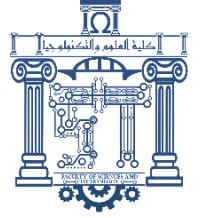




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie mécanique

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : **Génie mécanique**

Spécialité : **Génie des matériaux**

Par : - (BRIK Chaima

- TOUALBIA Sarra)

**Sujet**

**Etude et modélisation de l'emboutissage des tôles en  
acier**

Présenté et soutenu publiquement, le 12/06/2022, devant le jury composé de :

M/ DIHA Abdalh

MCA

Président

M/ HANNACHI Med Tahar

Pr

Rapporteur

M/ KHELIFA Hocine

MCB

Examineur 1

Promotion : 2021/2022



### *Remerciements*

Nous tenons tout d'abord à remercier « الله » le tout puissant pour nous avoir donné le courage, la santé, et pour nous avoir permis de réaliser ce modeste travail.

Nos remerciements à nos très chers parents pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis à notre égard.

Nous remercions notre encadreur Dr. HANNACHI Mohamed Tahar, pour ses conseils et sa disponibilité.

Nos vifs remerciements et notre gratitude à nos enseignants qui ont accepté d'être dans notre jury de soutenance : Dr. DIHA Abdallah  
Et Dr. KHELIFA Hocine.

Nous n'oublions pas de remercier A tous les membres de ma promotion  
Notre sincère gratitude va vers tous ceux qui ont participé de  
Près ou de loin à ce travail.

*Dédicaces*

Louanges à Allah qui m'a doté de force, de patience, de courage et de persévérance durant tout le long de mon cursus universitaire.

À mes chers père et mère pour tous leurs sacrifices, leurs prières et leur amour pour moi.

À ma sœur Amal, mes frères et ami d'enfance Belaid Imen pour leurs encouragements continus et leur soutien moral,

A toute ma famille, ma deuxième famille, et mon fiancé Saif leur soutien tout au long,

Et mes chers collègues, en particulier ma chère amie Brik chaima,

Au chef de département et aux professeurs pour leur soutien et leurs conseils

A toutes mes aimés sans exceptions.

*T.sarra*

## *Dédicaces*

Je dédie ce modeste ouvrage à la mémoire de mon cher père.  
Celui qui a sacrifié sa noble existence pour me bâtir un avenir prospère,  
et qui m'a apporté le soutien le plus précieux tout au long de mes études  
pour que je puisse arriver à ce jour sans qu'il soit ici parmi nous.

Toi papa.

A Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien,  
tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son  
assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi  
modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle  
gratitude.

A ma famille avec tous mes sentiments, de gratitude et de reconnaissance  
pour tous les sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon  
éducation dans les meilleures conditions

À mes sœurs et frères pour qui je sais que mon succès est très important  
pour vous. Qu'Allah vous récompense le meilleur.

A ma meilleure amie Toualbia sarra

A tous les membres de ma promotion.

*B.chaima*

### ملخص

فِي هذه الدراسة قمنا حاولنا تقديم التعاريف الوصفية المناسبة، لعملية التشكل على البارد للمعادن، كما وضحنا العناصر التي تتحكم فِيه وموازاتنا مع هذا العمل النظري، وبعدها قمنا بوصف واحتساب العناصر والخصائص الميكانيكية لهذا المعدن لمعزفة السلوك الميكانيكي للمعدن المستعمل (الشدّة، الصلادة، والصدمات). كما قمنا بعمليات حسابية واسعة قصد تحديد العناصر الهندسية لعملية التشكيل، وكذلك تحديد القوى الخاصة بالتشكل على البارد بدون احتكاك وبالاحتكاك.

---

### Résumé

Dans cette étude on a tenté de donner les notions et décrire le procédé d'emboutissage, puis on a essayé de présenter et de déterminer les propriétés mécaniques de l'acier considéré, tout en faisant les calculs pour un nombre d'essais traditionnels (essais de traction, essais de dureté et essais...). Puis on a passé aux méthodes des calculs des paramètres géométriques, ainsi que la détermination des efforts mécaniques de l'opération d'emboutissage.

---

### Abstract

In this study we tried to give the notions and describe the stamping process, then we tried to present and determine the mechanical properties of the steel considered, while making the calculations for a number of traditional tests (tests tensile tests, hardness tests and tests, etc.). Then we moved on to the methods of calculating the geometric parameters, as well as the determination of the mechanical forces of the stamping operation.

## Table de Matières

Remerciements .....	i
Dédicaces .....	ii
Résumé .....	iv
Table de Matières .....	v
Listes des figures .....	ix
Liste des tableaux .....	xii
Liste des symboles et des abréviations.....	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
I.1. Introduction de chapitre I.....	4
I.1. Généralités sur les procédés de mise en forme des métaux .....	4
I.2. Les tôle d'aciers .....	5
I.3. Notions d'emboutissage.....	5
I.3.1. Définition de l'emboutissage.....	5
I.3.2. Différents types d'emboutissages .....	6
I.3.2.1. Emboutissage à froid .....	6
I.3.1.2. Emboutissage à chaud.....	6
I.3.3. Principe de l'emboutissage .....	7
I.3.4. Modes d'emboutissage .....	14
I.3.5. Les avantages et les inconvénients de l'emboutissage .....	16
I.4. Démarche de mise au point de l'emboutissage .....	16
I.5. Machines utilisées en emboutissage.....	17
I.5.1. La presse mécanique .....	17
I.5.2. La presse hydraulique.....	17
I.6. Matériaux et formes d'emboutis .....	17
I.6.1. Matériaux emboutissables .....	17
I.6.1.1. Comportement du matériau lors de l'opération d'emboutissage.....	19
I.6.2.4. Forme rectangulaire : Dans les emboutis rectangulaires on peut considérer que seuls les rayons latéraux sont emboutis (quart d'embouti cylindrique), les flancs étant simplement cambrés [14].....	23
I.7. Essais d'emboutissage .....	23
I.8. Intérêts et débouchés .....	25
I.9. Conclusion de chapitre I .....	26
II.1. Introduction de chapitre II .....	28

## Table de matières

---

II.2. Caractérisation en emboutissage .....	28
II.2.1. Caractérisation de la déformation en emboutissage .....	28
II.2.1.1. Mesure de déformations en emboutissage .....	30
II.2.1.2. Principe et analyse des déformations .....	31
II.2.1.3. Courbes limite de formage .....	31
II.2.1.4. Les modes de déformation en emboutissage .....	33
II.3. Principaux paramètres du procédé d'emboutissage.....	35
II.3.1. Forme du flan initial .....	36
II.3.2. Effort de serrage.....	36
II.3.3. Force de retenue de jonc .....	38
II.3.4. la température de mise en forme .....	38
II.4. Aspects opératoires.....	39
II.4.1 Paramètres liés à la presse et à la géométrie de la tôle.....	39
II.4.1.1 Le jeu entre le poinçon et la matrice.....	39
II.4.1.2 Le rayon sur la matrice .....	40
II.4.1.3 Rayon du poinçon ( <i>rp</i> ).....	41
II.4.2 Paramètres liés à la tôle .....	42
II.4.2.1 La taille du flan : .....	42
II.4.2. paramètre mécaniques .....	43
II.4.2.1 Vitesse d'emboutissage.....	43
II.4.2.2. La pression du serre-flan .....	44
II.4.2.3. L'effort d'emboutissage .....	45
II.4.2.4. La lubrification : .....	45
II.4.2.5 Nombre de passes .....	46
II.5. Paramètres influençant le procédé d'emboutissage .....	47
II.5.1. Influence du coefficient d'anisotropie .....	48
II.5.2 Influence du coefficient d'écrouissage.....	49
II.5.3 Influence de la limite d'élasticité .....	50
II.5.4. Influence de la résistance à la traction.....	51
II.5.5 Influence de l'allongement.....	51
II.5.6. Influence de l'épaisseur.....	52
II.6. Les principaux défauts des pièces embouties .....	52
II.7. Influence de la structure des tôles minces sur leurs emboutissabilité .....	55



## Table de matières

---

II .8. Conclusion de chapitre II .....	58
III.1. Introduction de chapitre I.....	60
III.2. Procédure expérimentales .....	60
III.2.1. Choix du métal de base .....	60
III.2.2. Analyse chimique de l'acier (DC04).....	60
III.2.3. Découpage et usinage des éprouvettes .....	62
III.3. Essais mécaniques .....	62
III.3.1. Essai de traction .....	62
III.3.2. Essais de dureté.....	67
III.3.3. Essai de Résilience (K).....	71
III.4 Détermination des différents paramètres d'emboutissage.....	73
III.4.1 Détermination du diamètre initial du flan .....	75
III.4.2. Détermination des forces d'emboutissage .....	76
III.4.3 Détermination des forces de serrage du serre-flan .....	79
III.4.4 Détermination du diamètre de la matrice .....	80
III.4.5 Détermination du jeu poinçon-matrice.....	81
III.4.6 Détermination du rayon sur la matrice .....	82
III.4.7 Détermination du rayon sur le poinçon .....	84
III.4.8. Détermination de l'énergie d'emboutissage.....	84
III.4.9. Variation de l'épaisseur par rapport à l'épaisseur initiale.....	86
III.4.10 réduction des diamètres .....	86
III.5. Courbe limite d'emboutissage.....	87
III.6. Initiation à la simulation numérique par la méthode des éléments finis avec Freecad. ....	88
III.7.1. A propos de Freecad.....	88
III.6.2. simulation de ¼ de la structure circulaire .....	90
III.6.3. simulation de la structure finale par symétrie .....	96
III.7. DISCUSSION DES RESULTATS.....	102
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	106
Références bibliographie.....	108

### Listes des figures

<b>Figure I.1</b> : Principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques .....	4
<b>Figure I.2</b> : Procédé d'emboutissage .....	5
<b>Figure I.3</b> : Principe de l'emboutissage .....	7
<b>Figure I.4</b> : Procédé d'emboutissage .....	8
<b>Figure I.5</b> : Procédé d'emboutissage phase 1 .....	9
<b>Figure I.6</b> : Procédé d'emboutissage phase 2 .....	9
<b>Figure I.7</b> : Procédé d'emboutissage phase 3 .....	10
<b>Figure I.8</b> : Procédé d'emboutissage phase 4 .....	10
<b>Figure I.9</b> : Retour élastique .....	12
<b>Figure I.11</b> : Exemples de pièces embouties tridimensionnelles .....	13
<b>Figure I.12</b> : les applications de l'emboutissage .....	14
<b>Figure I.13</b> : a) Emboutissage par expansion, b) Emboutissage profond avec rétreint .....	15
<b>Figure I.14</b> : Exemples des pièces illustrant deux modes de déformation type rencontrés dans les opérations d'emboutissage .....	15
<b>Figure I.15</b> : Mode de déformation .....	20
<b>Figure I.16</b> : Plissement dans la partie libre de l'embouti .....	20
<b>Figure I.17</b> : Emboutissage renversé .....	21
<b>Figure I.18</b> : Emboutissage des pièces conique .....	22
<b>Figure I.19</b> : Emboutissage de pièce demi sphérique .....	22
<b>Figure I.20</b> : Emboutis rectangulaires .....	23
<b>Figure I.21</b> : Principaux modes de déformation en emboutissage illustrés par des emboutis servant à des essais de caractérisation .....	24
<b>Figure I.22</b> : Essai Fukui et rupture caractéristique .....	25
<b>Figure II.1</b> : variation de la force en fonction de l'allongement .....	30
<b>Figure II.2</b> : Différentes nature de grille de déformation.....	30
<b>Figure II.3</b> : Courbe limite de formage pour différents domaines .....	33
<b>Figure II.4</b> : Schématisation de différents tests de déformation dans le plan des déformations Principales de surface de la tôle .....	34
<b>Figure II.5</b> : Principe de la segmentation élastique du serre-flan .....	37
<b>Figure II.6</b> : Géométrie d'un jonc de serrage .....	38
<b>Figure II.7</b> : Variation de l'arrondi sur la matrice .....	41

## Listes des figures

---

<b>Figure II.8 :</b> Le rayon sur le poinçon .....	42
<b>Figure II.9 :</b> Ajout de 2 à 3 mm pour détournage .....	43
<b>Figure II.10 :</b> Nombre de passes .....	46
<b>Figure II.11 :</b> Différentes évolutions de la force en fonction de la course en emboutissage .....	47
<b>Figure II.12 :</b> Défauts dans les pièces embouties (Rupture, retour élastique et plissement).....	53
<b>Figure II.13 :</b> Changement du trajet de déformation au cours de passage de la tôle par le rayon de courbure de l'outil .....	55
<b>Figure II.14 :</b> Influence de la taille de grain sur la limite d'élasticité des aciers .....	57
<b>Figure III.1 :</b> Eprouvette de traction prismatique .....	62
<b>Figure III.2 :</b> Machine de traction .....	63
<b>Figure III.3 :</b> courbe de traction conventionnelle .....	64
<b>Figure III.4 :</b> Courbe rationnelle de traction avant déformation. ....	66
<b>Figure III.5 :</b> courbe rationnelle de traction après déformation.....	67
<b>Figure III.6 :</b> Essai de dureté Brinell .....	68
<b>Figure III.7 :</b> Principe de l'essai Vickers .....	69
<b>Figure III.8 :</b> histogramme de Dureté avant et après déformation.....	71
<b>Figure III.9 :</b> éprouvette de résilience à entaille en U et V .....	72
<b>Figure III.10 :</b> Essai de .....	73
<b>Figure III.11 :</b> Schématisation d'une machine d'emboutissage .....	74
<b>Figure III.12 :</b> Procédé d'emboutissage .....	77
<b>Figure III.13 :</b> Effort d'emboutissage en fonction de l'épaisseur.....	79
<b>Figure III.14 :</b> force de serrage du Serre-flan en fonction de l'épaisseur. ....	80
<b>Figure III.15 :</b> diamètre de la matrice en fonction de l'épaisseur.....	81
<b>Figure III.16 :</b> jeu poinçon-matrice en fonction de l'épaisseur. ....	82
<b>Figure III.17 :</b> rayon efficace sur la matrice en fonction de l'épaisseur.....	83
<b>Figure III.18 :</b> rayon sur le poinçon en fonction de l'épaisseur.....	84
<b>Figure III.19 :</b> l'énergie d'emboutissage en fonction de la force.....	85
<b>Figure III.20 :</b> variation de l'épaisseur en fonction de l'épaisseur initiale. ....	86
<b>Figure III.21 :</b> Diamètre en fonction de nombre de passe .....	87
<b>Figure III.22 :</b> courbe limite d'emboutissage. ....	87
<b>Figure III.23 :</b> Etats de contrainte et de déformation .....	88
<b>Figure III.24 :</b> conception et maillage du ¼ de la structure du flan. ....	90
<b>Figure III.25 :</b> Déplacement suivant l'axe X du 1/4 de structure.....	90

## Listes des figures

---

<b>Figure III.26:</b> Déformation suivant l'axe X du 1 /4 de structure. ....	91
<b>Figure III.27 :</b> Contrainte suivant l'axe X du 1 /4 de structure. ....	91
<b>Figure III.28 :</b> Déplacement suivant l'axe Y du 1 /4 de structure. ....	92
<b>Figure III.29 :</b> déformation suivant l'axe Y du 1 /4 de structure. ....	92
<b>Figure III.30 :</b> Contrainte suivant l'axe Y du 1 /4 de structure. ....	93
<b>Figure III.31 :</b> Déplacement suivant l'axe Z du 1 /4 de structure. ....	93
<b>Figure III.32 :</b> Déformation suivant l'axe Z du 1 /4 de structure. ....	94
<b>Figure III.33 :</b> Contrainte suivant l'axe Z du 1 /4 de structure. ....	94
<b>Figure III.34 :</b> Contrainte Von mises du ¼ de la structure considérée. ....	95
<b>Figure III.35 :</b> Contrainte maximale du ¼ de la structure considérée. ....	95
<b>Figure III.36 :</b> conception et maillage de la structure cylindrique. ....	96
<b>Figure III.37 :</b> Déplacement suivant l'axe X. ....	96
<b>Figure III.38 :</b> Déformation suivant l'axe X. ....	97
<b>Figure III.39 :</b> Contrainte suivant l'axe X. ....	97
<b>Figure III.40 :</b> Déplacement suivant l'axe Y. ....	98
<b>Figure III.41 :</b> Déformation suivant l'axe Y. ....	98
<b>Figure III.42 :</b> Contrainte suivant l'axe Y. ....	99
<b>Figure III.43:</b> Déplacement suivant l'axe de chargement Z. ....	99
<b>Figure III.44 :</b> Déformation suivant l'axe Z. ....	100
<b>Figure III.45 :</b> Contrainte suivant l'axe Z. ....	100
<b>Figure III.46 :</b> Contrainte de Von Mises. ....	101
<b>Figure III.47 :</b> Contrainte maximale. ....	101

## Liste des tableaux

<i>Tableau I.1.</i> Caractéristiques des différentes catégories des tôles .	18
<i>Tableau II.2 :</i> vitesses d'emboutissage	44
<i>Tableau II.3 :</i> Pression spécifique	45
<i>Tableau II.4 :</i> Quelques valeurs des coefficients de réduction pour différents types de métaux	47
<i>Tableau II.5 :</i> valeurs de coefficient d'anisotropie moyen pour différents matériaux	49
<i>Tableau II.6 :</i> valeurs de n pour différents matériaux	50
<i>Tableau II.7 :</i> Relation entre formabilité et valeurs de $R_e / R_m$ et n (pour les aciers)	51
<i>Tableau III.1 :</i> désignation de l'acier DC04 D'après EN	60
<i>Tableau III.2 :</i> Composition chimique du métal de base	61
<i>Tableau III.3 :</i> Propriétés physiques de l'acier DC04	61
<i>Tableau III.4 :</i> donne théorique	66
<i>Tableau III.5 :</i> donné théorique	70
<i>Tableau III.6 :</i> LDR pour chaque matériau	76
<i>Tableau III.7:</i> paramétré K en fonction du rapport $\beta$ .	78
<i>Tableau III.8 :</i> Coefficient Beta-alpha	85
<i>Tableau III.9 :</i> Données géométriques et propriétés mécaniques de la structure emboutis.	89

## Liste des symboles et des abréviations

---

### Liste des symboles et des abréviations

A	L'Allongement
D	diamètre du flan
$dm$	Diamètre de la matrice
E	Module de Young
$e$	Épaisseur
F	la force d'emboutissage
Fe	charge à la limite d'élasticité
$h$	La hauteur
J	le jeu poinçons matrice
L	longueur
$m$	Coefficients de réduction
$n$	Coefficients d'écroutissage
P	la pression
Re	Limite élastique
Re 0,2	Limite conventionnelle d'élasticité
Rm	Limite maximale de la résistance à la rupture
$r$	Coefficients d'anisotropie
$rp$	Rayon du poinçon
$rm$	Rayon sur la matrice
S	la section
W	énergie
$\varepsilon$	La déformation
$\delta$	La contrainte
$\alpha$	alpha
$\beta$	Beta
CLF	courbe limite de formage

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

### INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'emboutissage est un procédé de mise en forme qui consiste à transformer une tôle fine plane en une forme non développable, au moyen de presses mécaniques ou hydrauliques. Ces dernières années, pour satisfaire les besoins des industriels, en termes de qualité et de compétitivité, de nombreux travaux ont été consacrés à la l'étude de ce procédé afin d'optimiser et d'assurer la faisabilité des produits [1].

