pour encodage
<b>Nb d'échelles</b>	2 pour les cellules de 200 KN et 10 KN :1/1 et 1/10 de la force Maximum. 2 cellules de charge : 1 de 200 KN ; 1 de 10 KN
<b>Etendue de mesure</b>	De 2% à 100% de la capacité nominale de la cellule de charge De 200kN ; De 10% à 100% de la capacité nominale des cellules de Charge de capacité inférieur
<b>Distance libre entre Colonnes</b>	520mm
<b>Hauteur de la machine</b>	2550mm
<b>Dimensions au sol de la Machine</b>	1050*610 mm
<b>N° de colonnes guide</b>	2 à 60 mm de diamètre chromées et rectifiées
<b>Actionnement</b>	Moteur en courant continue et basse inertie de puissance =2200W
<b>Vitesse de déplacement</b>	Programmable par le clavier entre 0.1 et 500 mm/min
<b>Vitesse de charge</b>	Programmable par le clavier entre 0.05 et 10 kN/s
<b>Contrôle de vitesse</b>	Par dynamo tacométrique
<b>Mesure du déplacement</b>	Par encodeur (Capteur d'impulsions numériques) de 2500 impulsions/tour, avec résolution en mesure de mouvement Linéaire de la traverse de 0.004mm
<b>Transmission</b>	Par pignon-chaine dentée
<b>Dimensions de la table de Travail</b>	1400*800*740 mm
<b>Ancrage du bâti d'essais</b>	Par ancrage incrustés dans le béton

### II.3 Caractérisation du matériau :

Afin de caractériser les propriétés mécaniques (Elasto-Plastiques) du matériau, des essais de traction ont été réalisés afin d'obtenir la courbe force-allongement suivante, qui définit le comportement du matériau qui est l'acier inoxydable austénitique 304L

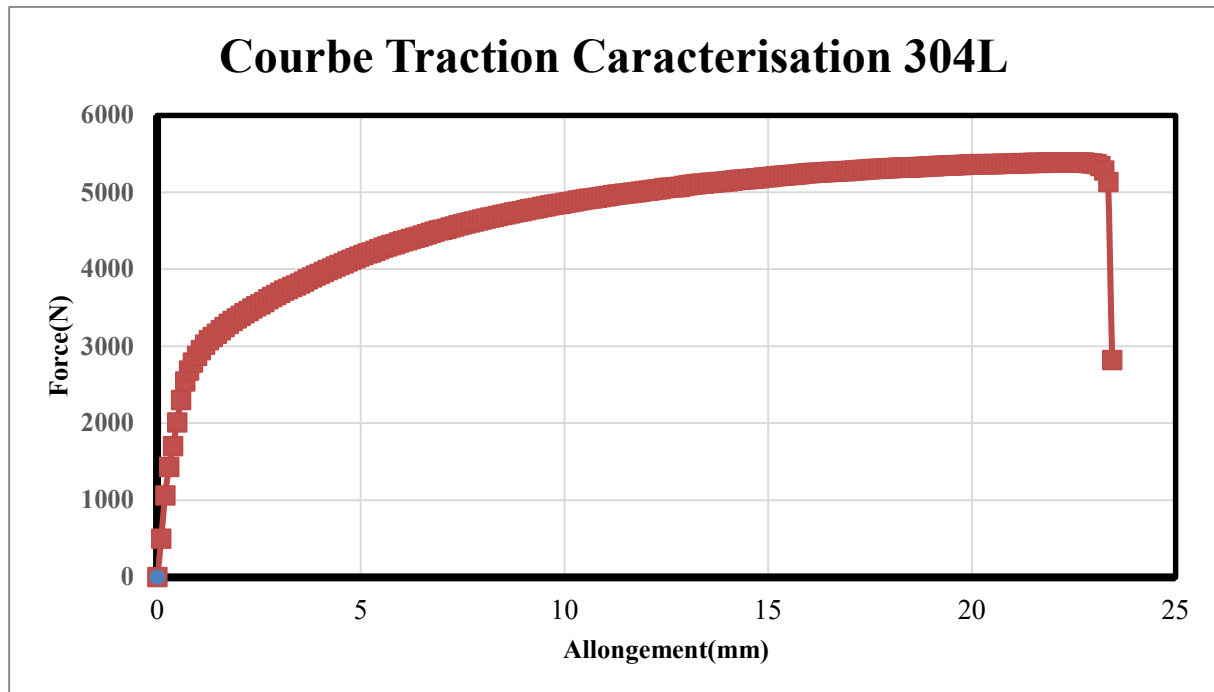


Figure 4 Courbe Expérimentale (Force-Allongement) de l'acier inoxydable 304L

### II.4 Processus de pliage en V :

Le processus de pliage en V se réalise en respectant des étapes précises :

- D'abord à fixer la matrice de pliage sur le bâti ensuite
- Fixer le poinçon sur le vérin de presse
- Positionner l'éprouvette sur la matrice prévue,
- Amener le poinçon au point de contact avec l'éprouvette
- S'en suit l'application de l'effort de pliage

Lors du déplacement du poinçon sur l'axe verticale avec des paramètres prédéfinis (Vitesse, Course), enfin le retrait du poinçon après pliage et l'obtention de l'éprouvette pliée.

## II.5 Simulation numérique :

Après finalisation de l'étape expérimentale, la prochaine étape est la simulation numérique via logiciel ABAQUS en suivant le processus défini dans l'organigramme suivant :



### II.5.1 Simulation sur ABAQUS

Pour permettre la simulation il a été convenu au préalable de déterminer le matériau des éprouvettes et ses propriétés mécaniques, les éprouvettes. L'acier TRIP 304L a été enregistré dans la bibliothèque des matériaux ainsi un essai de traction déterminant les domaines élasto-plastiques ainsi que la limite d'élasticité a été réalisé il en résulte la courbe de traction suivante

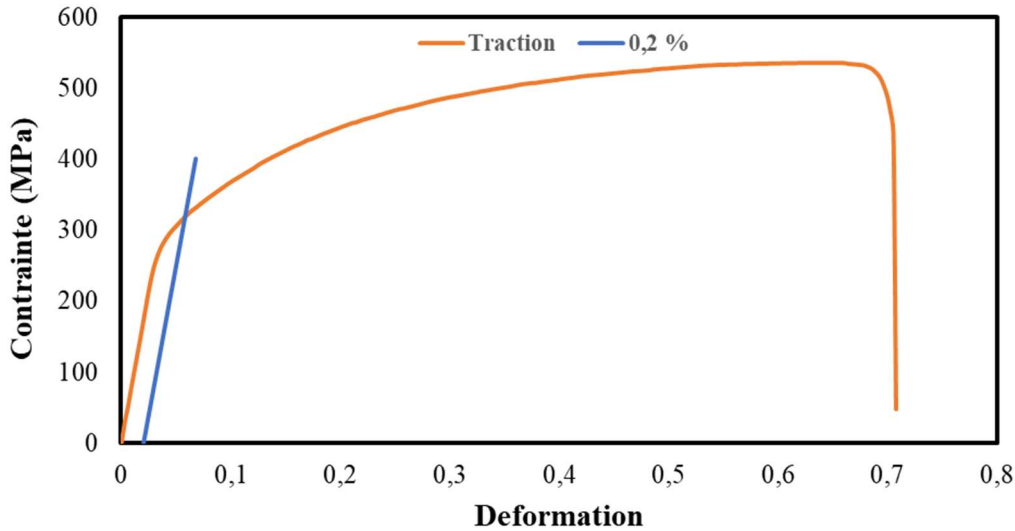


Figure II-6 : Courbe traction de l'acier inoxydable 304L

La Figure II-6 montre la courbe de traction pour l'acier inoxydable austénitique 304L AISI obtenue lors d'une étude antérieure [18]. A première vue, nous remarquons que cet acier possède des caractéristiques mécaniques idéales pour le domaine de la mise en forme des tôles, notamment un allongement (A%) allant à 70% à la rupture permettant des applications comme le pliage, l'emboutissage et l'emboutissage profond. Le Tableau II-2 résume les principales caractéristiques mécaniques du matériau d'étude, ces dernières serviront de base pour définir les propriétés du matériau dans Abaqus lors de la phase simulation de notre travail.