Les tôles à emboutir sont généralement des tôles laminées d'alliages métalliques ductiles. L'emboutissage est un procédé qui marque sa présence dans presque toutes les industries mécaniques.

L'emboutissage a une grande importance industrielle, si l'on se réfère au tonnage des pièces fabriquées. La faible épaisseur des tôles utilisées dans la production, permet un gain important du poids et une économie de la matière. Les pièces obtenues par ce procédé peuvent également avoir une grande rigidité vues leurs formes et leurs conceptions. C'est un procédé qui permet donc un bon rapport rigidité-poids, ce qui est très souhaité et recherché dans l'industrie. C'est grâce à ces avantages que ce procédé trouve une large application. Il est très utilisé dans la fabrication du mobilier métallique, de l'électroménager, de l'emballage métallique, de l'aéronautique et surtout de l'automobile (il suffit ici de dire que sur un véhicule l'emboutissage concerne 500 pièces environ). Un autre avantage très important pour ce procédé: il est très bien adapté au travail en série, un outillage spécial permet d'atteindre des cadences de production d'environ 60 pièces par minute.

Nous présentons dans ce travail dont l'objectif principale est une caractérisation générale du procédé de l'emboutissage où sont couplées plusieurs types de paramètres (géométrique, matériau et mécanique de contact).

Pour cela, ce mémoire est composé de 3 chapitres, arrangés comme suit :

Dans le premier chapitre, on présente une étude bibliographique sur les notions et les pratiques de l'emboutissage comme procédé de mise en forme, en insistant sur l'aspect descriptif.

Dans le deuxième chapitre, on présente les paramètres influençant le procédé d'emboutissage à savoir les paramètres géométriques et mécaniques.



## **Introduction Générale**

---

Le chapitre trois, est consacré aux étapes de calculs et de détermination des propriétés mécaniques du matériau considéré, ainsi que les paramètres du procédé d'emboutissage, précité en avant, à savoir les paramètres géométriques et mécaniques. Une initiation à la simulation numérique du procédé d'emboutissage est à été réalisée.

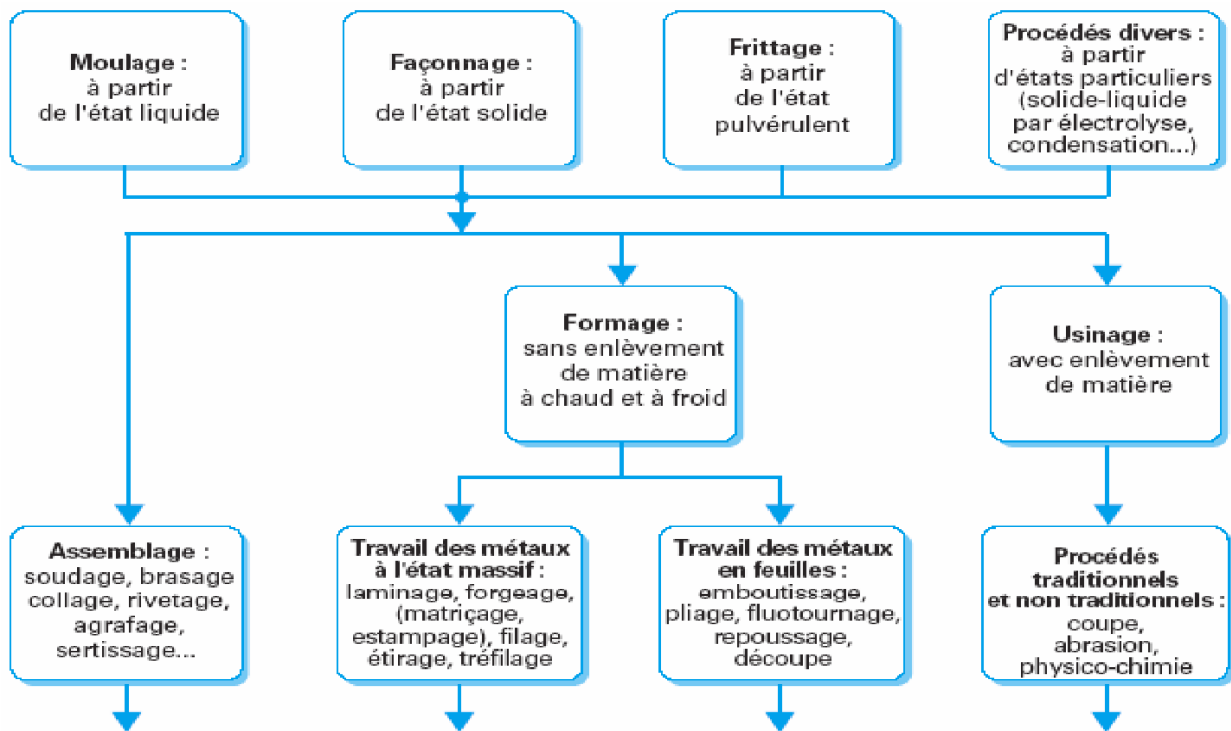
**CHAPITRE I**  
**NOTIONS DU PROCEDE**  
**D'EMBOUTISSAGE DES**  
**TOLES EN ACIER**

**I.1. Introduction de chapitre I**

La technique de mise en forme des tôles la plus utilisée est l'emboutissage à froid, qui consiste à obtenir, à partir de tôles planes prédécoupées, une pièce dont la forme est constituée de surfaces non développables. Ce chapitre donne un aperçu sur le procédé de mise en forme par déformation des matériaux métalliques (emboutissage) [2].

**I.1. Généralités sur les procédés de mise en forme des métaux**

Il existe trois voies principales de mise en forme selon l'état de départ du matériau métallique (le moulage, le façonnage et le frittage). La Figure (I.1) récapitule les principaux procédés de mise en forme des métaux utilisés actuellement. Parmi les techniques de formage sans enlèvement de matière des métaux en feuilles on trouve le procédé d'emboutissage. Il est l'un des procédés de mise en forme des tôles minces le plus ancien et le plus répandu dans le milieu industriel [3].



**Figure I.1 :** Principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques [3].

## I.2. Les tôles d'aciers

Les tôles font partie de la famille des produits plats. Leurs épaisseurs varient en fonction du mode de fabrication. Certaines sont livrées en plaques, d'autres en bobines. Elles peuvent être laminées à chaud en continu, laminées à chaud sur un train réversible dit « quarto » ou laminées à froid [4].

Les tôles aciers de construction font partie de la famille des produits plats, les tôles aciers (matière) au fer carbone et au manganèse présentant un niveau minimal garanti de résistance (limite d'élasticité et résistance à la traction) et une ductilité satisfaisante [5].

## I.3. Notions d'emboutissage

### I.3.1. Définition de l'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. Ce procédé est l'un des seuls à pouvoir tenir des cadences de production élevées tout en respectant les tolérances géométriques exigées. Ce mode de formage s'effectue sur une presse au moyen d'un outillage dont la configuration détermine l'effet obtenu sur le flan :

- Outils à simple effet : configuration la plus simple, composée principalement d'une matrice et d'un poinçon.
- Outils double effet : comprend en plus de l'outil simple effet, un serre-flan [6].

On distingue : l'emboutissage à froid et emboutissage à chaud.

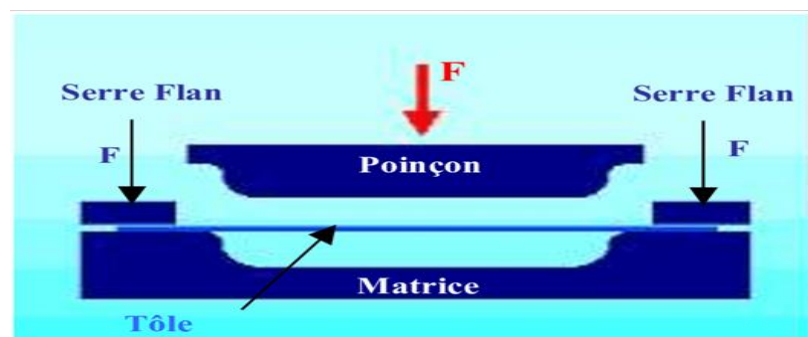


Figure 1.2 : Procédé d'emboutissage [7].

**I.3.2. Différents types d'emboutissages**

Il existe deux types d'emboutissage :

**I.3.2.1. Emboutissage à froid**

Cette technique consiste à former une pièce à température ambiante. Elle est principalement utilisée sur un outillage double effet mais peut aussi l'être sur un outillage simple effet dans le cas où les emboutis sont peu profonds ou s'ils nécessitent peu d'effort de serrage. Ce type de formage permet d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle, limite les coûts et évite la formation d'oxyde. Néanmoins, l'épaisseur des tôles à emboutir ainsi que les caractéristiques mécaniques sont à l'origine des limitations de cette technique. En effet, il devient nécessaire pour les grandes épaisseurs d'effectuer l'emboutissage en plusieurs passes. A ceci, il faut ajouter d'une part l'effet de l'érouissage apparaissant lors de la mise en forme et se traduisant par un durcissement structural et une baisse de la ductilité [6].

Les matériaux concernés par ce type d'emboutissage sont :

- Acier doux et inoxydable,
- aluminium,
- cuivre, et laiton [8].

**I.3.1.2. Emboutissage à chaud**

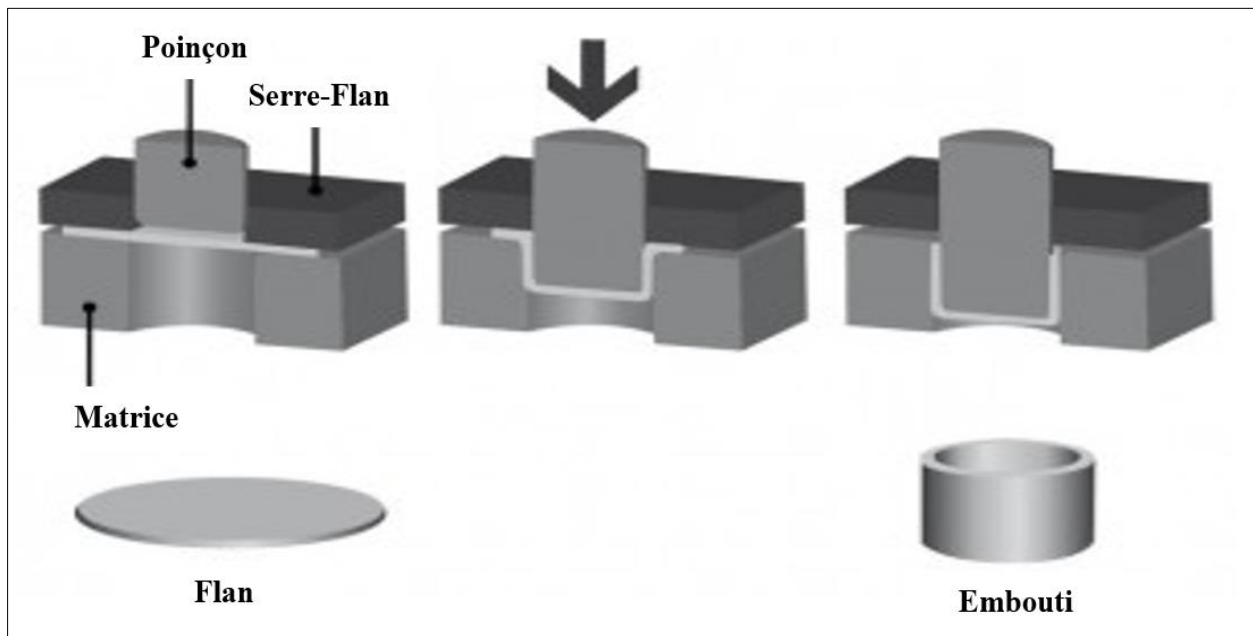
Il est réalisé exclusivement sur presses hydrauliques. Il est réservé aux matériaux peu ductiles (magnésium, titane, zinc), aux emboutissages profonds, et aux tôles de forte épaisseur nécessitant de grands efforts (épaisseur supérieure à 7 mm pour l'acier). Les cadences de production sont inférieures et les aspects de surface sont moins bons, vis-à-vis de l'emboutissage à froid [9].

Cette technique consiste à former une pièce. Elle est principalement se pratique

- Quand le métal ou l'alliage ne peut pas se conformer à froid.
- Quand, en raison de l'épaisseur et de la surface de la tôle, l'emboutissage à froid exige une force supérieure à celle de la presse dont on dispose.
- Quand, pour les faibles séries, on veut limiter les frais d'outillage, toujours importants, que nécessite l'emboutissage à froid [10].

### I.3.3. Principe de l'emboutissage

L'emboutissage est un procédé de fabrication qui consiste à mettre en forme une pièce de métal, des feuilles minces appelées tôles, à l'aide d'une presse à emboutir d'une forte puissance. Le principe repose sur la déformation du "flan", matière qui n'est pas encore emboutie, par méthode de poinçonnage [11].



**Figure I.3 :** Principe de l'emboutissage [12].

Sur ce schéma, pourrait distinguer la matrice, qui épouse la forme extérieure de la pièce dit le "flan" ou appelée « Becker » puis, nous trouvons le serre-flan, qui permet de coincer le flan pendant son usinage. Il entoure le poinçon, qui lui-même donnera la forme à la tôle [11].

L'emboutissage consiste alors à fabriquer, à partir d'un flan plan de faible épaisseur, une pièce de forme complexe généralement non développable. Le flan étant plaqué, avec une certaine force contre la matrice, par le serre-flan et mis en forme par avancée du poinçon à l'aide d'une presse [13].