Tableau II-2 : Caractéristique mécanique de l'acier 304L

Propriétés	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Limite Elastique (MPa)	Allongement A%
Valeur	210	0.3	≈ 320	70%

### II.5.2 Simulation du pliage

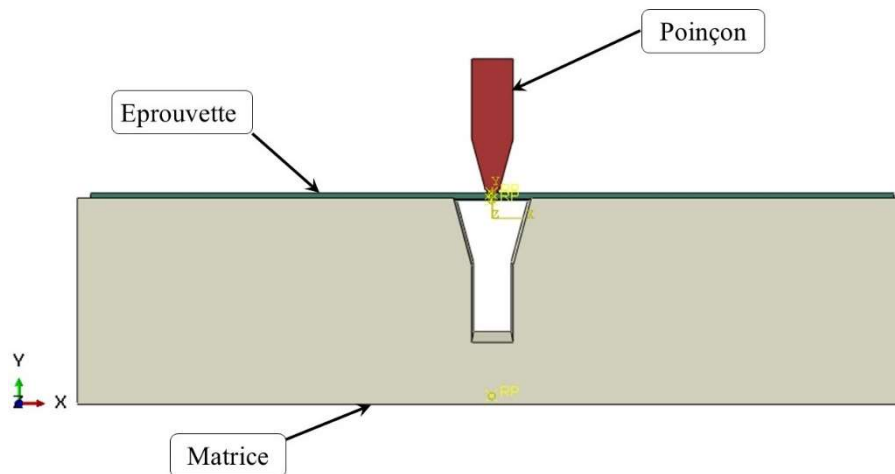
La simulation numérique par la méthode des éléments finis (MEF) constitue aujourd'hui un outil indispensable dans l'analyse et l'optimisation des procédés de mise en forme des matériaux, en particulier dans le domaine de la tôlerie industrielle. Cette approche permet de prédire avec précision le comportement mécanique des matériaux soumis à des sollicitations complexes, tout en réduisant considérablement le recours à des essais expérimentaux coûteux

et chronophages. Dans ce contexte, le logiciel **Abaqus**, largement reconnu pour sa robustesse et sa capacité à modéliser des phénomènes non linéaires (matériaux, géométrie, contact), a été utilisé pour simuler le procédé de pliage en V appliqué à une tôle en acier inoxydable **304L**. Cette étude numérique vise à analyser l'influence de différents angles de pliage ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , et  $90^\circ$ ) sur le comportement de la tôle, en mettant en évidence les distributions de contraintes, de déformations et les éventuels phénomènes de retour élastique. La simulation offre ainsi une compréhension approfondie du procédé et constitue un support essentiel à la prise de décision en phase de conception et d'industrialisation.

### II.5.3 Préparation de la simulation

Pour la simulation, nous avons opté pour l'utilisation d'assemblage similaires suivants le même modèle à savoir l'utilisation d'une matrice, d'une éprouvette  $200 \times 20 \times 15$  et d'un poinçon, ce qui diffère se sont les matrices ayant des dimensions différentes adéquates aux angles de pliage

### II.5.4 Présentation des pièces



*Figure II-7 Assemblage du Pliage sur ABAQUS*

La Figure 5 représente l'assemblage utilisée sur le logiciel Abaqus, il se compose principalement de l'éprouvette, le poinçon et la matrice de pliage.

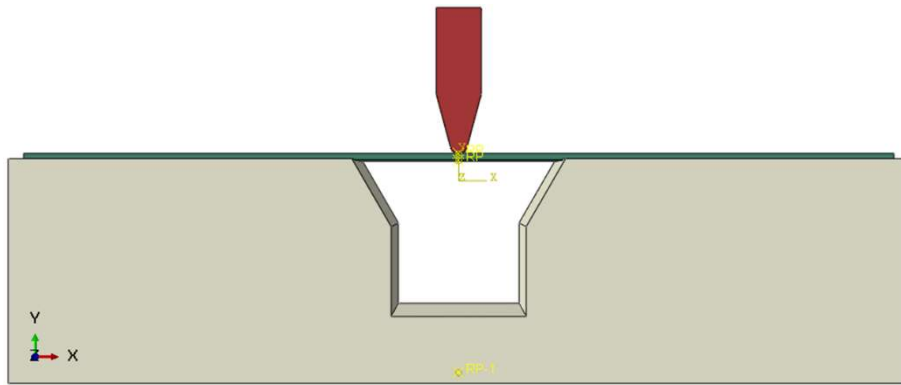


Figure II-8 Assemblage pour le Pliage à 60°

La figure ci-dessus représente l'assemblage pour le pliage à 60° on remarque le changement de la matrice de pliage.

### II.5.5 Présentation des conditions au limites

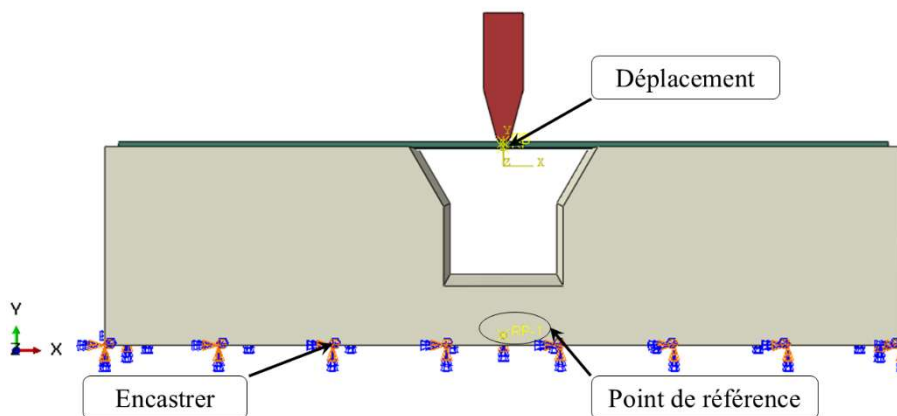


Figure II-9 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont représentées dans la figure la matrice a un encastrement qui élimine tout degré de liberté, le poinçon a un déplacement de 25.2177 mm le long de l'axe Y dans le cas du pliage à 60° représenté par la Figure II-9

## II.5.6 Présentation des interactions

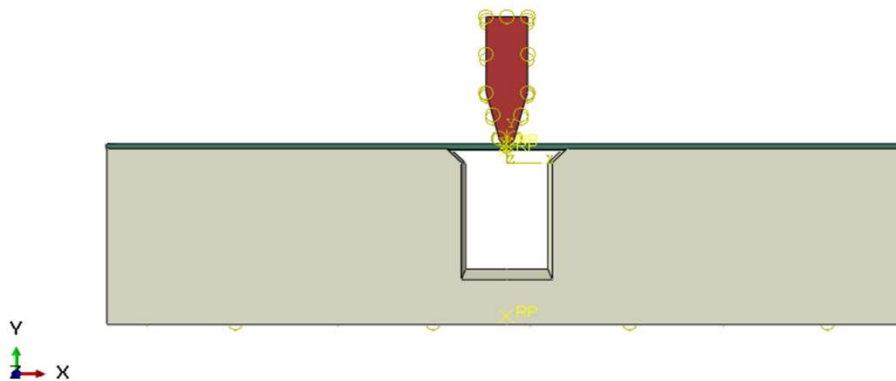


Figure II-10 Interactions (Contacts) appliqués

Les contacts appliqués entre les pièces sont les suivants :

- A l'état initial : (Surface-To-Surface) entre l'éprouvette et la matrice, et entre le poinçon et l'éprouvette
- Etape suivante : Une interaction de type Dynamic, Explicit (Surface-To-Surface) entre le poinçon et l'éprouvette et entre l'éprouvette et la matrice

## II.6 Présentation du model d'optimisation

L'optimisation consiste à déterminer les valeurs d'un ensemble de variables décisionnelles permettant de maximiser ou de minimiser une fonction objective, tout en respectant des contraintes données. Dans le contexte du génie mécanique, cela peut s'appliquer à la minimisation du poids d'un arbre de transmission, à la réduction du coût de production ou à l'optimisation de la résistance structurelle.

### II.6.1 Optimisation avec solveur EXCEL

Le Solveur Excel est un **complément d'analyse d'optimisation intégré à Microsoft Excel**. Il permet de résoudre des problèmes linéaires, non linéaires, à variables entières ou binaires de manière intuitive, ce qui le rend particulièrement utile dans des environnements éducatifs et industriels à ressources limitées [19]

### II.6.2 Étapes Méthodologiques de l'Optimisation avec Excel Solver

La résolution d'un problème d'optimisation via le Solveur Excel suit typiquement **six étapes systématiques** :

1. **Définir le modèle mathématique** : Identifier la fonction objective et les contraintes sous forme algébrique suivante :

$$Angle_{SPB} = ax + b \quad (III.1)$$

2. **Modélisation dans Excel** : Traduire les équations en cellules Excel avec références dynamiques.
3. **Lancer le Solveur** : Accéder au complément via l'onglet « Données » > « Solveur ».
4. **Spécification du problème** :
  - Cellule objectif (à maximiser ou minimiser)
  - Cellules variables (plage de décisions)
  - Contraintes (ex. :  $x \geq 0x$  ,  $Ax \leq b$ )
5. **Choix de la méthode de résolution** :
  - **Simplex LP** : Pour problèmes linéaires
  - **GRG Nonlinear** : Pour fonctions continues (linéaire, non linéaires)
  - **Evolutionary** : Pour problèmes discrets ou non dérivables
6. **Exécution et interprétation** : Résultat obtenu, analyse de sensibilité possible via rapports automatiques[20]

*Tableau II-3 Avantages et détails du solveur EXCEL*

<i>Avantage</i>	<b>Détails</b>
<i>Accessibilité</i>	Disponible dans Excel, pas besoin de logiciel spécialisé
<i>Facilité de prise en main</i>	Interface graphique conviviale, adaptée aux étudiants et ingénieurs
<i>Polyvalence</i>	Résout des problèmes LP, NLP, entiers, binaires
<i>Rapports automatiques</i>	Génère des rapports de sensibilité utiles pour l'analyse d'ingénierie

De plus, des applications concrètes dans la mécanique des matériaux, comme la **minimisation du poids d'un arbre soumis à des contraintes de résistance**, ont été réalisées avec succès en utilisant Excel Solver dans des contextes pédagogiques [20].

*Tableau II-4 Limites du solveur EXCEL*

<i>Limite</i>	<b>Explication</b>
<i>Capacité computationnelle</i>	Inefficace pour très grands problèmes ou modèles fortement non linéaires
<i>Stabilité des solutions</i>	Solutions parfois sensibles aux conditions initiales, en particulier avec l'algorithme évolutionnaire
<i>Manque d'automatisation</i>	Moins adapté aux tâches massivement paramétriques sans VBA
<i>Fonctionnalités limitées</i>	Pas de prise en charge native des incertitudes, simulations stochastiques, ou multi-objectifs

Dans des problèmes complexes typiques en génie mécanique (comme l'optimisation multi-objectif de structures truss ou d'assemblages mécaniques), ces limites deviennent notables [20]

## II.7 Cas d'application : prédiction du retour élastique

Un cas d'usage particulièrement pertinent mentionné dans la revue est la **prédiction du retour élastique** dans des tôles d'acier laminées à froid, présentant une anisotropie. Ce phénomène, difficile à modéliser par des méthodes conventionnelles, est efficacement anticipé par les réseaux neuronaux, ce qui permet d'améliorer la précision des opérations de pliage et d'emboutissage [21]

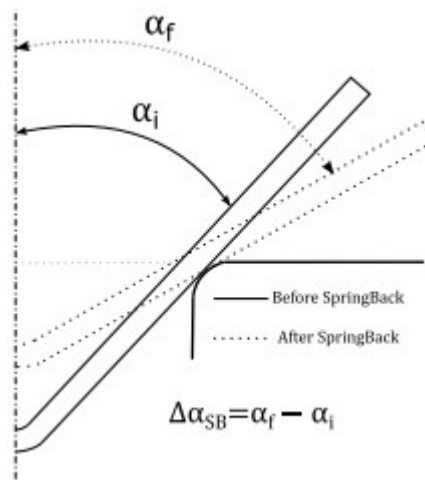


Figure II-11 : Représentation du retour élastique [21]

### II.7.1 Utilisation de jeux de données variés

Les algorithmes sont entraînés à partir de **données issues de divers procédés de formage**, ce qui renforce leur capacité de généralisation. Cette diversité permet aux modèles d'être réutilisables dans différents contextes industriels, tout en maintenant de bonnes performances prédictives [21]

## II.8 Analyse statistique et validation du modèle :

Pour effectuer une analyse statistique des résultats obtenus il est convenable de présenter et de définir les paramètres et concepts utilisés pour à savoir les métriques  $R^2$ , MAE, ceux-ci ont été appliqués directement aux courbes obtenus par les valeurs expérimentales ensuite un algorithme python pour avoir une analyse optimale et globale des résultats et valider le modèle

### II.8.1 Coefficient de Détermination ( $R^2$ )

Le coefficient de détermination  $R^2$  est une mesure de la qualité d'ajustement d'un modèle de régression, exprimant la proportion de la variance des données observées expliquée par le modèle. Formellement, il est défini comme la part de la variance totale des valeurs de la variable dépendante qui est prédite par les variables explicatives du modèle [22]. Cette mesure est largement utilisée en régression linéaire classique, mais elle a également été adaptée à des modèles plus complexes, notamment les modèles linéaires généralisés [23] et les modèles mixtes [24].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{III.2})$$

Où :

- $y_i$  : valeur observée,
- $\hat{y}_i$  : valeur prédite,
- $\bar{y}$  : moyenne des observations.

Dans une étude appliquée à l'analyse de symétrie oculaire, cette métrique s'est révélée la plus fortement corrélée aux évaluations humaines subjectives, confirmant sa pertinence pour quantifier la précision globale d'un modèle de correspondance géométrique [25]

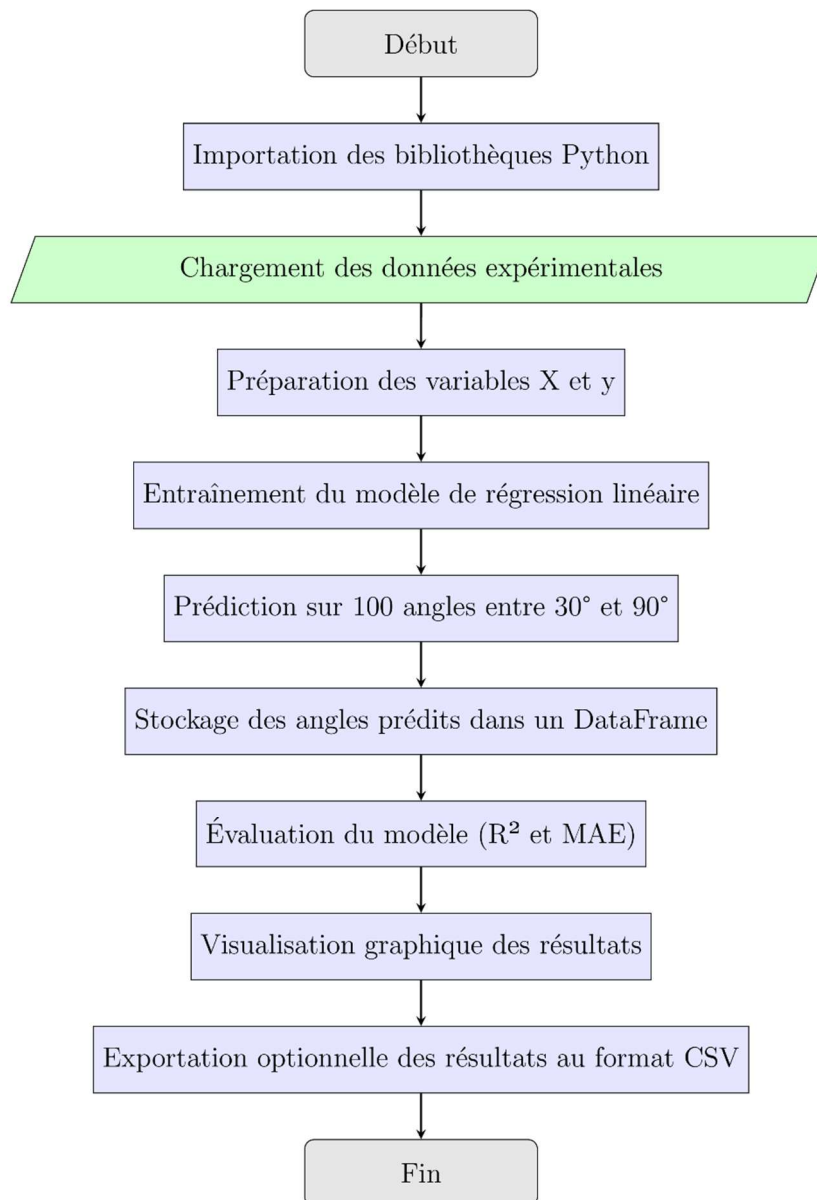
### II.8.2 Mean Absolute Error (MAE)

Le MAE (erreur absolue moyenne) calcule la moyenne des écarts absolus entre les valeurs prédites et les valeurs observées, et constitue une mesure robuste de l'exactitude d'un modèle de régression, notamment lorsqu'on souhaite minimiser l'influence des erreurs extrêmes.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i - \hat{y}_i| \quad (\text{III.3})$$

Contrairement au RMSE, le MAE est **moins sensible aux valeurs aberrantes** et représente une estimation plus robuste de l'erreur typique. Hodson (2022) [26] précise que le MAE est **optimal sous des distributions de type Laplacien** et convient bien aux environnements où les erreurs extrêmes doivent être minimisées sans être exagérément pénalisées [27].

### II.8.3 Organigramme de résolution



*Figure II-12 Organigramme d'élaboration du programme d'optimisation avec Python*

L'organigramme de la Figure II-12 représente la démarche à suivre afin d'élaborer le programme Python dans le but d'optimiser le modèle expérimental à partir des données recueillies par les tests antérieurs.

## II.9 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter de manière détaillée la démarche expérimentale et numérique adoptée pour étudier le phénomène de retour élastique lors du pliage en V de tôles en acier TRIP 304L. L'analyse des résultats expérimentaux a mis en évidence une variation significative entre les angles théoriques et les angles obtenus, confirmant l'importance de ce phénomène dans le processus de pliage. Les simulations réalisées sur le logiciel ABAQUS ont permis de reproduire avec précision le comportement du matériau et de valider les observations issues des essais physiques. La comparaison entre les résultats simulés et expérimentaux montre une bonne concordance, ce qui confirme la pertinence du modèle numérique utilisé.

Enfin, l'étude du retour élastique à différentes étapes du processus a mis en lumière des écarts spécifiques selon l'angle de pliage, soulignant la nécessité d'une optimisation fine des paramètres du procédé. Ces résultats constituent une base solide pour les travaux d'optimisation et de correction proposés dans le chapitre suivant, en vue de limiter efficacement le retour élastique et d'améliorer la précision géométrique des pièces pliées.

# **Chapitre III : Etude expérimentale et numérique du pliage et optimisation du retour élastique**

### III.1 Introduction

Malgré l'apparente simplicité du pliage en V, ce procédé reste un processus complexe à maîtriser. De nombreux paramètres influencent la qualité du pli final, notamment l'épaisseur de la tôle, la nature du matériau, le rayon de pliage, la longueur du flanc plié, la vitesse de pliage, ainsi que les caractéristiques géométriques de l'outil. Ces variables interagissent de manière non linéaire, rendant difficile la prédiction précise des résultats et l'optimisation du procédé. Parmi les défis majeurs du pliage en V, on peut citer le phénomène de retour élastique (springback), les risques de fissuration ou de déformation excessive et l'usure prématurée des outils. Traditionnellement, ces problèmes sont traités par essais physiques ou à l'aide de simulations numériques, techniques souvent coûteuses en temps et en ressources.