Nous pouvons présenter le procédé d'emboutissage comme suit (voir Figure I.4) :

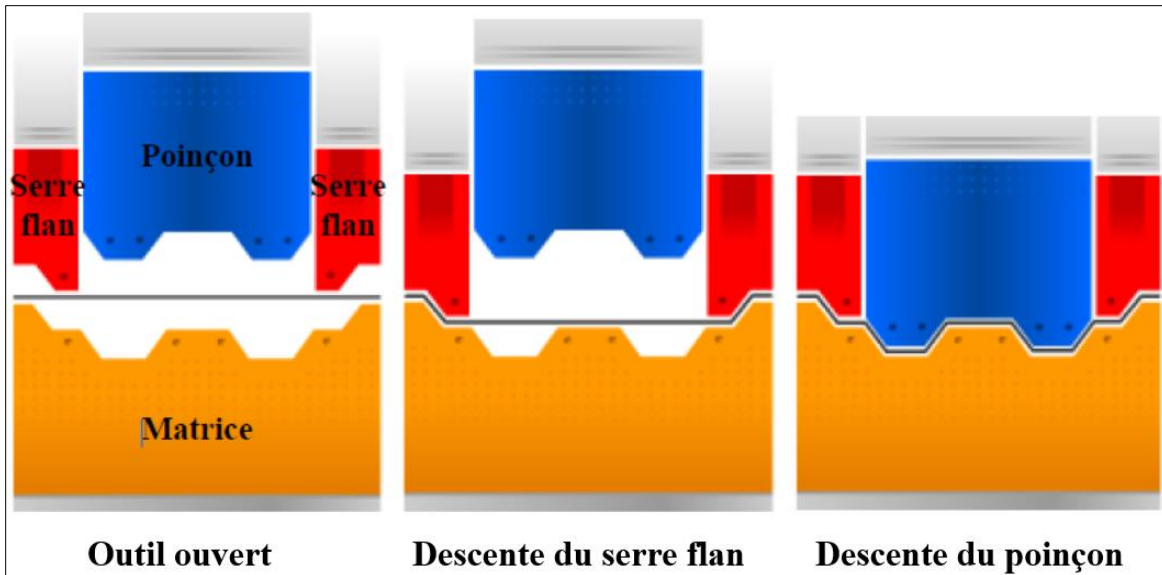


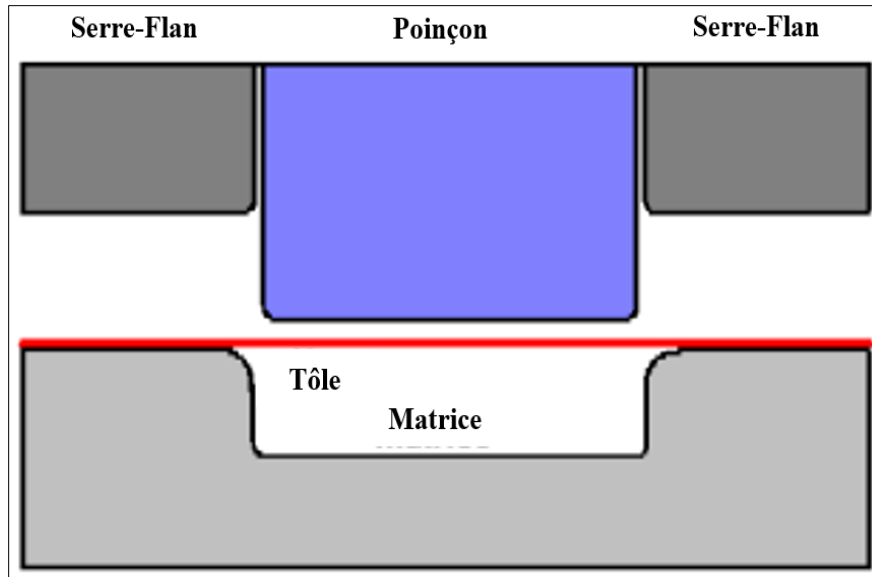
Figure I.4 : Procédé d'emboutissage [14].

On distingue trois types d'outils en emboutissage : la matrice, le serre-flan et le poinçon, la présence du serre-flan, utilisé pour contrôle de la planéité de la tôle et de son mouvement, distingue ce procédé du simple estampage [15].

L'entrée de la matrice doit être très arrondie et polie pour éviter toute déchirure du métal et pour optimiser le comportement des zones de rétreint - aucun angle ne doit être vif et un parfait état de surface est primordial : la mise au point de tels outils est une opération très spécialisée et très coûteuse notamment sur les pièces d'aspect. [16].

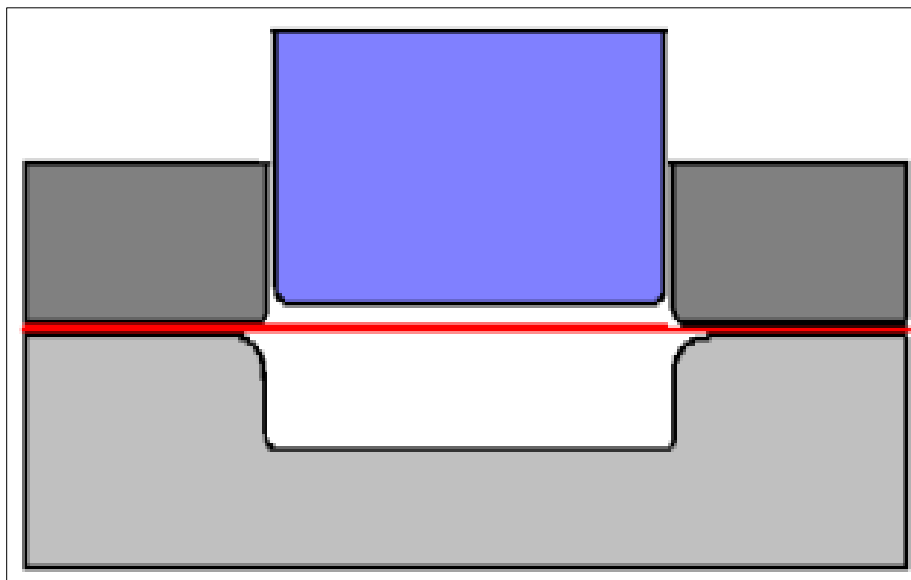
L'opération d'emboutissage typique comporte cinq phases.

- Phase 1: poinçon et Serre-flan sont relevés. La tôle, préalablement graissée, est posée sur la matrice.



**Figure I.5 :** Procédé d'emboutissage phase 1 [17].

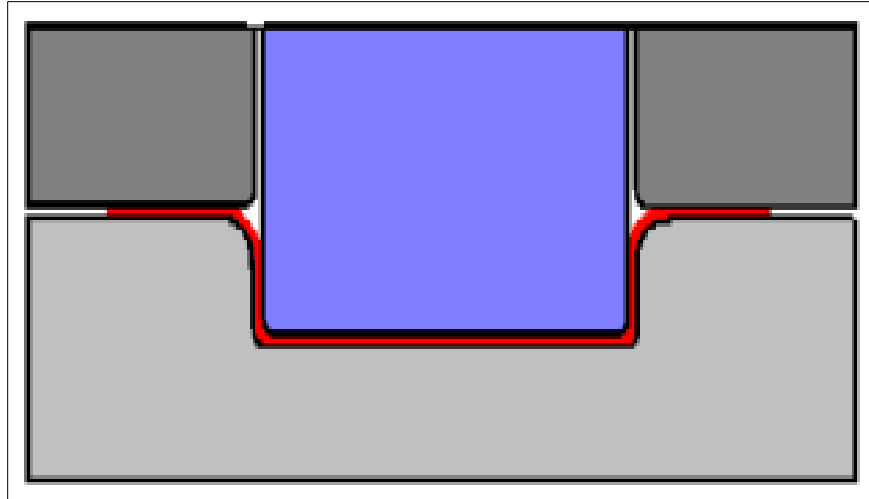
- Phase 2: le Serre-flan est descendu et vient appliquer une pression bien déterminée, afin de maintenir la tôle tout en lui permettant de glisser.



**Figure I.6 :** Procédé d'emboutissage phase 2 [17].

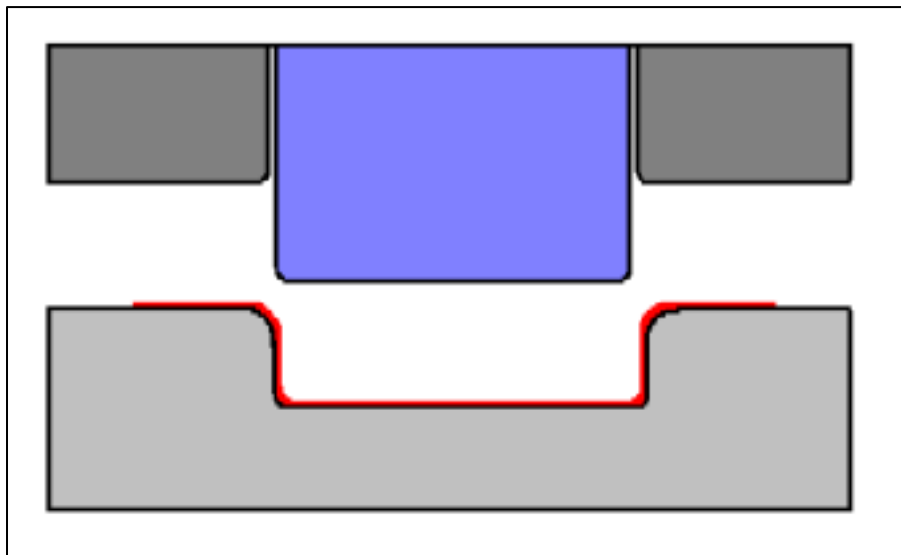


- Phase 3: le poinçon descend et déforme la tôle de façon plastique en l'appliquant contre le fond de la matrice.



**Figure I.7 :** Procédé d'emboutissage phase 3 [17].

- Phase 4: le poinçon et le serre-flan se relèvent : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée).



**Figure I.8 :** Procédé d'emboutissage phase 4 [17].

- Phase 5: on procède au « détournage » de la pièce, c'est-à-dire à l'élimination des parties devenues inutiles. (Essentiellement les parties saisies par le Serre-flan) [17].

L'outillage utilisé en emboutissage comprend donc :

- ✓ **Un poinçon** : coulissant plus ou moins vite sur l'axe vertical, et déformant la tôle.
- ✓ **Une matrice** : elle serre d'appuie a la tôle et lui donne la forme extérieure finale au

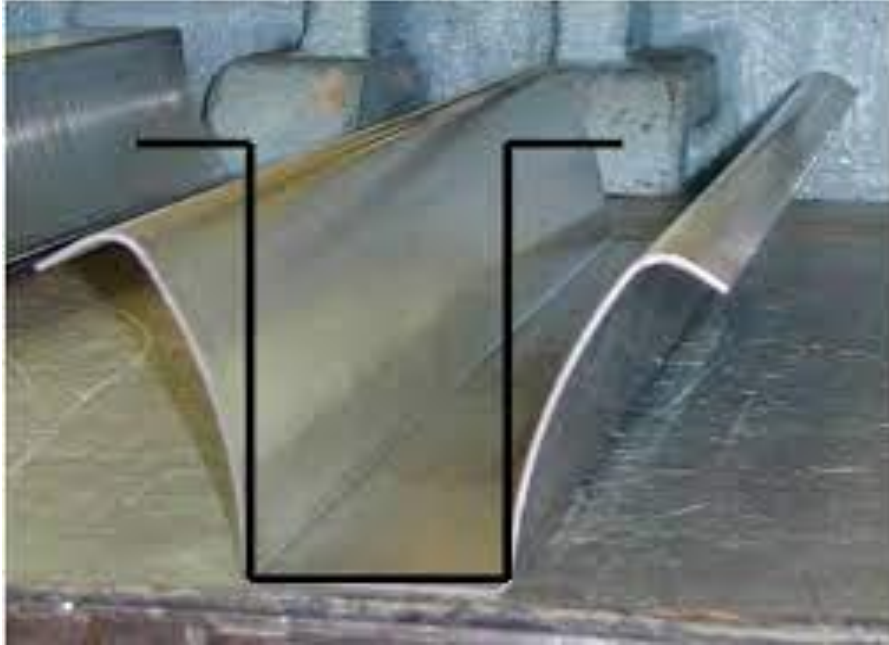
,  
Retour élastique prés.

- ✓ **Un serre flan** : Son rôle est de maintenir plus ou moins le flan lors d'une opération d'emboutissage afin d'assurer un écoulement homogène du métal et prévenir les risques de plis ou autres défauts d'emboutissage [2].

Le processus d'emboutissage se décompose de la manière suivante :

- Définition de la direction d'emboutissage ;
- Définition du contour et de la position du flan initial ;
- Descente du serre-flan pour plaquer la tôle sur la matrice ;
- Mise en forme de la tôle par avancée du poinçon ;
- Découpage des habillages de l'embouti afin d'obtenir la pièce finale [6].

Au cours de l'opération d'emboutissage, le flan est tout d'abord pincé entre la matrice et le serre-flan puis, lorsque le serrage est effectué, le poinçon descend à l'intérieur de la matrice entraînant ainsi le métal dans sa course et l'obligeant à épouser son contour sous l'effet des tensions engendrées par la retenue du serre-flan. Comme pour tous les procédés de formage, l'opération d'emboutissage engendre de grandes déformations dans la tôle. Si les conditions opératoires ne sont pas optimales, ces déformations conduisent à des défauts comme la rupture, le plissement et des distorsions géométriques dues au retour élastique (*Figure. 1.9*) [18].



*Figure I.9* : Retour élastique [6].

D'après une étude du Service des Etudes et des Statistiques Industrielles (SESSI) du Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie (voir figure I.10), parmi le secteur d'activités industrielles de transformation des métaux sous forme solide, les entreprises de découpage-emboutissage sont les premiers fournisseurs de l'automobile (voir figure I.11) [19].

Le secteur découpage emboutissage, qui est la deuxième grande composante des services industriels en termes de chiffre d'affaires (33%), est caractérisé par sa forte corrélation avec l'industrie automobile qui représente plus des deux tiers de ses débouchés (68.1%). Les fournisseurs de cette branche bénéficient tout naturellement de la demande en provenance de ce secteur. Mais ils doivent suivre les orientations stratégiques des constructeurs automobiles et les nouveaux besoins des consommateurs [20].

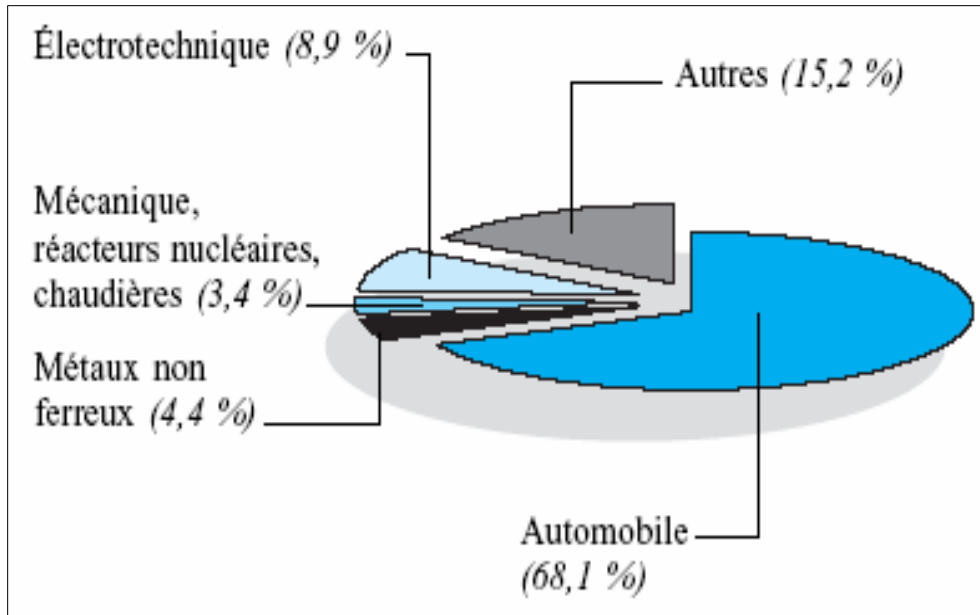


Figure I.10 : Clientèles des entreprises de découpage-emboutissage [19].



Figure I.11 : Exemples de pièces embouties tridimensionnelles [21].

A cet égard, les entreprises se tournent de plus en plus vers les innovations du procédé afin d'identifier les technologies clés pour :

- ❖ Améliorer la qualité des pièces embouties et la flexibilité des outils ;
- ❖ Réduire les coûts de la production ;

- ❖ Améliorer la productivité et la compétitivité [22].

Les pièces obtenues par ce procédé peuvent également avoir une grande rigidité vues leurs formes et leurs conceptions. C'est un procédé qui permet donc un bon rapport rigidité-poids, ce qui est très souhaité et recherché dans l'industrie.

Il est très utilisé dans la fabrication du mobilier métallique, de l'électroménager, de l'emballage métallique, de l'aéronautique et surtout de l'automobile [22].



**Figure 1.12 : les applications de l'emboutissage [23, 24].**

#### **1.3.4. Modes d'emboutissage**

L'emboutissage impose à la tôle diverse modes de déformation, les deux modes principaux étant :

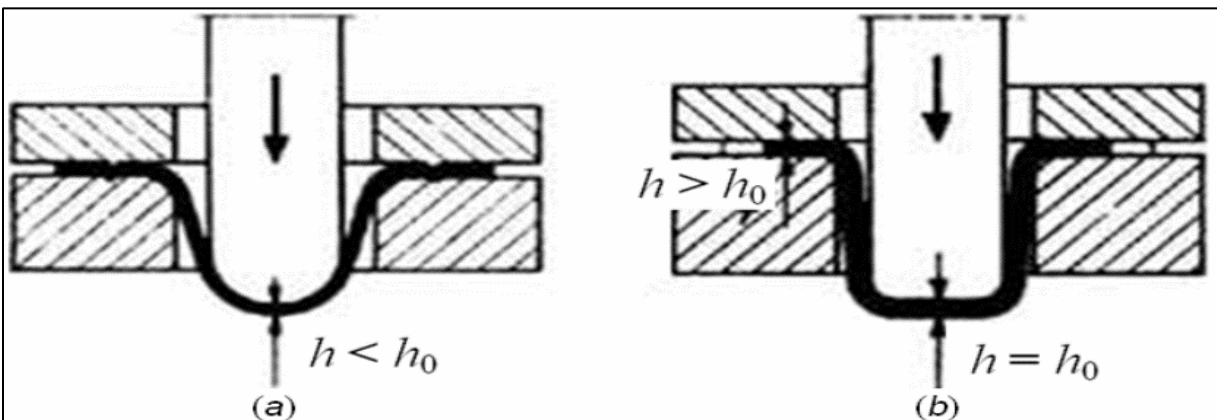
##### **a) Emboutissage en expansion**

Si la pièce a une forme complexe mais de faible profondeur on peut bloquer le flanc entre serre flan et matrice, si besoin est avec des joncs. La tôle ne se déforme alors que sur le poinçon en s'allongeant dans une ou plusieurs directions et en s'amincissant, nous disons que nous travaillons en expansion [25].

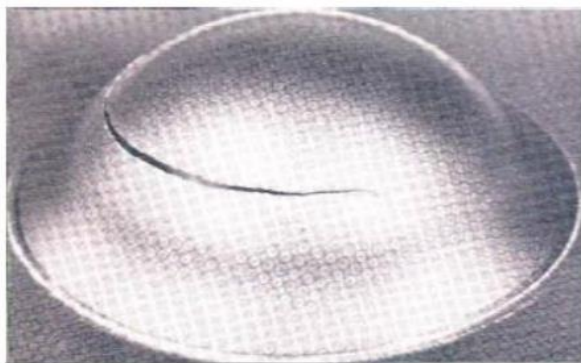
L'emboutissage est dit par **expansion**, car il faut en effet que la tôle s'allonge et s'amincisse pour suivre le poinçon. Au contraire, si le serre-flan n'empêche pas l'écoulement du métal pour alimenter le développement de la pièce [26].

### b) Emboutissage en rétreint

C'est la réduction diamétrale de l'extrémité ouverte d'un corps creux. Le schéma (Figure I.13-b) montre un emboutissage profond avec rétreint du métal glissant sous le serre-flan, l'épaisseur entre serre-flan et matrice peut augmenter [14].



**Figure I.13 :** a) Emboutissage par expansion, b) Emboutissage profond avec rétreint [27].



a) Emboutissage par expansion,



b) Emboutissage profond avec rétreint.

**Figure I.14 :** Exemples des pièces illustrant deux modes de déformation type rencontrés dans les opérations d'emboutissage [27].

**I.3.5. Les avantages et les inconvénients de l'emboutissage****➤ Les avantages de l'emboutissage**

- l'emboutissage produit des formes inaccessibles au tour ou à la fraise.
- La qualité de l'état de la surface d'une pièce d'emboutissage est bien supérieure à celle d'une pièce coulée.
- L'emboutissage produit des pièces d'une beauté optimale.
- L'emboutissage requiert une finition plus légère que celle des autres machines.
- L'emboutissage est financièrement plus intéressant et génère des cadences de fabrication maximale.

**➤ Les inconvénients de l'emboutissage**

- les zones d'étirement subissent un amincissement (qui doit rester limité pour les éviter), et les zones de retournement subissent une combinaison d'épaississement et de plissement.
- Le retour élastique, lorsque le poinçon se retire après la phase de mise en forme, la pièce ainsi formée n'est plus soumise à la force de maintien. Il se produit alors un retrait de la matière. Afin d'atténuer ce phénomène, il est courant de recourir à certains artifices tels que la frappe du rayon, l'étirage en fin de gamme ou le maintien prolongé du poinçon.
- L'entrée de la matrice doit être très arrondie et polie pour éviter toute déchirure du métal.
- Pour obtenir des pièces précises, il est nécessaire d'utiliser des logiciels permettant de simuler le retour élastique de la pièce [28].

**I.4. Démarche de mise au point de l'emboutissage**

La mise au point consiste à déterminer les conditions de formage pour lesquelles la pièce ne comporte aucun défaut marqué en volume : rupture, amincissement local excessif, et d'une manière générale, non-respect des tolérances dimensionnelles, ni en surface : rayures. Les moyens d'action possibles à mettre en œuvre, concernent le choix :

- de la géométrie, l'état de surface et la position du flan,
- de la géométrie et l'état de surface de l'outil (compensation du retour élastique),
- de la presse d'emboutissage (effort de formage),
- du nombre de passes d'emboutissage.
- du lubrifiant (nature, quantité),

- du matériau de la tôle (le plus souvent en vertu d'un critère expérimental de formabilité),
- de la nature de l'outil, etc [29].

## **I.5. Machines utilisées en emboutissage**

### **I.5.1. La presse mécanique**

Une presse mécanique est une machine qui utilise un mécanisme pour faire fonctionner les matrices à la vitesse appropriée, et leur donner l'énergie suffisante pour découper, percer, et obtenir la forme désirée[9]. Les capacités de ces machines peuvent aller de 2 000 à 10 000 kN selon la structure de la machine.

### **I.5.2. La presse hydraulique**

Une presse hydraulique est une machine avec un circuit hydraulique qui fournit une grande force de compression Elle permet de transmettre un effort démultiplié et un déplacement, servant à écraser, déformer un objet ou soulever une pièce lourde. Elles sont idéales pour l'hydroformage qui est une technique de formation des métaux nécessitant la présence d'un agent liquide [9].

## **I.6. Matériaux et formes d'emboutis**

### **I.6.1. Matériaux emboutissables**

Tous les matériaux disponibles en feuilles et présentant une bonne ductilité à froid sont susceptibles d'être transformés par emboutissage [30]. La technique d'emboutissage permet de mettre en forme de nombreux matériaux que ce soit des aciers, des alliages non ferreux ou des pâtes. Néanmoins, la mise en œuvre d'une tôle nécessitera certains réglages ou certaines actions préalables dépendant de la nature même du matériau [22].

Deux grandes familles de matériaux largement utilisés en industrie

#### **a) Les aciers**

Les techniques modernes de laminage permettent d'obtenir des tôles d'acier très minces, avec une surface propre et lisse, une structure homogène et une gamme de caractéristiques mécaniques adaptées aux exigences de l'emboutissage. Ces tôles sont classées en trois catégories : tôle de



fabrication courante (TC), tôle d'emboutissage (E), et tôle d'emboutissage spéciale (ES) (voir le Tableau I.1) [22].

*Tableau I.1.* Caractéristiques des différentes catégories des tôles [22].

	Résistance à la rupture ( $daN/mm^2$ )	Allongement (%)	Dureté Rockwell
TC	42	24	65
E	38	30	57
ES	35	36	50

Les aciers inoxydables se comportent différemment de l'acier doux en raison de la présence de nickel et de chrome. Ainsi les vitesses d'emboutissage doivent être plus lentes que pour l'acier, le métal s'érouissant plus rapidement. Sont peu utilisés en automobile. Leurs applications se limitent essentiellement au domaine de la décoration (baguettes, enjoliveurs de roue ou de pare-chocs) ; la sobriété actuelle des lignes et la concurrence de matériaux de remplacement (plastiques) ne leur laissent qu'un créneau plutôt étroit [22].

#### b) Les alliages non ferreux

- **Le laiton (cuivre + zinc) :** les plus couramment utilisés pour la fabrication des pièces embouties horlogerie et pièces optique, de sidérurgie et de qualité (72% cuivre, 28% de zinc) est employée pour la fabrication de cartouches et de douilles évitant des opérations de recuit.
- **L'aluminium et ses alliages :** ces alliages s'érouissant à l'emboutissage, comme pour nombre de métaux, l'érouissage des alliages d'aluminium augmente sa dureté, sa limite élastique et la charge de rupture mais diminue le A%. L'aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique. Les éléments d'addition sont peu nombreux : cuivre, silicium, magnésium, manganèse, titane et des associations magnésium + silicium, zinc + magnésium, zinc + magnésium + cuivre.
- **Cuivre et ses alliages :** est plus lourd que l'acier (densité 8,9), fond à 1083°C, a une grande résistance à la corrosion et une plasticité ou une ductilité élevée. L'allongement est bon et

permet de réaliser des planches pour emboutissage, du clinquant, des tubes, des pièces moulées. Les plus couramment utilisées (maillachort) sont ceux contenant 60 à 65% de cuivre, 20% de zinc, et 15 à 20 % de nickel.

- **Le zinc** : il s'emboutit facilement mais, dans le cas d'emboutissage de forme complexe, il est nécessaire de le chauffer entre 100° et 150°C.
- **le nickel et ses alliages** : ils possèdent d'excellentes qualités d'emboutissage. Les plus couramment utilisées sont ceux contenant 60 à 65% de cuivre, 20 % de zinc, et 15 à 20 % de nickel.
- **Le magnésium** : c'est le plus léger des métaux utilisés dans l'industrie. A température ambiante le magnésium ne peut être embouti que dans certaines limites. Pour réaliser des pièces semblables à celles obtenues avec l'acier, il est indispensable de chauffer de 200° à 500°C en fonction de la qualité d'emboutis souhaités.
- **Le titane** : ce métal se comporte comme le magnésium : les flans doivent être chauffés entre 200° et 350°C, selon s'il s'agit de titane pure ou d'un alliage. La matrice et le poinçon sont également chauffés pour éviter le choc thermique auquel le métal est sensible [22].

#### **1.6.1.1. Comportement du matériau lors de l'opération d'emboutissage**

Au cours de l'opération d'emboutissage des tôles minces, différents modes des sollicitations peuvent apparaître dans certaines zones de l'embouti, conduisant à la formation d'ondulations que nous désignerons généralement sous le nom plis ou à des amincissements conduisant à la rupture. Pour un matériau donné, ces capacités de déformation peuvent différer fortement d'un mode à l'autre et c'est la raison pour laquelle nous aborderons l'étude de la formabilité des tôles par la définition de ces différents modes :

- Expansion bi axiale ;
- Traction uni axiale ;
- Cisaillement pur ;
- Rétreint ;
- Compression uni axiale [31].

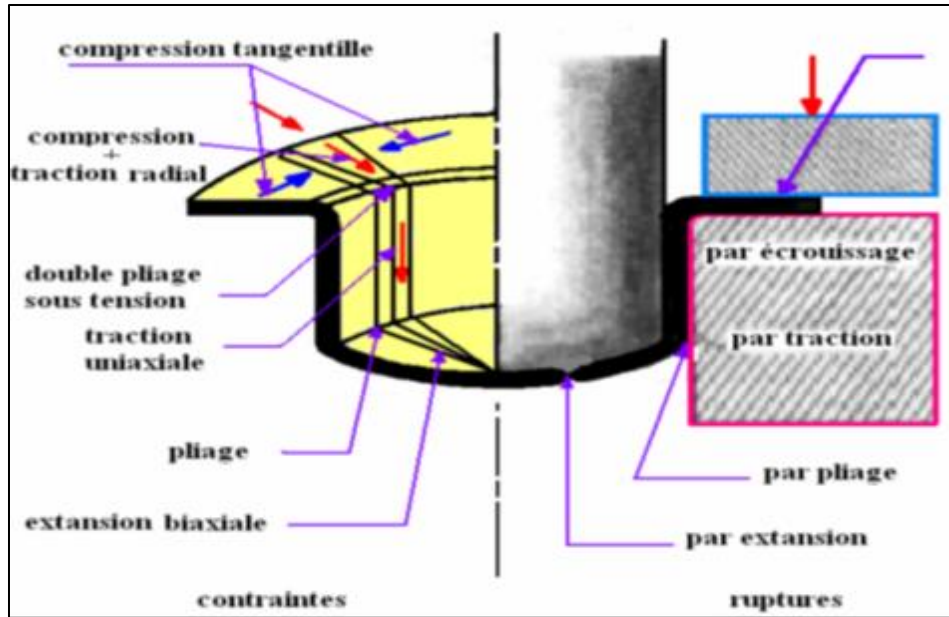


Figure I.15 : Mode de déformation [32].

Dans le cas d'un godet conique (voir Figure I.16), la partie libre de l'embouti située entre la matrice et le poinçon se contracte parce que le rayon  $R$  de l'arc  $ab$  qui se déplace en  $a'b'$  diminue. Il en résulte des contraintes de compression circonférentielles, qui peuvent atteindre des valeurs critiques conduisant à la formation des plis.

Les métaux en feuille sont très sensibles à ces modes de déformation. Ainsi, de ce fait l'art de l'emboutissage consiste à réaliser le meilleur compromis entre ces modes et à optimiser l'écoulement du métal entre le poinçon, la matrice et le serre-flan [15].

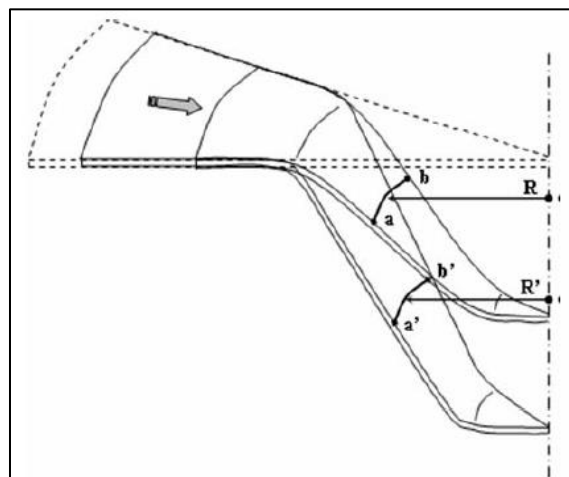
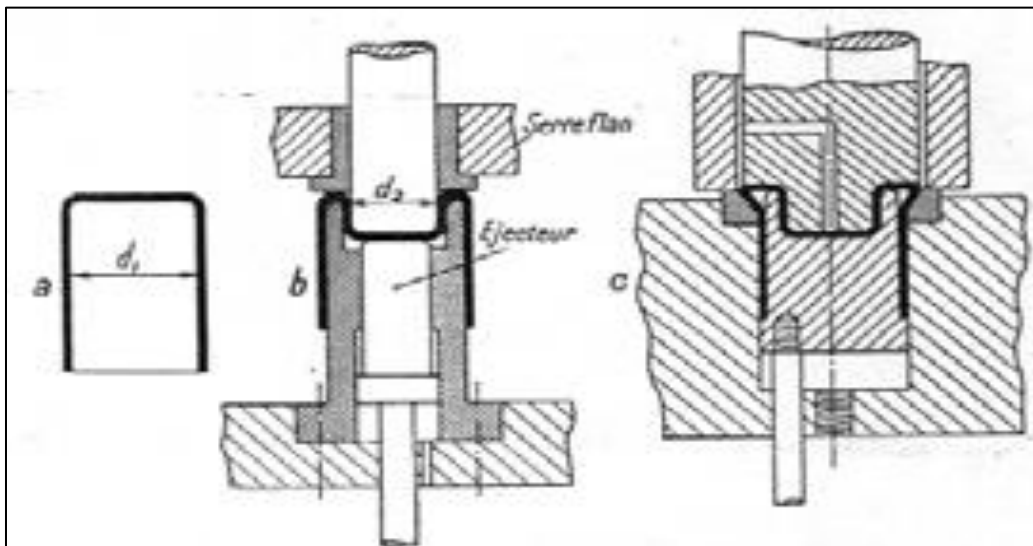


Figure I.16 : Plissement dans la partie libre de l'embouti [14].

## I.6.2. Formes des pièces emboutis

D'une façon générale, les pièces embouties sont de forme simple telle que cylindrique, conique, sphérique ou prismatique. Cependant, ces formes simples sont déjà relativement difficiles à réaliser et ne sont généralement réalisables qu'avec un emboutissage par étapes, c'est à dire un emboutissage où la forme désirée n'est obtenue qu'après un certain nombre de phases successives [18].

**I.6.2.1. Forme cylindrique** : La forme cylindrique est facilement réalisable avec de bonnes conditions opératoires. A partir de cette forme simple il est possible de réaliser des formes plus évoluées avec la méthode d'emboutissage dit renverser [14].



*Figure I.17* : Emboutissage renversé [14].

**I.6.2.2. Forme conique** : La forme conique ne peut être obtenue qu'après au moins 4 passes. Cette technique permet d'obtenir des formes qu'il aurait été impossible à former en une seule passe. [20].

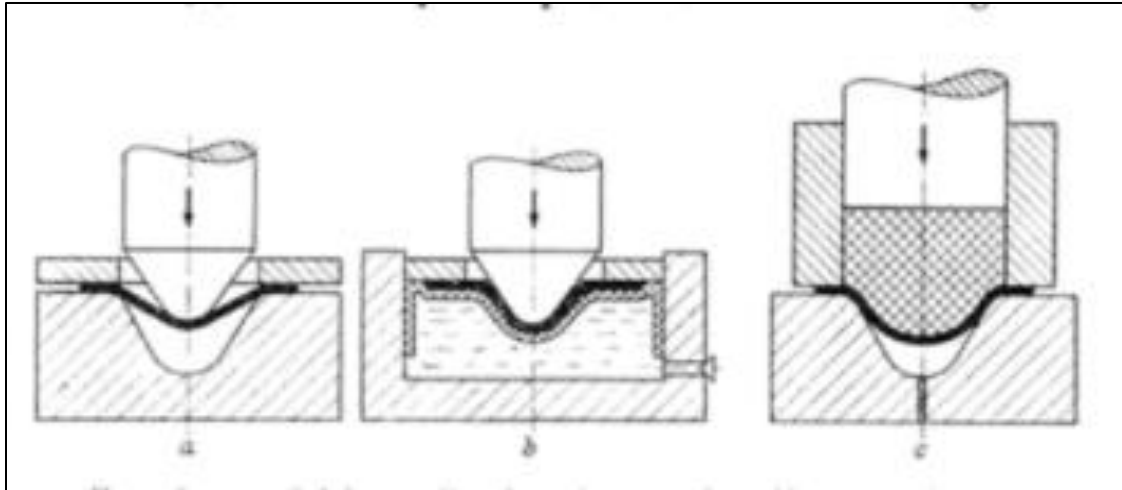


Figure 1.18 : Emboutissage des pièces conique [14].

**I.6.2.3. Forme demi-sphérique :** L'emboutissage d'une demi-sphère est difficile en raison de la formation de plis, mais il est possible en une seule passe si la matrice est munie d'un bourrelet. [33].