Ceci nous a poussé à proposer une alternative plus pratique pour pallier les difficultés citées précédemment en mettant en œuvre un modèle d'optimisation afin de prédire les angles de pliages après retour élastique lors du pliage en V. notre méthodologie comporte une partie traitement de données expérimentales, nous permettant de mieux visualiser la relation entre angle de pliage et angles après pliage (SPB), puis traduire cette dernière mathématiquement avec une fonction. La prochaine étape sera l'optimisation des paramètres du modèle, dans un premier temps avec Solver dans Excel, puis sous Python sur Google Colab. Cette variété nous permet de confirmer la validité de notre modèle de prédiction. Nous présenterons par la suite l'ensemble des résultats de la partie essais expérimentaux, simulation numérique sur Abaqus à l'optimisation des paramètres du modèle de prédiction proposé.

## III.2 Traitement des données expérimentales (Retour Elastique)

Dans cette première partie nous entamons l'analyse des échantillons pliés obtenus précédemment, en les scannant pour obtenir des images en haute définition (600 DPI) afin de les analyser grâce au logiciel de traitement d'image Open Source ImageJ [28]. La procédure consista à mesurer l'angle de pliage de chaque éprouvette pliée en prenant 3 points partant des deux extrémités de la pièce vers le rayon de pliage.

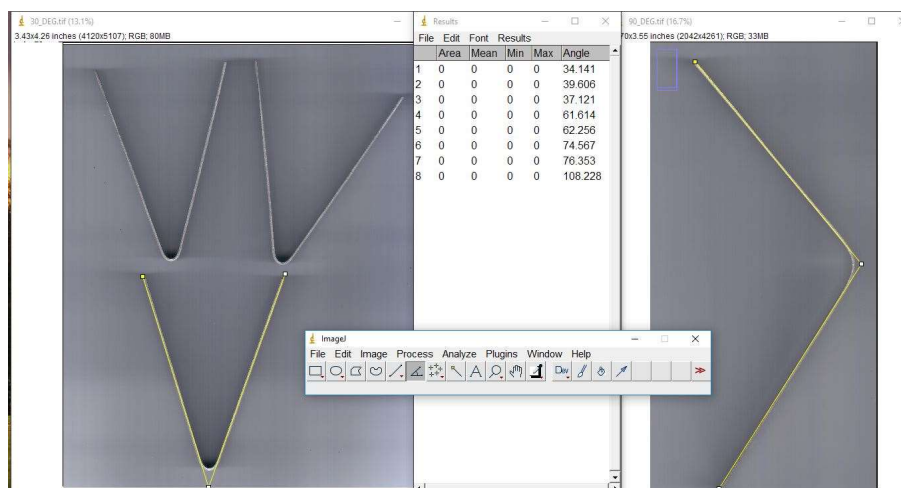


Figure III-1 Exemple de mesure d'angle après retour élastique des éprouvettes 45° et 60°

Les données récoltées (Tableau III-1) montrent bien l'écart entre l'angle souhaité et l'angle obtenu sachants que les tests ont été réalisés dans les mêmes conditions avec une vitesse d'avance du poinçon fixée à 5 mm/min à température ambiante.

Tableau III-1 Proportion de retour élastique

Angle Théorique (°)	Angle obtenu (°)	Retour Elastique (%)
30	34.141	13.80%
30	39.606	32.02%
30	37.121	23.74%
45	61.614	36.92%
45	62.256	38.35%
45	61.520	36.71%
60	74.567	24.28%
60	76.353	27.26%
60	74.980	24.97%
90	108.228	20.25%
90	107.420	19.36%
90	109.170	21.30%

Une étude statistique calculant l'erreur entre chaque essai par rapport à la moyenne nous a permis de déduire quelle serait les éprouvettes adéquates à prendre pour le reste de l'étude. Nous remarquons que le pourcentage de retour élastique augmente proportionnellement avec la

valeur de l'angle recherché la figure ci-dessous représente le pourcentage de retour élastique par angle de pliage

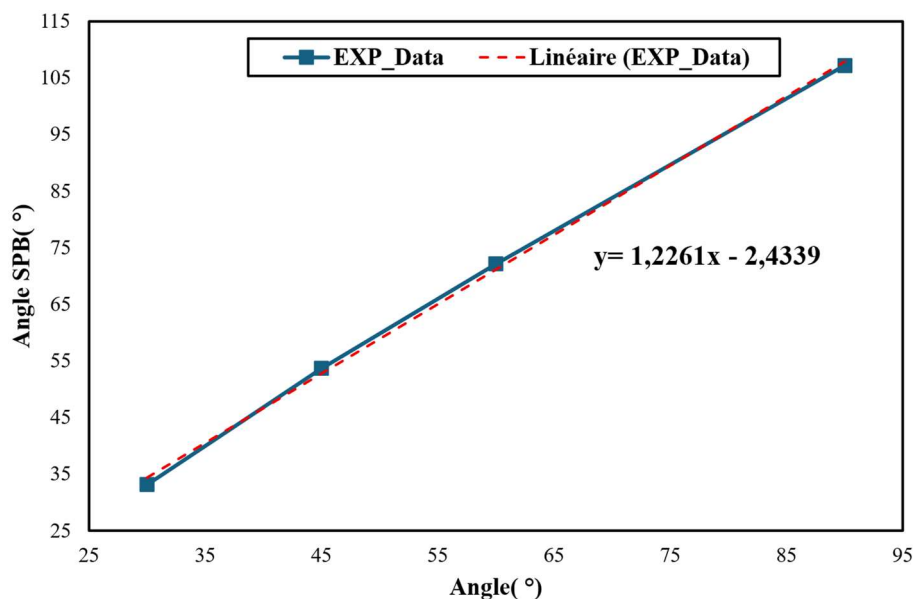


Figure III-2 : Courbe Angles voulu VS angles après retour élastique et courbe tendance.

La Figure III-2 montre la courbe angle voulu vs angle obtenu après retour élastique pour les éprouvettes retenues après étude statistique. On peut clairement voir que la relation entre les deux grandeurs est linéaire comme le montre l'équation de la courbe tendance.

### III.3 Résultats de la simulation numérique de pliage :

Dans un premier temps, nous avons calibrer les paramètres de notre matériau dans Abaqus grâce à un essai de traction sur éprouvette normalisée,

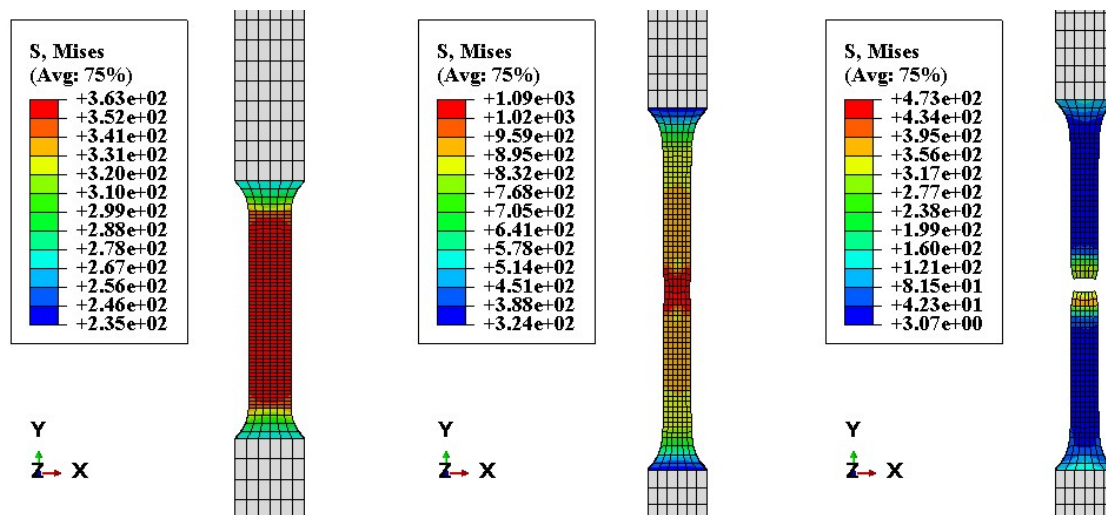


Figure III-3 Répartition de la contrainte de Von Mises sur l'éprouvette de traction à différents instant (Début de plasticité, Striction et à la rupture)