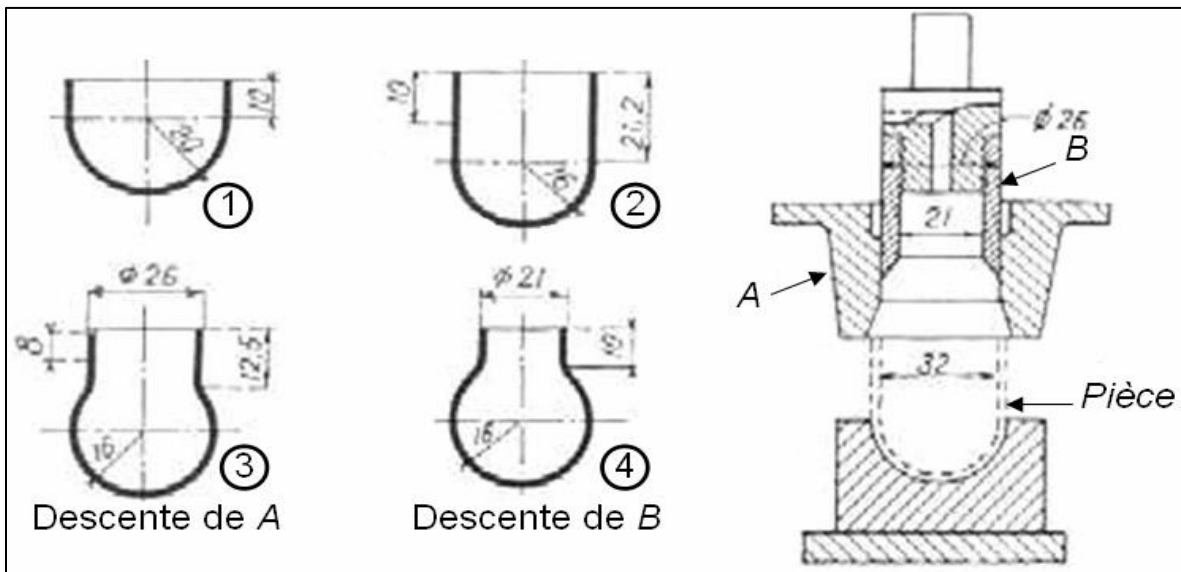


Figure 1.19 : Emboutissage de pièce demi sphérique [33].

**I.6.2.4. Forme rectangulaire :** Dans les emboutis rectangulaires on peut considérer que seuls les rayons latéraux sont emboutis (quart d'embouti cylindrique), les flancs étant simplement cambrés [14].

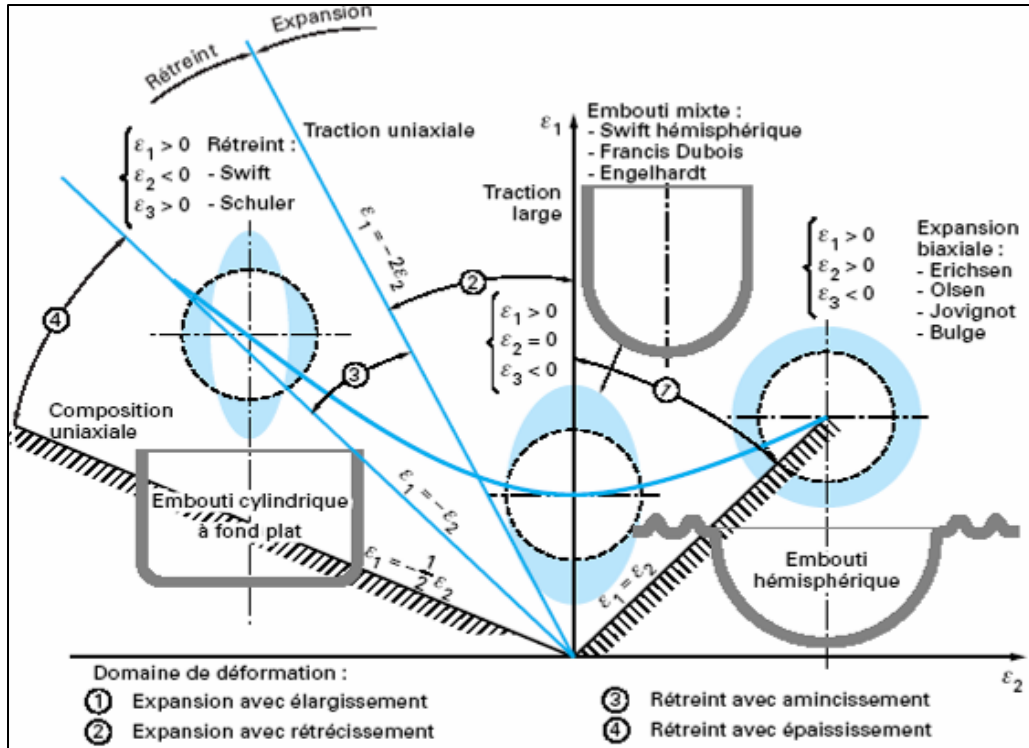
Les emboutis rectangulaires sont des pièces simples de forme, mais délicates de réalisation, surtout lorsque leur profondeur est assez forte et les arêtes assez vives, La pièce à emboutir est représentée à la figure I.20.



**Figure I.20 :** Emboutis rectangulaires [14].

## I.7. Essais d'emboutissage

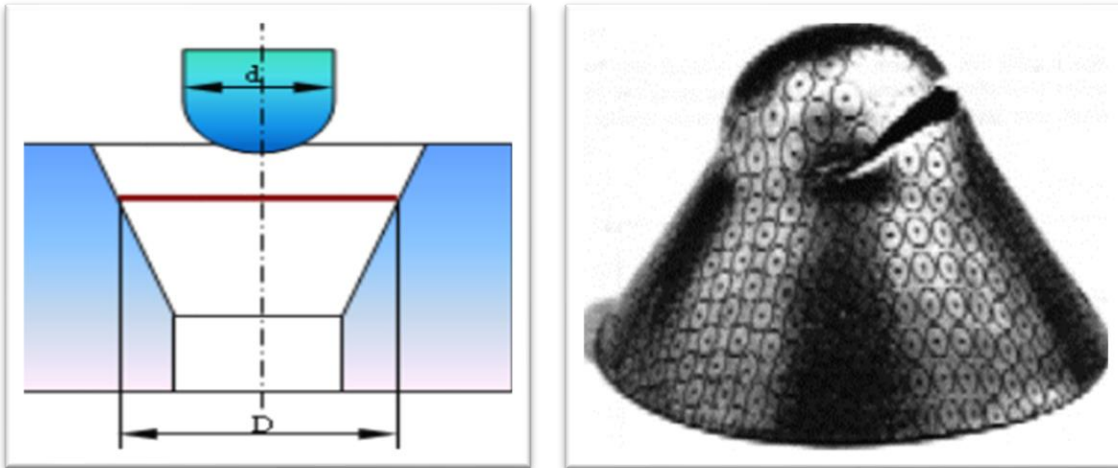
De nombreux essais spécifiques ont été imaginés et utilisés pour juger l'aptitude d'une tôle à subir l'opération d'emboutissage. Nous les avons classés selon le mode de déformation prédominant. La Figure I.21, représente les principaux modes de déformations tels qu'ils apparaissent sur des emboutis servant à des essais de caractérisation (essais Swift, Erichsen, etc.) [31]. Les cercles sur le graphe montre l'état des déformations de la matière, c'est à dire on dessine sur la tôle initiale des petits cercles puis on fait l'emboutissage et après formage on regarde la forme du cercle, il devient ellipse où l'axe  $Y$  (vertical) de l'ellipse est  $\epsilon_1$  et l'axe  $X$  (horizontal) est  $\epsilon_2$  [34].



**Figure I.21 :** Principaux modes de déformation en emboutissage illustrés par des emboutis servant à des essais de caractérisation [33].

Donc on peut classer les essais d'emboutissage selon le mode de déformation prédominant [35] :

- 1. Les essais de rétreint :** le flan est maintenu dans un serre-flan destiné à s'opposer à la formation des plis. Un exemple en est l'essai de coupelles cylindriques à fond plat [36].
- 2. Les essais d'expansion :** le flan est bloqué sur la matrice. Un exemple en est l'essai de gonflement par pression hydraulique sur une matrice circulaire (essai Jovignot ou, bulge test) [36].
- 3. Les essais mixtes** qui font intervenir, à des degrés divers, les différents modes de déformation. Ces essais sont très nombreux, citons par exemple, l'essai de coupelle conique [36], sans serre-flan, à fond plat, ou hémisphérique (Fukui) (voir Figure I.22) [33].



**Figure I.22** : Essai Fukui et rupture caractéristique [18].

### I.8. Intérêts et débouchés

L'emboutissage sous presse présente de nombreux intérêts tant par son aspect économique que qualitatif : Cette technique de mise en œuvre offre un bas prix de revient et permet des Cadences de production très élevées : 100 à 200 pièces par heure pour des pièces de gros volumes (carrosserie automobile) et jusque 3000 à 4000 pièces par heure pour des petites pièces (renfort, capuchon de réservoir) [37].

L'écrouissage résultant des déformations imposées par la tôle donne des caractéristiques supérieures à celle du flan. Ces fortes caractéristiques permettent un allègement des pièces. La qualité de l'état surface d'une pièce brute d'emboutissage est nettement supérieure à celle des pièces coulées. L'esthétique des pièces embouties en est donc bien supérieure et les travaux de finition tel que le polissage sont moins lourds à gérer et surtout moins coûteux. Les débouchés de cette technique de mise en forme sont donc extrêmement larges. Nous noterons notamment la présence de l'emboutissage dans les domaines :

Des transports : que ce soit dans le domaine de l'automobile, des transports routiers ou des deux roues, l'emboutissage intervient pour de très nombreuses pièces extérieures (carrosserie) et intérieures (renforts).

✓ De l'électroménager : radiateurs, machines à laver, ballon d'eau chaude, ...



- ✓ Du sanitaire : lavabos métalliques, bacs de couches, ...
- ✓ De l'emballage : boîtes de boisson, conserves, ...
- ✓ Des pièces mécaniques : des biens de consommation courante, ... [33]

### **I.9. Conclusion de chapitre I**

Dans ce chapitre, après avoir défini le procédé d'emboutissage et montré l'importance de ce procédé parmi les autres procédés de mise en forme, nous avons mis en clair tout ce qui concerne le procédé d'emboutissage industriel. D'abord, une description des modes du procédé, des matériaux emboutissables, du comportement du matériau lors de l'opération d'emboutissage. Ensuite, nous avons montré les différentes formes des pièces embouties, a été faite, et les différents essais du procédé.

**CHAPITRE II:  
PARAMETRES  
D'EMBOUITISSAGE**

**II.1. Introduction de chapitre II**

Dans ce chapitre on tente, En premier temps de montrer les différentes caractéristiques du procédé telles que: les modes de déformation lors de l'opération du procédé et leur mesure, Ensuite nous présenterons une description de l'aspect opératoire d'où il s'agit des paramètres liés à la presse et à la géométrie de la tôle et des paramètres liés à la tôle. Comme nous parlerons aussi sur les principaux paramètres et influençant du procédé d'emboutissage, Finalement, une présentation succincte sur les défauts d'emboutissage tel que la rupture, le plissement, et le retour élastique.

**II.2. Caractérisation en emboutissage**

L'aptitude à l'emboutissage d'un matériau peut s'apprécier par certaines caractéristiques à partir d'essais de traction et de formabilité. La connaissance de celles-ci permet de concevoir ou d'améliorer les gammes, de choisir la matière la mieux adaptée à la pièce à réaliser, d'assurer un meilleur suivi de matière, de réduire le nombre de non-conformités, d'obtenir de nouvelles productions, de réduire les coûts de production et de maintenance de l'outil [38].

Dans les buts de réussir au plus vite un nouvel embouti, de réduire le temps entre deux séries et donc de caractériser l'emboutissage, le recours à des machines de traction est souvent nécessaire. Cette machine permet de reproduire de petits emboutis sans demander un outillage perfectionné.

Afin de permettre cette caractérisation, deux approches sont possibles mais surtout complémentaires.

D'une part, un aspect que l'on peut qualifié de métallurgique et qui correspond aux relations entre les propriétés du métal et ses performances. D'autre part, un aspect opératoire ayant pour objectif de préciser l'influence des différents paramètres de la presse sur la réussite de la pièce. Néanmoins, il est important de préciser que l'étude de ces deux aspects nécessite une analyse préalable des déformations subies par le flan. Ce type de mesures s'effectue à l'aide d'une grille gravée sur la face externe de la future pièce [18].

**II.2.1. Caractérisation de la déformation en emboutissage**

Le métal en emboutissage se doit de posséder :

1. Une résistance maximale à la traction très élevée pour résister à la traction uni-axiale

2. Une limite d'élastique faible (car dans le domaine plastique, les contraintes exercées, tout en étant les plus faibles possibles pour éviter les ruptures, doivent tout de même être supérieures à la limite d'élasticité),
3. Des allongements importants
4. Une faible résistance à la compression tangentielle sous le serre flan (bonne aptitude au rétreint).

- La résistance du matériau peut être appréhendée par :

- La limite d'élasticité
- La résistance maximale à la traction
- L'allongement à la rupture.

- Ces trois grandeurs peuvent être obtenues lors de l'essai de traction d'une éprouvette (courbe d'écroutissage).

- Limite d'élasticité :  $R_e$

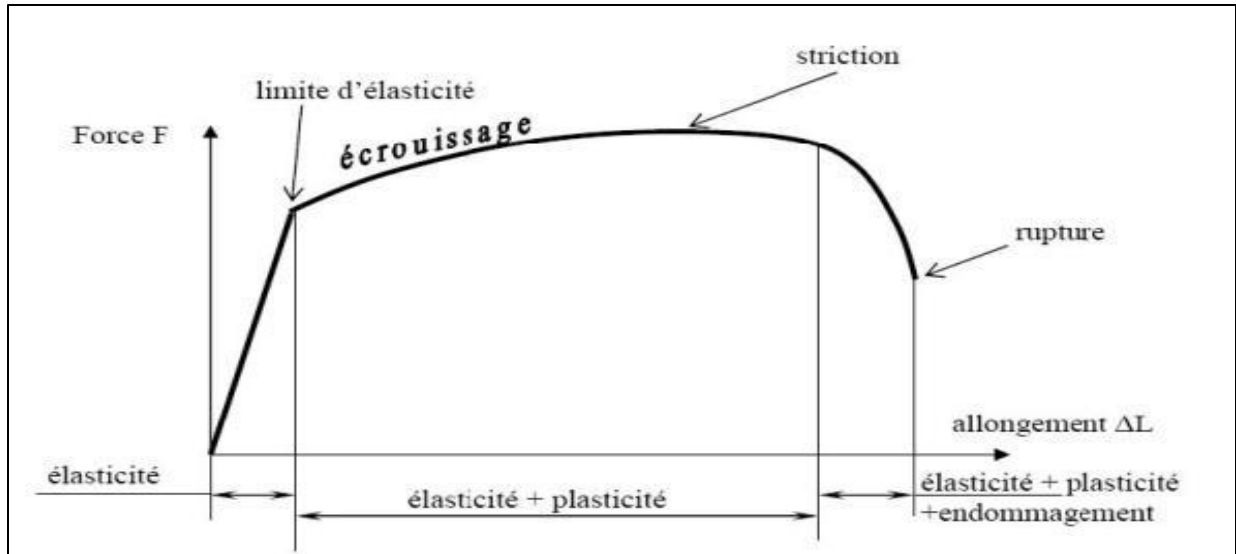
Point A : C'est la charge qui délimite le domaine élastique, où les déformations sont réversibles, du domaine plastique.

- Résistance maximale à la traction :  $R_m$

Point B : C'est la charge maximale enregistrée pendant l'essai de traction.

- Allongement à la rupture : A%

Point C : C'est l'allongement maximum enregistré pendant l'essai de traction [39].



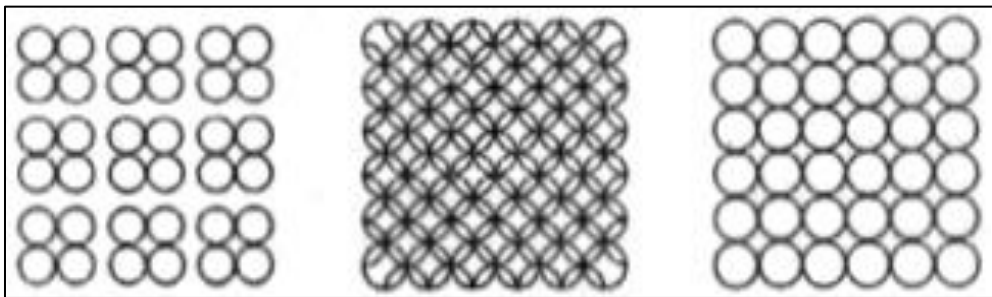
**Figure II.1** : variation de la force en fonction de l'allongement [39].

### II.2.1.1. Mesure de déformations en emboutissage

On détermine les déformations sur les emboutis en mesurant l'allongement  $\Delta l$  d'une base de mesure  $L_0$ . Pour pouvoir mesurer la déformation dans deux directions, on utilise une grille. Généralement, cette grille a une maille circulaire, ce qui permet facilement de connaître les directions principales des déformations [36].

Dans cette optique, il est commun de s'aider d'une petite grille tracée sur le flan. Cette grille est généralement formée de petits cercles et de carrés tendant à se déformer lors de l'emboutissage. Plusieurs procédés sont employés pour effectuer ce tracé, tel que :

- tracé à la pointe sèche.
- tracé à l'encre, à l'aide d'un tampon [32].