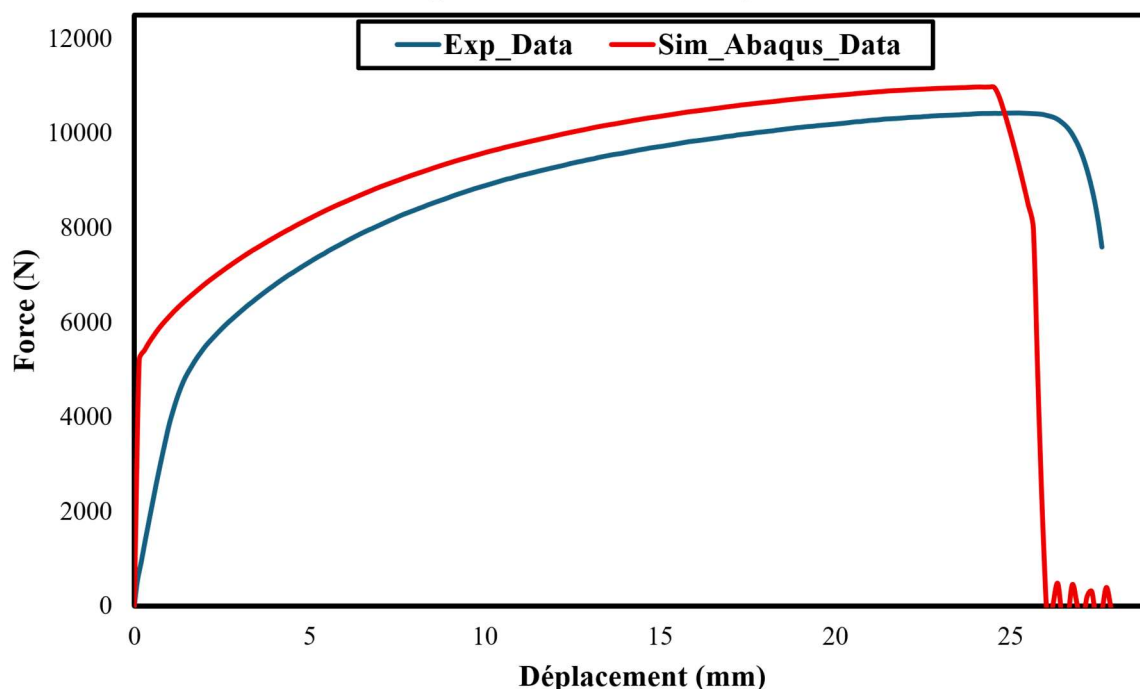


Figure III-4 Courbe de traction numérique vs expérimentale

La Figure III-4 montre la confrontation entre les courbes force déplacement numérique et expérimentale dans le cas de la traction uni axiale réalisé sur le 304L. nous pouvons clairement voir une bonne concordance des résultats sur les trois domaines en élasticité, plasticité et rupture, montrant que le modèle utilisé (Elasto-plastique couplé à Ductile Damage) est apte à reproduire la réponse mécanique du matériau

### III.3.1 Résultats simulation de pliage

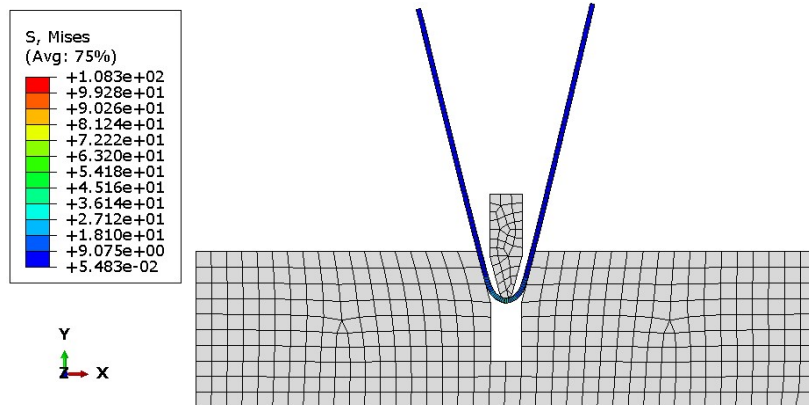


Figure III-5 Résultat du pliage à 30°

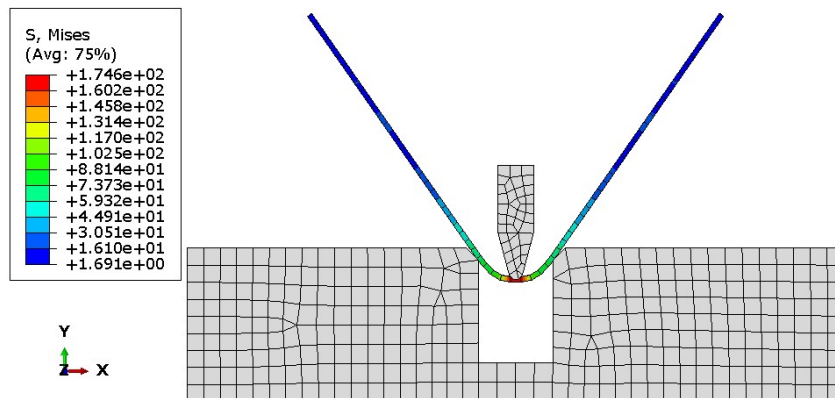


Figure III-6 Résultat de pliage à 45°

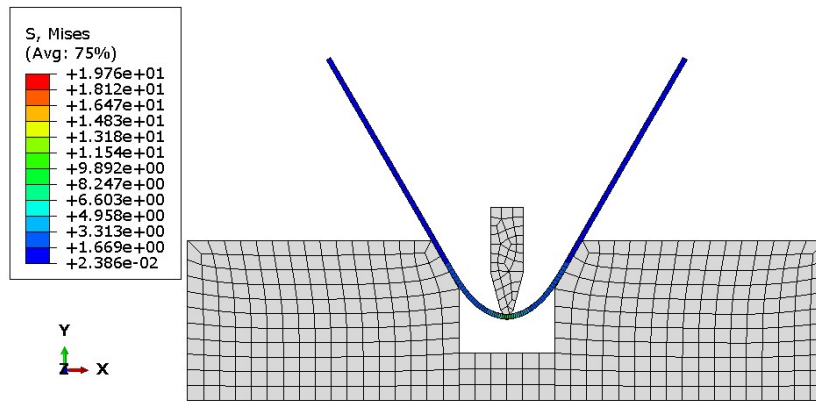


Fig 2.10 : Résultat du pliage à 60°

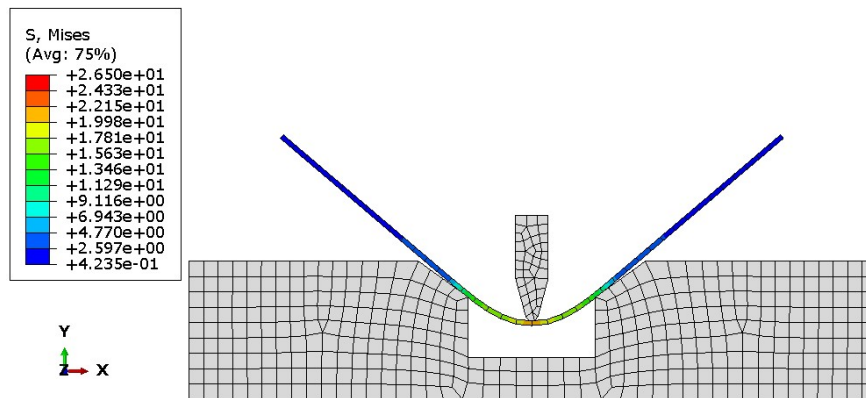


Figure III-7 Résultat du pliage à 90°

La simulation réalisée avec les précédents assemblages a donné des résultats précis sachants que les paramètres de pliage ont été les mêmes pour toutes les opérations.

### III.4 Comparaison des résultats :

La procédure que nous avons suivi pour mesurer les angles des pièces après retour élastique consista à utiliser l'outil de mesure *Query* présent dans Abaqus