**Figure II.2** : Différentes nature de grille de déformation [33].

Il existe deux façons d'exprimer les résultats de mesure :

- **en atelier**, on utilisera tout simplement les déformations conventionnelles qu'on symbolise par  $e$ , en pour-cent, pour rester accessible au plus grand nombre ;
- **en laboratoire**, l'habitude est en revanche d'utiliser les déformations rationnelles :

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (\text{II.1})$$

Avec

$l_0$  : Longueur initiale de la base de mesure,

$l$  : Longueur finale [31].

### II.2.1.2. Principe et analyse des déformations

L'état des déformations d'un élément de flan est correctement décrit à partir des déformations dans trois directions principales :

- dans le sens de la longueur (généralement la direction de laminage) :

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

- dans le sens de la largeur (généralement la direction perpendiculaire) :

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{b}{b_0}\right) \quad (\text{II.2})$$

- dans le sens de l'épaisseur :

$$\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (\text{II.3})$$

Avec  $l_0, b_0, h_0$  longueur, largeur et épaisseur initiales, respectivement,  $L, b, h$  longueur, Largeur et épaisseur finales de l'élément, respectivement

La conservation du volume pendant la déformation permet d'écrire [6] :

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (\text{II.4})$$

### II.2.1.3. Courbes limite de formage

La courbe qui forme la frontière inférieure du secteur C'est la courbe limite de formage. La courbe décrit le niveau de la contrainte pour laquelle le matériau réel peut résister l'échec, le fendage ou le

ridage se produit. Après un principe de base l'expérience assure que le composant ne cassera pas si le niveau de contrainte ne devrait pas excéder 80% du niveau de la courbe limite de formage [6].

Lors de l'emboutissage, les éléments de tôle subissent une déformation que l'on peut matérialiser à l'aide d'un réseau de cercles tracés au préalable sur le flan; les dimensions des ellipses résultantes permettent d'estimer les déformations dans le plan de la tôle  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  ( $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ ) dont on peut déduire, du fait de l'incompressibilité du matériau (pas de variation de volume), la déformation à travers l'épaisseur associée vaut  $\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$  ;

On détermine les valeurs des déformations des zones de rupture qui, reportées sur un diagramme ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ), se situent au voisinage d'une courbe assez peu dépendante de la nature de la tôle ;

Notant que le point de cette courbe le plus proche de l'origine correspond à la déformation plane ( $\varepsilon_2 = 0$ ), Les déformations atteintes dans les zones d'apparition de la striction (précédant la localisation de la déformation et la rupture) se situent au voisinage d'une courbe plus ou moins proche de la courbe de rupture selon la nature du matériau (écrouissage coefficient n et anisotropie coefficient r) [39].

Les différents secteurs dans le diagramme (figure II.3) sont :

- A. Des capacités de formage du matériau.
- B. Danger de la rupture.
- C. Le matériau a fendu.
- D. Amincir grave.
- E. Risque du retour élastique.
- F. Tendance au ridage.
- G. Rides entièrement développées [6].

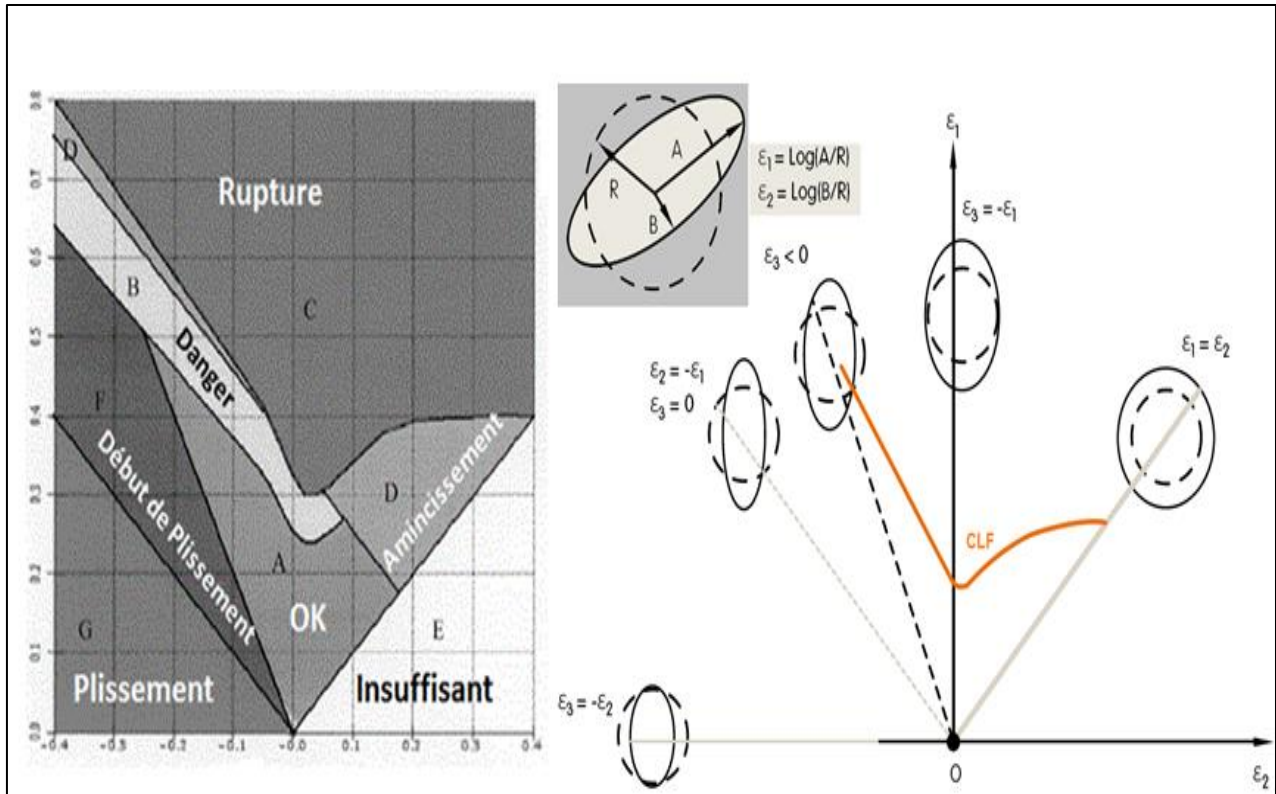


Figure II.3 : Courbe limite de formage pour différents domaines [39].

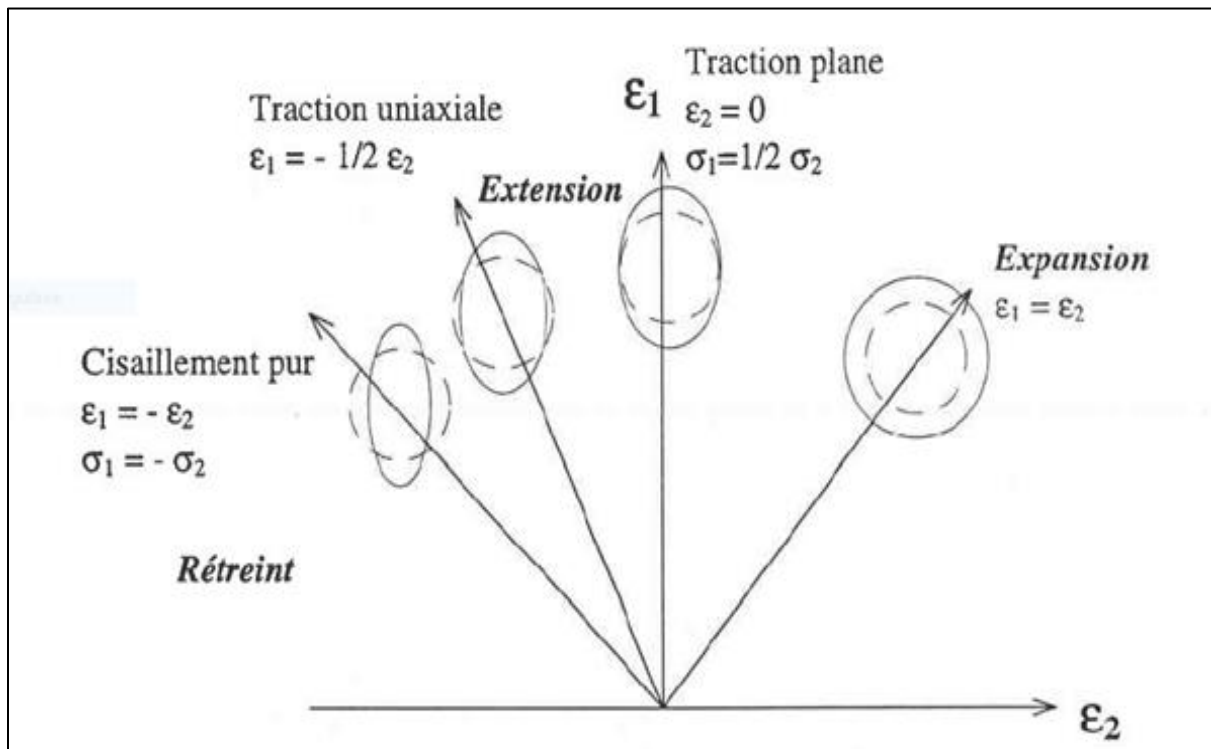
#### II.2.1.4. Les modes de déformation en emboutissage

L'étude des déformations à l'aide de ces grilles a permis de mettre en évidence les différents modes de déformations existant lors d'un emboutissage.

La Figure II.4 représente différents trajets de déformation linéaires, ainsi que les différentes Zones caractérisant le mode de déformations subi par la tôle. Cette représentation est effectuée dans les axes des déformations principales dans le plan de la tôle.

Sur le diagramme apparaissent les différentes déformations possibles sur un embouti, qui peuvent être visualisées par les modifications d'un réseau de cercles ou de carrés préalablement déposés sur le flan avant l'emboutissage Les différents chemins ou types de déformation rencontrés [40].sont définis par :





**Figure II.4 :** Schématisation de différents tests de déformation dans le plan des déformations Principales de surface de la tôle [40].

- ❖ **l'expansion bi-axiale :** cela correspond à ce qui se passe au nez du poinçon au début du formage ; elle est d'autant plus importante que le métal est bloqué sous le serre-flan ;
- ❖ **la traction plane:** cela correspond aux déformations dans les parois verticales de l'embouti, qui sont générées par la tension dans la tôle pour entraîner la matière sous serre-flan ou pour marquer une forme en fin de formage lorsque la matière ne peut plus beaucoup glisser dans l'outil [40] , Au centre,  $\varepsilon_2 = 0$  (pas de variation de largeur), c'est la traction plane. On a donc ;  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$  [31].
- ❖ **l'extension:** ce type de déformation est associé à des déformations circonférentielles négatives bien que la contrainte correspondante soit positive ;
- ❖ **la traction uni axiale :** cela correspond à ce qui se passe sur une éprouvette de traction;

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2(r + 1)/r \quad (\text{II.5})$$

Où ; r est le coefficient d'anisotropie, Pour un matériau isotrope,  $r=1$ , d'où  $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$  [15].

- ❖ **le cisaillement:** Ce type de sollicitation serait obtenu dans la zone sous serre-flan si la pression était suffisante pour empêcher tout épaissement de la tôle ;
- ❖ **le rétreint :** ce type de chargement est observé dans les zones de l'embouti subissant un avalement; il s'accompagne d'un épaissement de la tôle [40].

Le tableau 1 précise tous les états de déformation qui peuvent se rencontrer sur une pièce [31].

Tableau II. 1 : modes de déformation d'emboutissage [31].

Mode	Déformations	Contraintes
Expansion biaxiale	$\epsilon_1 > 0 \quad \epsilon_2 > 0 \quad \epsilon_3 < 0$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 > 0 \quad \sigma_3 = 0$
Expansion symétrique	$\epsilon_1 + \epsilon_2 = -\epsilon_3 \begin{cases} \epsilon_1 = \epsilon_2 = -\epsilon_3 / 2 \\ \epsilon_1 \neq \epsilon_2 \neq -\epsilon_3 / 2 \end{cases}$	$\sigma_1 = \sigma_2$ $\sigma_1 \neq \sigma_2$
Déformation plane	$\epsilon_1 > 0 \quad \epsilon_2 = 0 \quad \epsilon_3 < 0$ $\epsilon_1 = -\epsilon_3$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 > 0 \quad \sigma_3 = 0$ $\sigma_2 = \sigma_1 / 2$
Traction uniaxiale	$\epsilon_1 > 0 \quad \epsilon_2 < 0 \quad \epsilon_3 < 0$ $\epsilon_2 + \epsilon_3 = -\epsilon_1 \begin{cases} \epsilon_2 = \epsilon_3 = -\epsilon_1 / 2 & - \text{Isotropie} \\ \epsilon_2 = r\epsilon_3 = -r\epsilon_1 / (1+r) & - \text{Anisotropie} \end{cases}$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 = 0 \quad \sigma_3 = 0$
Cisaillement pur	$\epsilon_1 > 0 \quad \epsilon_2 < 0 \quad \epsilon_3 = 0$ $\epsilon_2 = -\epsilon_1$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 < 0 \quad \sigma_3 = 0$ $\sigma_1 = -\sigma_2$
Rétreint	$\epsilon_1 > 0 \quad \epsilon_2 < 0 \quad \epsilon_3 > 0$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 < 0 \quad \sigma_3 = 0$
Compression uniaxiale	$\epsilon_3 + \epsilon_1 = -\epsilon_2 \begin{cases} \epsilon_1 \neq \epsilon_3 \neq -\epsilon_2 / 2 \\ \epsilon_1 = \epsilon_3 = -\epsilon_2 / 2 \end{cases}$	$\sigma_1 > \sigma_3$ $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$

### II.3. Principaux paramètres du procédé d'emboutissage

Le comportement du flan au cours du procédé d'emboutissage est complexe et dépend de nombreux paramètres tels que :

- les propriétés mécaniques du matériau à mettre en forme ;

- la géométrie du flan ;
- les propriétés tribologiques de l'interface outil–flan ;
- les efforts de serrage et d'emboutissage ;
- la géométrie des outils ;
- la vitesse des outils ;
- la température de mise en forme ;

Pour réduire le nombre des pièces défectueuses et pour faciliter la mise au point des outils, il s'avère nécessaire d'arriver à une meilleure compréhension de l'influence de différents paramètres du procédé sur la qualité de la pièce. Ainsi, la maîtrise et l'optimisation de certains paramètres opératoires du procédé permettent d'améliorer la formabilité du matériau et la robustesse du procédé.

En effet, la réussite de l'opération d'emboutissage repose généralement sur un minutieux travail de mise au point.

L'utilisation de la simulation numérique couplée avec des algorithmes d'optimisation permet une mise au point automatique et virtuelle. Parmi les paramètres les plus pertinents à contrôler [33], on peut citer :

### **II.3.1. Forme du flan initial**

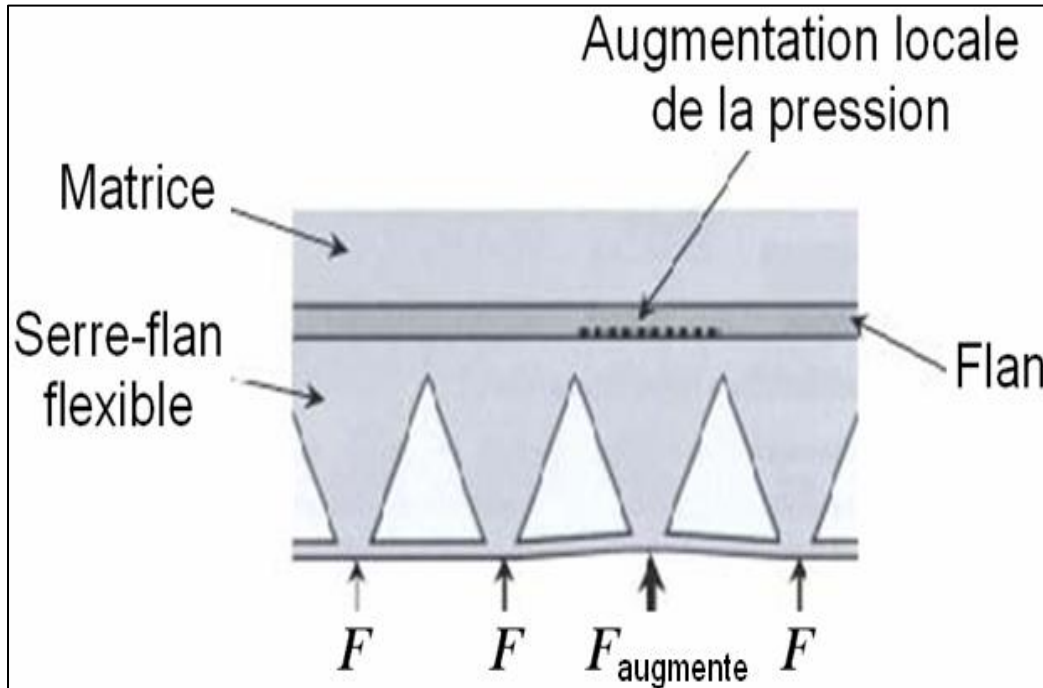
Plusieurs concepteurs ont proposé d'optimiser la géométrie du flan initial. Les variables de conception sont alors les points de contrôle d'une B-spline cubique uniforme. Différentes fonctions Objectifs sont testées. Elles utilisent les variations d'épaisseur pour contrôler les risques de trop fort amincissement, qui précède la rupture de la tôle et les risques d'épaississement, qui traduit une tendance à la formation de plis [41].