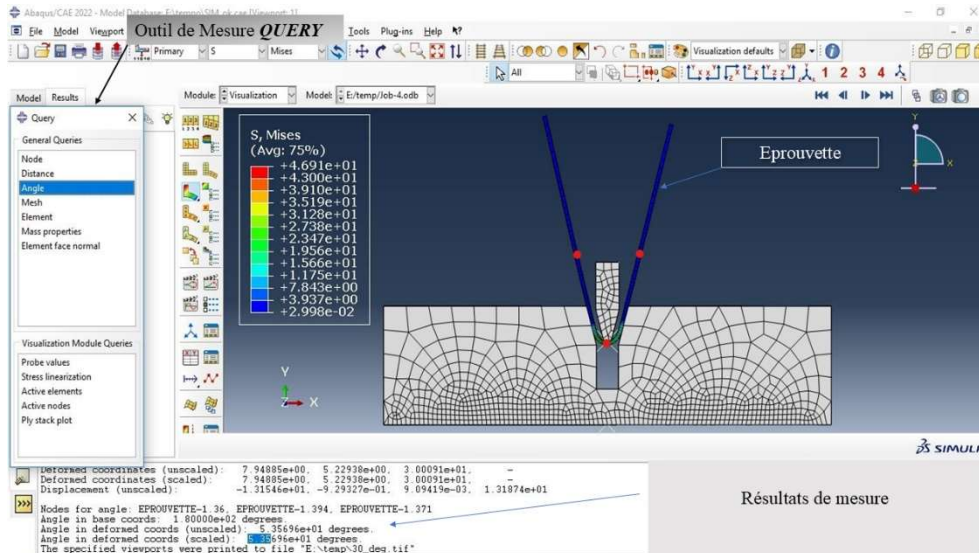
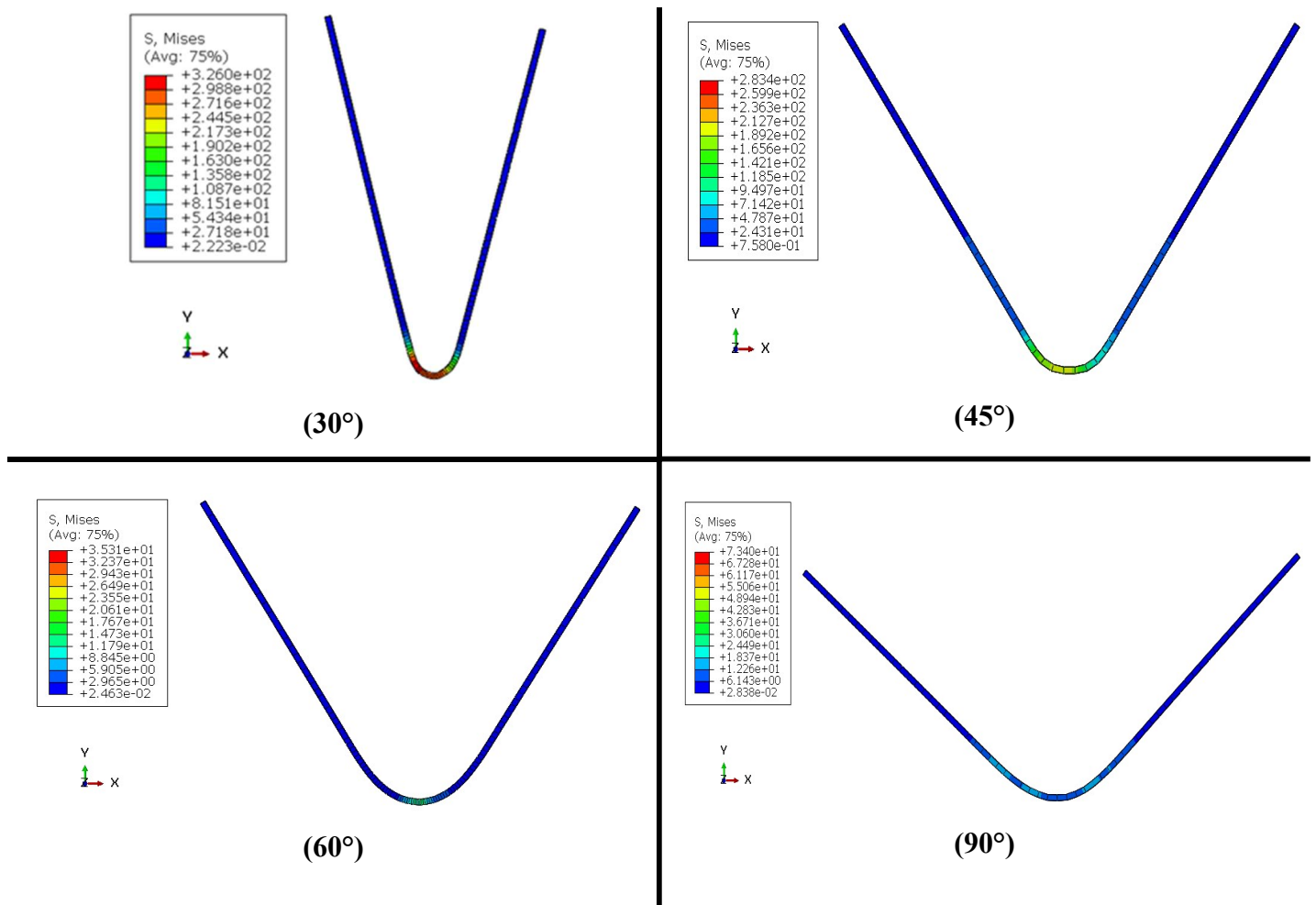


Figure III-8 : Outil de mesure *QUERY* intégré à *ABAQUS*

Les résultats obtenus par la simulation sont en grande majorité conformes aux résultats de l'expérimental ce qui reflète le respect scrupuleux du procédé conformant ainsi la validité du protocole suivi.

### III.5 Le retour élastique

Le retour élastique est un phénomène qui se produit lors du retrait du poinçon indiquant la tendance de l'éprouvette à retrouver son état initial ce étant le problème principal rencontré lors de ce procédé et le cas principal de cette étude visant à remédier ce problème en optimisant les pliages afin d'obtenir l'angle de consigne tout en prenant compte de cette étape. Des mesures ont été prises après relâchement représentant le résultat final après l'opération



**Figure III-9 : Distribution de la contrainte de Von Mises sur les éprouvettes en fin de simulation**

Nous observons que la distribution des contraintes de Von Mises révèle une concentration marquée des contraintes dans la région du rayon de pliage, ce qui indique une localisation de la déformation plastique significative dans cette zone. Ce phénomène est particulièrement attendu dans les procédés de mise en forme où les gradients de déformation sont élevés, notamment au niveau des zones courbes. Il est à noter que cette concentration s'accroît avec la réduction de l'angle de pliage : les éprouvettes soumises à des angles plus aigus présentent des pics de contraintes nettement plus élevés. Cela s'explique par l'augmentation du rayon de courbure relatif et la diminution de la zone neutre, ce qui intensifie la contrainte effective et accélère le passage à la plasticité. Ces observations sont cohérentes avec la théorie de la mécanique des milieux continus appliquée au formage à froid, et confirment le rôle critique de la géométrie dans l'initiation et la propagation des zones plastiques. La Figure III-9 illustre clairement cette tendance, mettant en évidence l'amplification des contraintes dans les zones angulaires à mesure que l'angle de pliage diminue.

### III.6 Résultats après retour élastique :

Les résultats obtenus après retour élastique montrent une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux tout en se rapprochant des angles théoriques visés.

Tableau III-2 : Angle de pliage et % de retour élastique

Angle Initial (°)	30	45	60	90
Angle après SPB (°)	33,1395	53,6862	72,1262	107,177
Ecart (%)	10%	19%	20%	19%

Les résultats du Tableau III-2 montrent une augmentation systématique de l'angle mesuré après relâchement par rapport à l'angle de pliage initial, illustrant ainsi le phénomène de **retour élastique** caractéristique du pliage en V. Le retour élastique, défini comme la différence entre l'angle final et l'angle initial, atteint un maximum d'environ 20 % pour les angles de pliage initiaux de 60° et 90°, et un minimum de 10 % pour un angle initial de 30°. Cette tendance suggère que plus l'angle de pliage est grand, plus l'effet de retour élastique est significatif. Cela s'explique par le fait qu'un pliage à grand rayon induit des déformations plus progressives et moins concentrées, ce qui favorise une récupération élastique plus importante après relâchement des contraintes internes. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte le retour élastique lors de la conception des outils de pliage pour garantir la précision dimensionnelle des pièces formées.

### III.7 Discussion des résultats :

L'étude du retour élastique constitue une étape cruciale dans la compréhension du comportement mécanique des matériaux soumis à un pliage. La Figure III-10 Angle de pliage et pourcentage de retour élastique ci-dessous présente l'évolution de l'angle mesuré après déformation (appelé ici *Angle après SPB*), de l'angle de retour élastique, ainsi que du taux de retour en pourcentage, pour différents angles de pliage initiaux (30°, 45°, 60° et 90°).

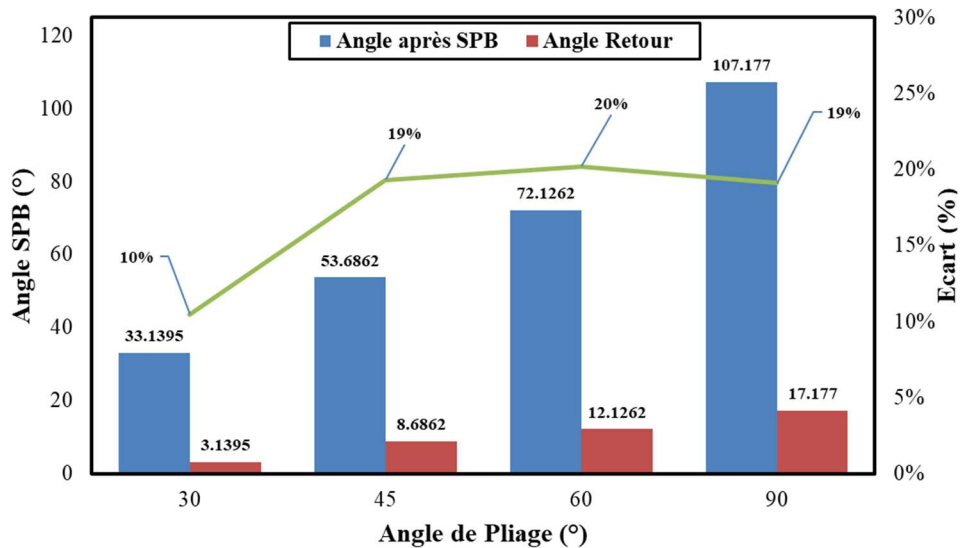


Figure III-10 Angle de pliage et pourcentage de retour élastique

L'analyse met en évidence une progression non linéaire du phénomène de retour élastique selon l'angle initial de pliage. Les données de la Tableau 5 résument les valeurs relevées pour chaque configuration. Ces résultats montrent que le retour élastique augmente en valeur absolue avec l'angle de pliage appliqué : de 3,14° à 17,18° entre 30° et 90°. Toutefois, le taux de retour relatif (%) reste relativement constant au-delà de 45°, oscillant autour de 19–20 %. Cela traduit une stabilisation du comportement élasto-plastique du matériau pour les angles de pliage plus importants.