### **II.3.2. Effort de serrage**

Les développements actuels et les futures recherches de la technologie d'emboutissage ont comme objectif principal l'amélioration de la fiabilité du procédé. En conséquence, beaucoup d'efforts ont été faits pour mieux adapter les presses mécaniques aux besoins des formages compliqués surtout pour les opérations d'emboutissage profond les plus délicates.

Le développement le plus significatif est la segmentation élastique du serre-flan (Figure II.5). Ce type de serre-flan a été utilisé dernièrement dans de nombreux travaux de recherche. Sous l'effet des efforts exercés par des vérins hydrauliques et grâce à son comportement élastique, une

augmentation de la pression dans un vérin engendrera une augmentation locale de l'effort de serrage, qui ralentit localement l'écoulement de la matière [22].



**Figure II.5** : Principe de la segmentation élastique du serre-flan [22].

La détermination de la force de serrage (ou pression de serrage) optimale pour des emboutis de formes simples ou complexes a fait l'objet de nombreux travaux. Descamps, Chamont et Kergen ont étudié et analysé la formabilité des deux matériaux en utilisant un serre-flan conventionnel et un serre-flan flexible. Ils ont combiné différents profils de serrage pour le serre-flan flexible :

- Force constante (pression uniforme et constante) ;
- Profil global de la force de serrage ;
- Profil local de la force de serrage (par zone).

A travers cette étude ils ont montré qu'avec un serre-flan flexible et en ajustant localement la force de serrage on peut atteindre des profondeurs de plus en plus élevées même pour des matériaux très résistants [22].

### II.3.3. Force de retenue de jonc

Un jonc est une chicane située dans la partie sous serre-flan sur la trajectoire de la tôle et qui va plus ou moins empêcher le mouvement de la tôle suivant sa géométrie (Figure II.6).

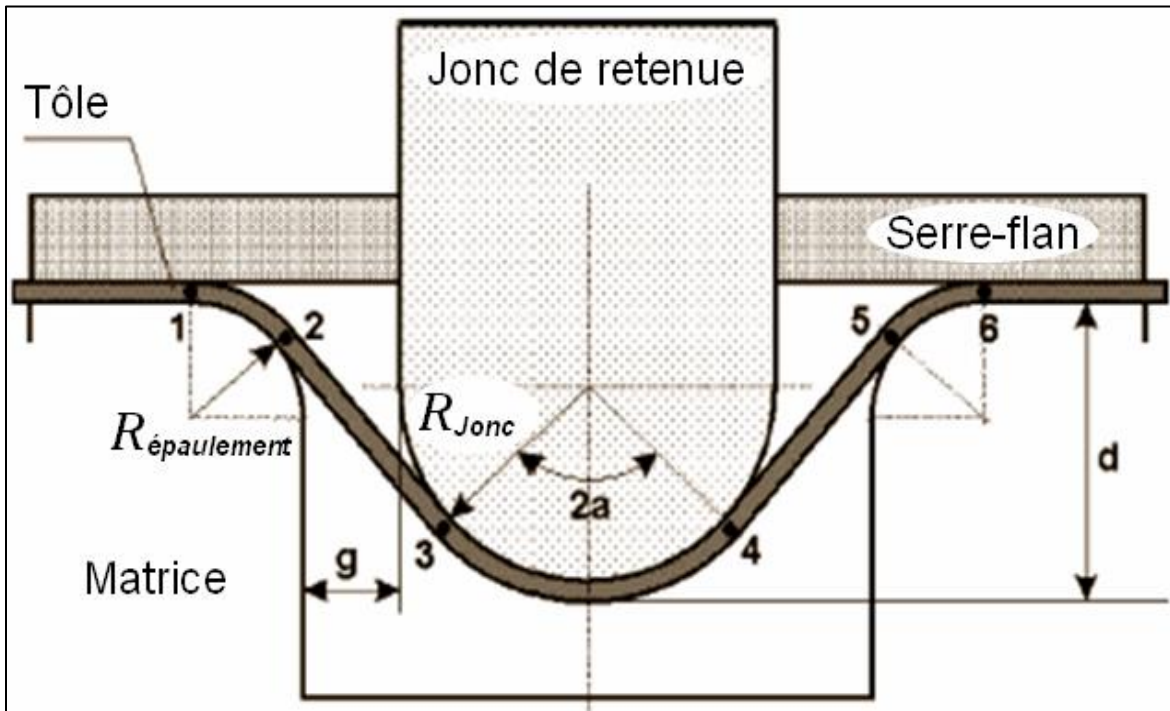


Figure II.6 : Géométrie d'un jonc de serrage [41].

La géométrie du jonc n'est pas du même ordre de grandeur que les dimensions de la pièce à emboutir [41].

### II.3.4. la température de mise en forme

Une petite variation de la température nous permet de garder les propriétés de matériau indépendant d'elle. Le comportement des tôles métalliques dans la mise en forme est souvent affecté par la température, La résistance des métaux diminue quand ils sont chauffés [32].

**II.4. Aspects opératoires**

Lors de l'emboutissage d'une pièce, que ce soit en laboratoire ou en industrie, plusieurs paramètres permettent d'aboutir à un embouti de bonne qualité. Ces réglages doivent tenir compte de la nature de la tôle, ainsi que de la forme souhaitée.

Une presse, ou une machine de traction ayant pour objectif la réalisation d'emboutis, sont composées d'une matrice, d'un poinçon et d'un serre flan. Cet outillage offre déjà plusieurs possibilités de réglages:

- ✓ Le jeu entre le poinçon et la matrice ;
- ✓ Le rayon sur la matrice ;
- ✓ le rayon sur le poinçon ;
- ✓ la vitesse d'emboutissage ;
- ✓ La pression du serre-flan ;
- ✓ l'effort d'emboutissage.

A ces paramètres, il faut ajouter la lubrification, la taille optimale de la tôle ainsi que son épaisseur [33].

**II.4.1 Paramètres liés à la presse et à la géométrie de la tôle****II.4.1.1 Le jeu entre le poinçon et la matrice**

Lorsque l'espace entre le poinçon et la matrice est théoriquement égal à l'épaisseur de la tôle, il se produit une augmentation de l'épaisseur de la paroi. L'augmentation de ce jeu a une influence favorable sous l'effet du poinçon mais entraîne certains inconvénients tels que :

- La détérioration du profil de la paroi.
- Déviation du poinçon entraînant la formation de languettes sur le bord de l'embouti.
- Apparition de plis sur la paroi de l'embouti.

Inversement, si l'épaisseur du flan est plus grande que l'espace existant entre le poinçon et la matrice, il se produit un écrasement et un amincissement indésirables de la paroi. Il est courant d'utiliser des tables donnant le jeu en fonction de l'épaisseur du flan  $h$ . Elles sont basées sur les formules suivantes [31].

$$j = e_m + \Delta e_0 \quad (\text{II.6})$$

$e_m$  : Épaisseur maximale de la tôle.

$e_0$  : Épaississement engendré par le retrait.

— Pour l'acier :

$$Jeu = h + 0.07 + (10h)^{1/2} \quad (\text{II.7})$$

— Pour l'aluminium :

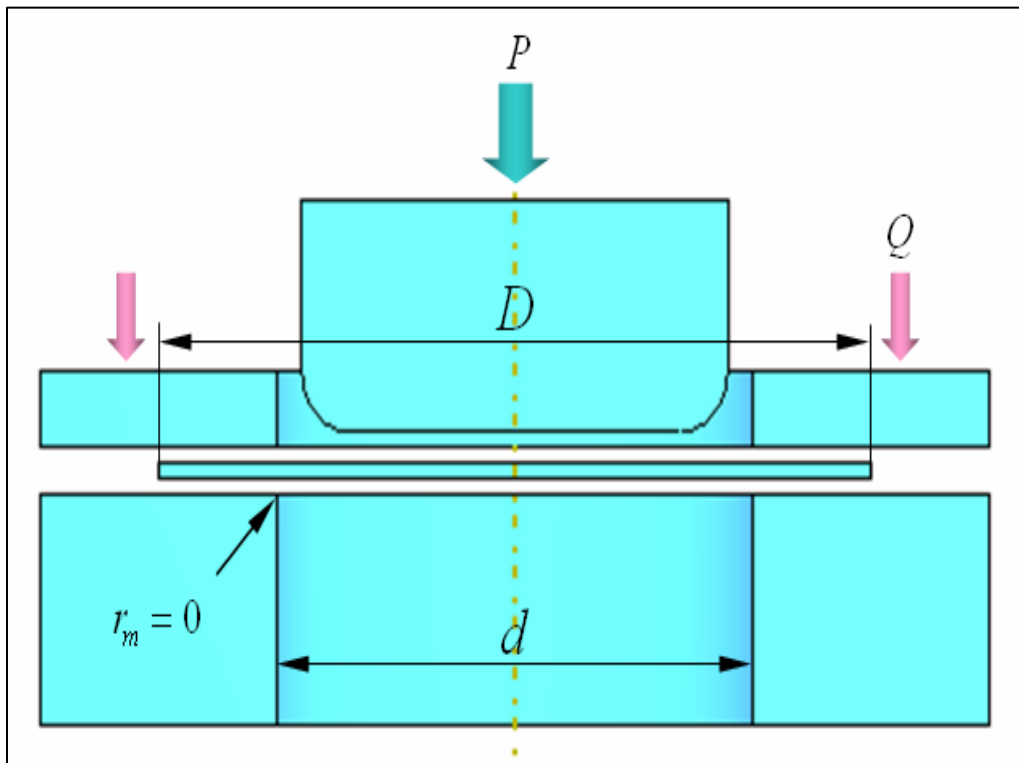
$$Jeu = h + 0.02 + (10h)^{1/2} \quad (\text{II.8})$$

— Pour métaux non ferreux :

$$Jeu = h + 0.04 + (10h)^{1/2} \text{ [6].} \quad (\text{II.9})$$

#### II.4.1.2 Le rayon sur la matrice

Ce paramètre a une très grande importance autant pour la qualité de l'embouti que pour la répartition des forces. En effet, on comprend parfaitement que dans les deux cas extrêmes (Figure II.7), l'emboutissage n'est pas viable. On observera pour  $r_m = 0$  un déchirement du flan et pour  $r_m = (D - d)/2$  La formation de plis.



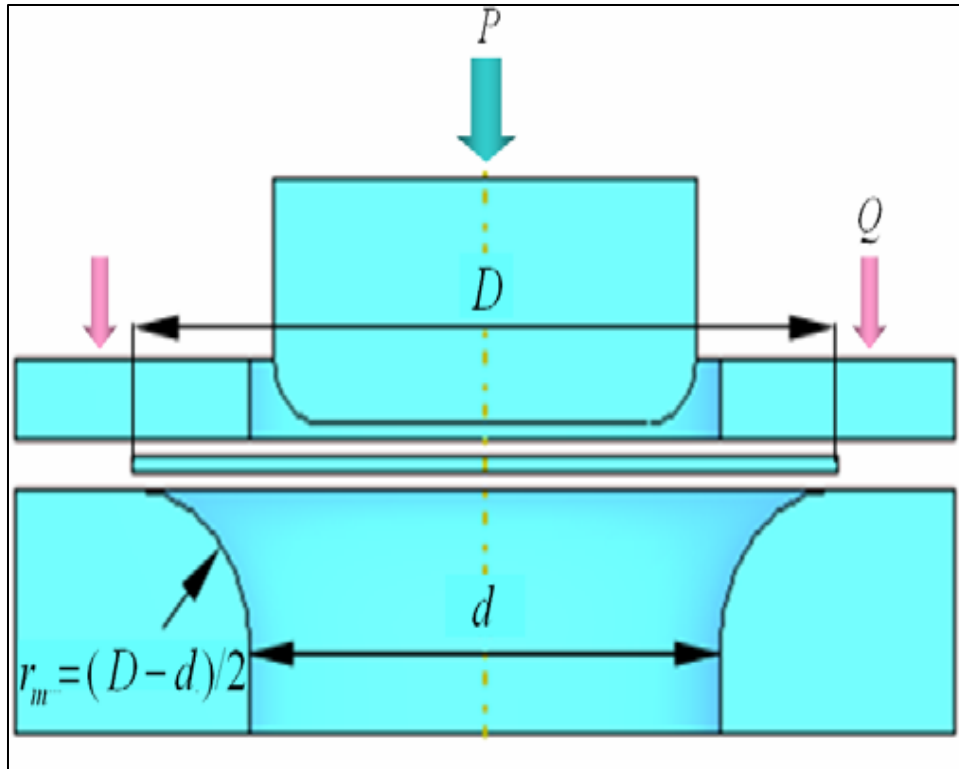


Figure II.7 : Variation de l'arrondi sur la matrice [42].

Afin de déterminer le rayon efficace, on utilise la relation de Kaczmarek donnant [42] :

— Pour l'acier :

$$r_m = 0.8[(D - d)e]^{1/2} \quad (\text{II.10})$$

— Pour l'aluminium :

$$r_m = 0.9[(D - d)e]^{1/2} \quad (\text{II.11})$$

$D$  : diamètre du flan (mm),  $d$  : diamètre de l'embouti (mm) et  $e$  : épaisseur du flan (mm).

#### II.4.1.3 Rayon du poinçon ( $r_p$ )

Le rayon du poinçon  $r_p$  ne doit pas être trop faible pour éviter le décalage du fond de la pièce (amincissement local de la tôle traduisant une déformation locale en expansion) ni trop important pour éviter les risques de plis ; en principe il ne doit pas être inférieur au rayon de la matrice.



Dans le cas où la pièce exigerait un faible rayon, il faut prévoir une opération supplémentaire de conformation.

La partie de la tôle qui se trouve en contact avec le rayon trop faible de poinçon subie une diminution d'épaisseur (1), après emboutissage, le défaut se retrouve sur la surface latérale de l'embouti (2) [9].

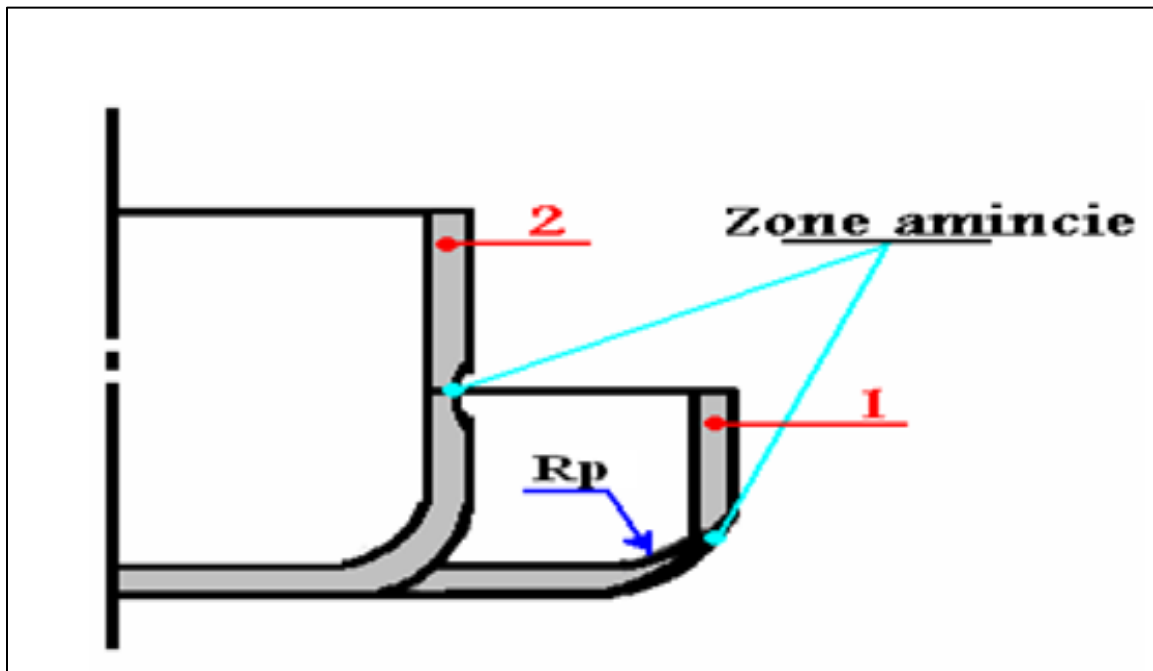


Figure II.8 : Le rayon sur le poinçon [9].