La variation significative du pourcentage de retour entre 30° (10 %) et 45° (19 %) suggère que les angles faibles sont plus sensibles aux effets de retour, probablement en raison d'une moindre sollicitation plastique, laissant une plus grande part à la déformation élastique. À l'inverse, pour des angles supérieurs à 45°, la part de déformation plastique est plus prononcée, rendant le retour élastique plus prévisible et plus facilement compensable.

Ces données sont essentielles pour orienter le dimensionnement des outils de pliage et définir des modèles de compensation plus précis, notamment dans le cas du pliage en V

#### 4.5.1 Définition du problème d'optimisation

Vu la relation linéaire entre les deux grandeurs Angle Voulu et Angle SPB comme présenté dans Figure III-2, le problème d'optimisation peut être formellement défini comme suit : pour un angle de pliage cible  $\theta^{th}$ , il s'agit de trouver l'angle de chanfrein  $\alpha$  tel que l'angle obtenu après retour élastique  $\theta_{final}$ , soit aussi proche que possible de  $\theta^{th}$ . Mathématiquement, cela revient à résoudre :

$$\text{Min}_\alpha | \theta(\alpha) - \theta^{th} | \quad (\text{III.1})$$

Où  $\theta(\alpha)$  est la sortie du modèle pour une configuration donnée.

Dans un premier temps, notre optimisation s'est faite sur EXCEL par l'application d'un modèle de régression linéaire avec les variables tirée de la courbe tendance décrite par la relation suivante

$$y = ax + b \quad (1.2)$$

Les valeurs initiales indiquées au solveur sont  $a = 1,2$  ;  $b = -2$  . L'objectif fixé pour le solveur est de minimiser l'écart max entre les valeurs prédite et expérimental

### III.8 Résultats et données de bases pour l'optimisation

Tableau III-3 Données expérimentales Angle obtenus

EXP_Data	
Angle( °)	Angle SPB( °)
30	33,1395
45	53,6862
60	72,1262
90	107,177

Les données présentées dans ce tableau sont les données expérimentales recueillies des tests précédemment effectués, a partie de celles-ci une courbe tendances a été tracée pour présenter l'évolution du retour élastique en fonction de l'augmentation de l'angle de pliage et a permis de déterminer les variables de cette courbe sous forme de  $F = ax + b$  et ensuite générer des métadonnées en appliquant cette fonction. Avec l'aide du Solveur GRG d'EXCEL les paramètres ont été optimisé afin de réduire l'écart tout en restant réaliste mais tout en ayant un coefficient de corrélation  $R^2$  très proche de 1 ce qui indique que les valeurs de la régression linéaire appliquée sont cohérentes et respectent la marge d'erreur qui en absolue est de 2.235% mais en moyenne reste sous la barre des 1%

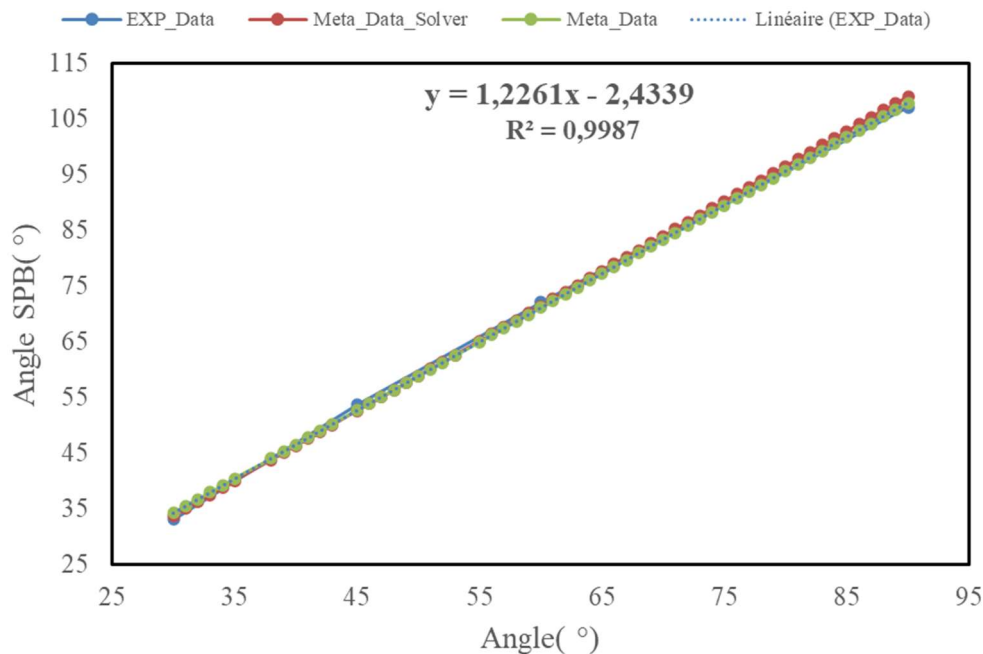


Figure III-11 Angle obtenus après pliage en fonction des angles de consigne

Le modèle de régression linéaire utilisé dans cette étude afin de prédire les angles de sortie Angle SPB utilise l'équation suivante

Les variables de cette courbe sont les suivantes  $a = 1,2261$  et  $b = -2,4339$  on obtiens

$$Angle_{SPB} = 1.2261x - 2.4339 \quad (III.3)$$

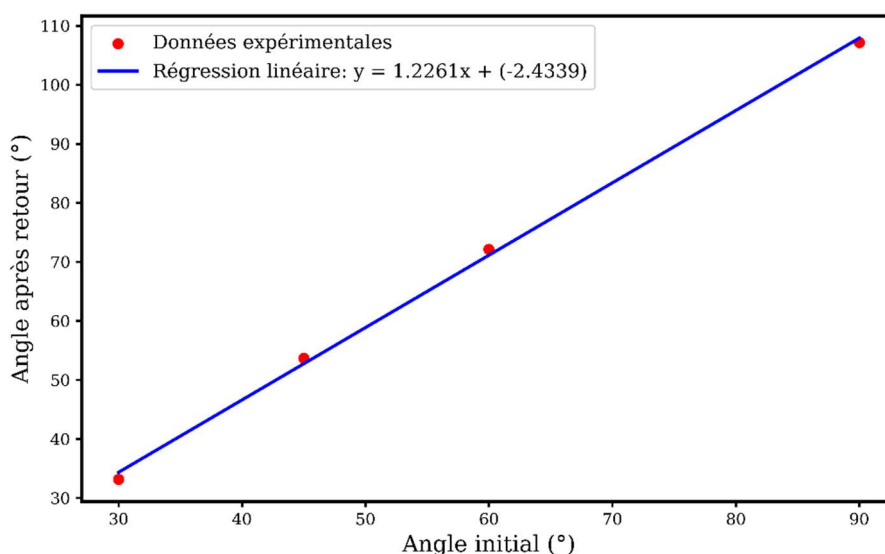
Sachant que ces variables ont ensuite été optimisées avec le Solveur GRG EXCEL et ont permis d'avoir des données optimisées encore plus précise ayant une marge d'erreur très réduite représentée dans le tableau suivant

*Tableau III-4 Erreur pour les angles d'essais*

Erreur EXP Solver	
Angle( °)	Error (%)
30	1,97%
45	1,97%
60	0,91%
90	1,84%

Le pourcentage d'erreur pour les angles de pliage réalisés lors de l'expérimentation et des valeurs générées suivant la fonction initiale montre une erreur max de 1.97% et une erreur moyenne de 1.67% , après optimisation ont été revu à la baisse pour avoir une erreur max de 1.62% et une erreur moyenne de 0.71% sur l'ensemble des angles compris dans l'intervalle  $[30^\circ, 90^\circ]$  ce qui indique une précision remarquable des métadonnées qui seront ensuite utilisées pour concevoir une programme python qui permettra d'ajuster les paramètres de pliage afin d'obtenir des pièces respectant les angles de consigne et élargir la plage d'application aux angles de plus de  $90^\circ$

### III.9 Résultats et discussions de la procédure d'optimisation



*Figure III-12 : Optimisation du modèle linéaire*

Une régression linéaire a été appliquée au modèle expérimental avec un programme python et a ensuite été optimisée afin d'avoir les meilleures variables  $a$  et  $b$  garantissant des résultats avec une erreur minimale tout en restant réalistes.

*Tableau III-5 Résumé des métriques obtenus après optimisation*

R <sup>2</sup>	MAE
0.9987	0.9717

Les métriques du tableau ci-dessus ont été calculées à partir des résultats de l'optimisation et particulièrement de la courbe tracée à partir des résultats, ce faible écart valide la cohérence du modèle. Ces métriques reflètent la qualité, la précision des chiffres et une bonne corrélation entre les variables.

### Conclusion

L'introduction de l'optimisation dans les procédés de pliage des tôles, notamment le pliage en V, constitue une avancée majeure pour l'industrie de la fabrication mécanique. Grâce aux capteurs intelligents, algorithmes de machine learning, les systèmes de production deviennent capables d'ajuster automatiquement les paramètres de pliage pour réduire les défauts comme le **springback**, tout en augmentant la productivité et la qualité, notamment d'intervenir sur l'angle de pliage

Les évolutions actuelles visent à renforcer cette autonomie, notamment via des systèmes capables de **prise de décision en temps réel**, ouvrant la voie à des **lignes de pliage entièrement autonomes**. Bien que cette vision soit en partie réalisable avec les technologies actuelles, plusieurs défis demeurent : robustesse des modèles, cybersécurité, interprétabilité des décisions et acceptabilité industrielle.

Enfin, les recherches futures portent sur l'amélioration des algorithmes, leur adaptation à des conditions variables, et la collaboration homme-machine, avec pour objectif final de créer des **systèmes de pliage intelligents, flexibles et auto-adaptatifs**, intégrés au cœur de l'usine du futur.

## *Conclusion et perspectives*

### *Conclusion et perspectives*

Les travaux présentés dans ce mémoire ont permis de développer une **méthodologie complète et cohérente** pour la compréhension, l'analyse et l'optimisation du **pliage en V** appliqué à des tôles en acier inoxydable 304L. En combinant des essais expérimentaux réalisés en conditions contrôlées avec des simulations numériques précises sous **ABAQUS**, puis en intégrant une **phase d'optimisation analytique**, ce travail a permis de formuler un **modèle prédictif du retour élastique** avec un haut degré de précision.

Les résultats obtenus démontrent clairement que le retour élastique varie de manière non linéaire en fonction de l'angle de pliage initial, et que ce comportement peut être modélisé de façon fiable par une régression linéaire corrigée. L'implémentation du **Solveur Excel** a permis de réduire l'écart entre les valeurs théoriques et réelles à moins de 2 %, confirmant ainsi la **validité du modèle proposé** et son intérêt pour les ingénieurs de production cherchant à compenser automatiquement les écarts de pliage.

Ce mémoire ouvre également la voie à des **perspectives prometteuses**, notamment par l'introduction d'algorithmes d'apprentissage automatique et de **systèmes de pliage intelligents**, capables d'ajuster en temps réel les paramètres opératoires pour garantir une conformité optimale. Des recherches futures pourraient porter sur l'élargissement du modèle à d'autres nuances d'aciers, à des géométries plus complexes, ou encore à l'intégration du modèle dans des chaînes de production numériques.

En somme, ce travail contribue à renforcer la maîtrise du pliage en V, tout en proposant des **solutions innovantes, robustes et adaptables**, inscrites dans la dynamique de l'industrie 4.0

## Références

- [1] B. Abdelhakim, C. Mohamed-Saïd, et M. Djemoui, « Minimisation du retour élastique lors du roulage (cintrage) de tôles pour la fabrication des Bouteilles à gaz ».
- [2] A. R. Singh, T. Bashford-Rogers, S. Hazra, et K. Debattista, « Deep Learning-Based Defect Inspection in Sheet Metal Stamping Parts », in *NUMISHEET 2022*, K. Inal, J. Levesque, M. Worswick, et C. Butcher, Éd., Cham: Springer International Publishing, 2022, p. 411-419. doi: 10.1007/978-3-031-06212-4\_38.
- [3] A. R. Singh, T. Bashford-Rogers, K. Debattista, et S. Hazra, « Deep Learning Approach for automatic detection of split defects on sheet metal stamping parts », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 239, n° 1-2, p. 29-39, janv. 2025, doi: 10.1177/09544054241236224.
- [4] « schema-tolerie-emboutissage.jpg (1490×999) ». Consulté le: 29 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.3dprint.fr/wp-content/uploads/2020/05/schema-tolerie-emboutissage.jpg>
- [5] G. Venkatachalam, V. Kumar, et S. Narayanan, « Finite element analysis of forming limits for stretch forming of perforated aluminium sheet metals », *arpn journal of engineering and applied sciences*, vol. 8, n° 8, p. 652-655, 2013.
- [6] F. Klocke, *Manufacturing Processes 4: Forming*. in RWTHedition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-36772-4.
- [7] R. A., R. T., R. G., S. G., et S. D., « Experimental investigation on mechanical properties of TIG welded dissimilar AISI 304 and AISI 316 stainless steel using 308 filler rod », *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, p. 8207-8211, janv. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.502.
- [8] J. Biehler, H. Hoche, et M. Oechsner, « Nitriding behavior and corrosion properties of AISI 304L and 316L austenitic stainless steel with deformation-induced martensite », *Surface and Coatings Technology*, vol. 324, p. 121-128, sept. 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.059.
- [9] S. R. Kandala, K. Balani, et A. Upadhyaya, « Mechanical and Electrochemical Characterization of Supersolidus Sintered Austenitic Stainless Steel (316 L) », *High Temperature Materials and Processes*, vol. 38, n° 2019, p. 792-805, janv. 2019, doi: 10.1515/htmp-2019-0032.
- [10] P. Zhang, H. Jian, L. Yin, J. Liu, Z. Cai, et Y. Tong, « Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Cr-Rich 316 Stainless Steel Coatings Fabricated by the TIG Process Using Flux-Cored Wires », *Molecules*, vol. 29, n° 8, Art. n° 8, janv. 2024, doi: 10.3390/molecules29081785.

- [11] « Stainless steel : microstructure, mechanical properties and methods of application Download ( 291 Pages | Free ) ». Consulté le: 4 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.pdfdrive.com/stainless-steel-microstructure-mechanical-properties-and-methods-of-application-e181358766.html>
- [12] P. Jovičević-Klug, M. Jovičević-Klug, M. Rohwerder, M. Godec, et B. Podgornik, « Complex Interdependency of Microstructure, Mechanical Properties, Fatigue Resistance, and Residual Stress of Austenitic Stainless Steels AISI 304L », *Materials*, vol. 16, n° 7, Art. n° 7, janv. 2023, doi: 10.3390/ma16072638.
- [13] A. Abouchenari, M. J. Jalilpour, et M. R. A. Yazdi, « Additive manufacturing of AISI 304L stainless steel: A review of processing parameters and mechanical performance », *Synthesis and Sintering*, vol. 4, n° 2, p. 87-100, juin 2024, doi: 10.53063/synsint.2024.42230.
- [14] M. Shirdel, H. Mirzadeh, et M. H. Parsa, « Nano/ultrafine grained austenitic stainless steel through the formation and reversion of deformation-induced martensite: Mechanisms, microstructures, mechanical properties, and TRIP effect », *Materials Characterization*, vol. 103, p. 150-161, mai 2015, doi: 10.1016/j.matchar.2015.03.031.
- [15] R. K. Blandford, D. K. Morton, S. D. Snow, et T. E. Rahl, « Tensile Stress-Strain Results for 304L and 316L Stainless Steel Plate at Temperature », in *Volume 6: Materials and Fabrication*, San Antonio, Texas, USA: ASMEDC, janv. 2007, p. 617-628. doi: 10.1115/PVP2007-26096.
- [16] V. Boljanovic, *Sheet metal forming processes and die design*, Second edition. South Norwalk, CT: Industrial Press, 2014.
- [17] H. Castro, G. Putnik, A. Castro, et R. D. Bosco Fontana, « Open Design initiatives: an evaluation of CAD Open Source Software », *Procedia CIRP*, vol. 84, p. 1116-1119, janv. 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.08.001.
- [18] M. Bencherif, M. Almansba, R. Ferhoum, M. Habak, et A. Boudedja, « Effectiveness of Digital Image Correlation in Capturing the Fracture Toughness in 304L Stainless Steel », *J Fail. Anal. and Preven.*, vol. 25, n° 2, p. 649-660, avr. 2025, doi: 10.1007/s11668-025-02142-6.
- [19] R. P. Selvi, B. Sivasankari, et R. Vasanthi, « Optimization using MS-Excel Solver », 2020.
- [20] M. Harmon, « The Excel Statistical Master ».
- [21] D. J. Cruz, M. R. Barbosa, A. D. Santos, S. S. Miranda, et R. L. Amaral, « Application of Machine Learning to Bending Processes and Material Identification », *Metals*, vol. 11, n° 9, p. 1418, sept. 2021, doi: 10.3390/met11091418.
- [22] A. Di Bucchianico, « Coefficient of Determination (2) », in *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008. doi: 10.1002/9780470061572.eqr173.

## Bibliographie

---

- [23] D. Zhang, « A Coefficient of Determination for Generalized Linear Models », *The American Statistician*, vol. 71, n° 4, p. 310-316, oct. 2017, doi: 10.1080/00031305.2016.1256839.
- [24] S. Nakagawa, P. C. D. Johnson, et H. Schielzeth, « The coefficient of determination R<sup>2</sup> and intra-class correlation coefficient from generalized linear mixed-effects models revisited and expanded », *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 14, n° 134, p. 20170213, sept. 2017, doi: 10.1098/rsif.2017.0213.
- [25] K. S. Cabuk *et al.*, « Chasing the objective upper eyelid symmetry formula; R<sup>2</sup>, RMSE, POC, MAE and MSE », 29 septembre 2023, *Research Square*. doi: 10.21203/rs.3.rs-3376397/v1.
- [26] T. O. Hodson, « Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not », *Geoscientific Model Development*, vol. 15, n° 14, p. 5481-5487, juill. 2022, doi: 10.5194/gmd-15-5481-2022.
- [27] T. O. Hodson, « Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not », *Geoscientific Model Development*, vol. 15, n° 14, p. 5481-5487, juill. 2022, doi: 10.5194/gmd-15-5481-2022.
- [28] M. Bencherif, M. Almansba, R. Ferhoum, M. Habak, et A. Boudedja, « Effectiveness of Digital Image Correlation in Capturing the Fracture Toughness in 304L Stainless Steel », *J Fail. Anal. and Preven.*, vol. 25, n° 2, p. 649-660, avr. 2025, doi: 10.1007/s11668-025-02142-6.