## II.4.2 Paramètres liés à la tôle

### II.4.2.1 La taille du flan :

Il est important de déterminer la taille du flan primitif pour d'une part économiser la matière et d'autre part faciliter l'emboutissage. La détermination des dimensions du flan a pour base l'égalité des volumes de l'embouti et du flan primitif

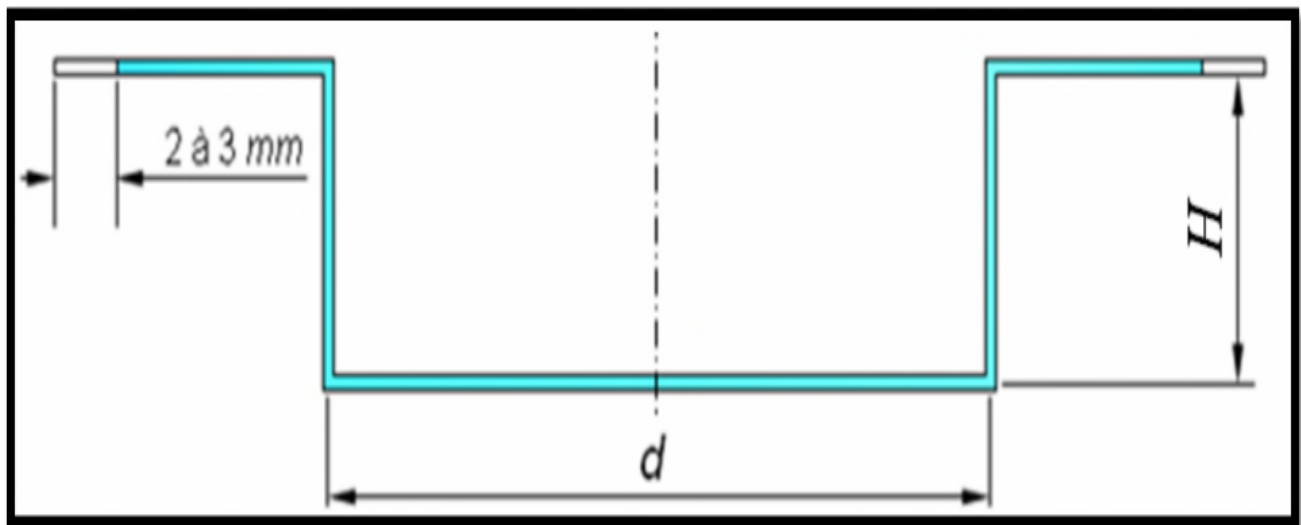
- **Flan pratique:** Il ne se peut déterminer qu'à la suite d'essais sur des outils d'emboutissage réalisés. L'outil de découpage du flan n'est exécuté qu'après ces essais.

- **Flan théorique** : D'après le dessin de l'embouti désiré et en ajoutant de 2 à 3 mm autour du flan pour détournage (voir Figure II.9), on détermine le diamètre du flan donné par:

$$D2 = 4S/\pi \quad (\text{II.12})$$

Où  $S$  est la surface de l'embouti, calculée par le théorème de Guldin.

La surface engendrée par une ligne plane tournante autour d'un axe situé dans son plan et ne le traversant pas est égale au produit de la longueur développée de cette ligne par la circonférence décrite par son centre de gravité [18].



**Figure II.9.** Ajout de 2 à 3 mm pour détournage [18].

## II.4.2. paramètre mécaniques

### II.4.2.1 Vitesse d'emboutissage

Elle se définit comme la vitesse du poinçon au moment de l'attaque de la tôle. Une vitesse trop faible, tend à générer un écrouissage trop important sur le métal, le rendant moins malléable. Une grande vitesse tend à empêcher la propagation de la force du poinçon jusqu'au niveau du flan. Cette altération pouvant alors se traduire par une rupture du flan.

D'après BLISS, il existe une vitesse optimale pour chaque métal, ces vitesses sont reportées dans le tableau II.2 [25].

Tableau II.2 : vitesses d'emboutissage [25].

Matériau	Vitesses (mm/s)
L'acier	200
le zinc	200
les aciers doux	280
L'aluminium	500
le laiton	750

#### II.4.2.2. La pression du serre-flan

D'une manière générale, la surface du serre flan doit être développable. Le serre flan de première passe d'un outil d'emboutissage profond est plan et les pressions à appliquer pour éviter la formation de plis ne peuvent être déterminées avec précision qu'expérimentalement. L'emboutissage des pièces peu profondes (expansion) et des pièces à grandes parois peu déformées entraîne la formation des plis ou une mauvaise conformation (ventre des parois droites). Le serre flan comporte alors des joncs qui empêchent ou diminuent le glissement de la tôle sous serre flan. Pour contrôler l'écoulement du métal dans la matrice plusieurs joncs peuvent être disposés les uns à la suite des autres [42].

Le rôle du serre flan consiste à empêcher la formation de plis sur le rebord du flan en exerçant une pression appropriée. La présence du serre flan ne s'impose que si  $d < 0,95 \cdot D$  ou  $e < 0,2 \cdot (D - d)$ . Dans la pratique, il faut que le serre flan soit bien trempé et rectifié. La pression est réglée à l'aide de clés dynamométriques, de ressorts ou de caoutchouc, en fonction de l'aspect de l'embouti :

- Si la paroi est sans plis et d'aspect brillant, la pression est adaptée.
- Si la paroi est bonne, mais que les bords supportent des marques de dentures, c'est que la pression est trop faible.
- S'il se produit un déchirement lors de la descente du poinçon, c'est que la pression est trop importante. Ainsi, pour un embouti cylindrique de diamètre  $d$  et de flan de diamètre  $D$ , l'effort du serre flan pour différents matériaux est déterminée par la formule simplifiée suivante [32].

$$F_s = p(D^2 - d^2) \frac{\pi}{2} daN. \quad (\text{II.13})$$

Avec : p est la pression spécifique déterminée d'après le tableau II.3

**Tableau II.3 : Pression spécifique [32].**

Matière (flan)	P (daN/cm <sup>2</sup> )
Acier doux	25
Acier inoxydable	20
Aluminium	12
Laiton	20
Duralumin	16

#### II.4.2.3. L'effort d'emboutissage

L'effort nécessaire pour emboutir des pièces cylindriques dépend tout d'abord des diamètres de l'embouti et du flan primitif, de l'épaisseur et de la qualité de la tôle. Il dépend également de la pression de serre-flan, de la vitesse d'emboutissage, de l'arrondi de la matrice, du jeu entre poinçon et matrice et de la lubrification. Il est difficile de tenir compte de tous ces facteurs dans la détermination de l'effort du poinçon, c'est pourquoi il est commun d'employer la formule simplifiée suivante :

$$p = \pi d e k R_m \quad (\text{II.14})$$

Avec k coefficient en fonction de d/D, e épaisseur du flan,  $R_m$  résistance à la rupture en traction [43].

#### II.4.2.4. La lubrification :

Parmi les techniques permettant de maîtriser le frottement, l'adhésion et l'usure Entre deux corps, la lubrification est certainement la plus courante et la plus anciennement pratiquée. Elle consiste à intercaler entre les deux corps, un troisième corps de faible scission et de contrainte de rupture faible. Ainsi, une lubrification adaptée facilite l'écoulement de la tôle entre la matrice, le serre-flan et le poinçon.

Cependant, la lubrification de la partie centrale du flan a un effet néfaste. On peut expliquer ce

Phénomène par le fait que lubrifier diminue l'adhérence entre le poinçon et les parois de l'embouti. L'effort est alors concentré sur le fond de l'embouti à proximité duquel il y a rupture. C'est pour cette raison qu'il n'est utile de lubrifier que la face du flan opposée au poinçon. Dans le cas d'un poinçon de petit rayon, il est préférable de ne pas lubrifier voir même d'augmenter la rugosité du poinçon afin d'éviter une forte déformation par expansion localisée [33].

#### II.4.2.5 Nombre de passes

Le diamètre  $d_1$  de la première passe est égal au produit du coefficient  $m_1$  par le diamètre du Flan  $D_f$  :  $d_1 = m_1 \cdot D_f$  (II.15)

Et ainsi de suite jusqu'au diamètre à obtenir :  $d_3 = m_2 \cdot d_2$  ;  $d_4 = m_2 \cdot d_3$  ; ... ;  $d_n = m_2 \cdot d_{n-1}$

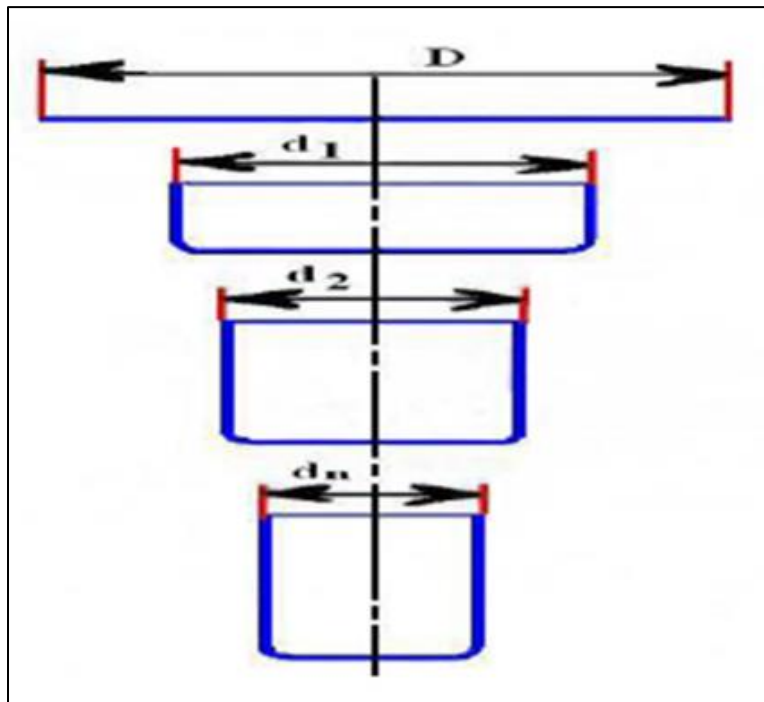


Figure II.10 : Nombre de passes [6].

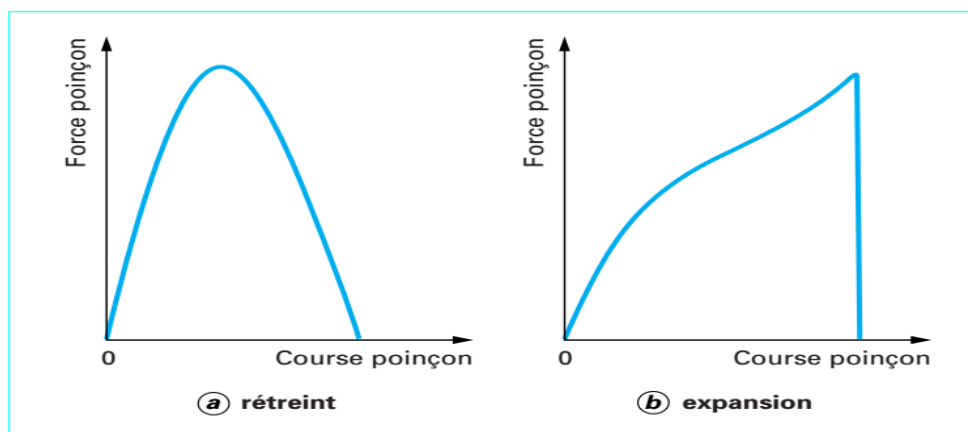
Avec  $m_1$  et  $m_2$  sont des coefficients de réduction qui varient en fonction de métaux et du taux d'écroutissage admissible pour chaque métal (voir Tableau II.4).

**Tableau II.4 :** Quelques valeurs des coefficients de réduction pour différents types de métaux [6].

MATIERE	m 1	m 2
tôle d'emboutissage	–	–
Ordinaire	0.6	0.8
Spéciale	0.55	0.75
tôle acier inoxydable	–	–
Austénitique	0.51	0.8
Ferritique	0.57	0.8
Cuivre	0.58	0.85
Laiton	0.53	0.75
Aluminium recuit	0.50	0.80
Duralumin recuit	0.55	0.9

## II.5. Paramètres influençant le procédé d'emboutissage

Examiner tour à tour l'influence de chacune des paramètres des caractéristiques mécaniques sur la mise en forme, en sériant le plus précisément possible le type d'emboutissage pour lequel elles sont favorables ou néfastes [44].



**Figure II.11 :** Différentes évolutions de la force en fonction de la course en emboutissage [44].

### II.5.1. Influence du coefficient d'anisotropie

Un matériau à  $r$  élevé apparaît donc comme parfaitement adapté à la réalisation des pièces profondes en rétreint, c.-à-d. essentiellement des godets cylindriques (boîtes de conserves, boîtes de boissons, filtres à huiles d'automobiles et camions, corps d'extincteurs) puisque sa facilité à se rétreindre va réduire les efforts de traction et les risques de rupture. Le raisonnement simple est la suivant: un coefficient d'anisotropie élevé dénote la facilité avec laquelle un métal peut s'écouler sous l'action d'une traction ainsi que le fait que son épaisseur variera peu. Or, le métal de la collerette, soumis à une tension radiale, doit justement se rétrécir circonférentielle-ment ; il le fera docilement de plus, ce métal s'amincira moins sur le rayon de poinçon, donc induira un moindre affaiblissement de cette zone chargée de « tirer » le métal de la collerette. Enfin, le moindre épaissement du métal dans les angles (pièces rectangulaires) y évitera le transfert de la charge du serre - flan. Tout concourt donc à favoriser le rétreint ; Notons qu'un raisonnement plus physique basé sur l'interprétation du critère de plasticité de Hill conduit aux mêmes conclusions. Ceci est vrai pour les valeurs de  $r$  élevées (1.5 et plus, cas des aciers doux pour emboutissage), mais pas pour les matériaux dont  $r$  proche ou inférieur à 1 (alliages aluminium, aciers à haute limite d'élasticité) [27].

Ce coefficient est en assez bonne corrélation avec le produit  $\bar{r}.n$  ( $\bar{r}$  coefficient d'anisotropie moyen de la tôle et  $n$  coefficient d'écrouissage).

Dans le tableau II.5 on donne quelques exemples de valeurs du coefficient d'anisotropie moyen pour divers matériaux [36].

**Tableau II.5** : valeurs de coefficient d'anisotropie moyen pour différents matériaux [36].

Métal	$\bar{r}$
Acier extra-doux	1 à 2
Acier ferritique à 17 % Cr	0,9 à 1,3
Acier austénitique 18-10	0,9 à 1
Aluminium	0,5 à 1
AG 1 à 5	0,6 à 0,8
A S G	0,6
AU 4 G	0,7
Laiton 67 Cu-33 Zn	1
Laiton 63 Cu-37 Zn	0,85
Cuivre	0,9 à 1
Zinc	0,5
Nickel	1

### II.5.2 Influence du coefficient d'érouissage

Le coefficient d'érouissage  $n$  donne une représentation de capacité de consolidation du métal en traction. Cette consolidation joue un double rôle : elle augmente le niveau de déformation que peut supporter le métal d'une part et elle permet surtout une meilleure répartition des déformations d'autre part [22].

Afin de définir le comportement d'érouissage de la tôle, nous avons décidé d'utiliser la loi d'érouissage de Ludwik. Dans le modèle de la loi de Ludwik, trois constantes de matériau doivent être estimées par la courbe rationnelle contrainte-déformation : le coefficient de résistance (K), l'exposant d'érouissage (n) et la contrainte initiale ( $\sigma_0$ ) avant de se limiter à l'équation suivante ; Ludwik [45].

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (\text{II.16})$$

Avec ; ( $\sigma_0$  Limite élastique)

La détermination du coefficient n se fait à partir du calcul des contraintes et des allongements rationnels en divers points de la courbe de traction. Une étude très détaillée de sa détermination a été faite par Grumbach et Pomey, le coefficient n dépend très peu de la texture des tôles, il dépend



principalement de la composition chimique et de la microstructure de la tôle. Dans le tableau II.6 on donne quelques exemples de la valeur du coefficient d'érouissage  $n$  pour divers matériaux [36].

**Tableau II.6 :** valeurs de  $n$  pour différents matériaux [36].

Métal	Coefficient d'érouissage $n$
Acier extra-doux	0,15 à 0,25
Acier ferritique à 17 % Cr	0,16 à 0,20
Acier austénitique 18-10	0,40 à 0,50
Aluminium	0,07 à 0,27
AG 1 à 5	0,23 à 0,30
A S G	0,23
AU 4 G	0,15
Laiton 67 Cu-33 Zn	0,55
Laiton 63 Cu-37 Zn	0,45
Cuivre	0,30 à 0,47
Zinc	0,1
Nickel	0,6

### II.5.3 Influence de la limite d'élasticité

Plus la limite d'élasticité d'un métal est élevée, plus la plastification de celui-ci est retardée. En expansion et en traction plane, la formabilité est donc globalement Diminuée. En rétreint, les choses sont plus compliquées, car l'effet du relèvement est sensible aussi bien sur la zone qui s'oppose à la déformation (la collerette) que sur celle chargée de faire pénétrer le métal dans la matrice (la jupe). Il y a donc une sorte d'équilibre qui rend l'influence de la limite d'élasticité peu sensible. On connaît des aciers à très hautes caractéristiques mécaniques (appelés acier double réduction) qui s'emboutissent parfaitement en rétreint pour la fabrication de boîtes métalliques profondes. En revanche, la tendance à plisser augmente indiscutablement sous l'effet de l'énergie accumulée, laquelle précipite l'instabilité qu'est le plissement. Le rétreint ne sera donc possible que si l'on peut appliquer un effort de serre-flan élevé, ce qui implique un coefficient de frottement très faible [44].

#### II.5.4. Influence de la résistance à la traction

Elle a surtout un effet sensible sur les efforts mis en jeux qui croissent de façon sensiblement linéaire avec elle, quel que soit le mode de formage. En fait, un paramètre plus intéressant est le rapport de la limite d'élasticité à la résistance à la traction :  $R_e / R_m$ . Dans les modes expansion et traction plane, il donne une assez bonne idée de la capacité de formage. Ce rapport varie sensiblement à l'inverse de  $n$  (voir tableau II.7).

**Tableau II.7** : Relation entre formabilité et valeurs de  $R_e / R_m$  et  $n$  (pour les aciers) [44].

Formabilité en expansion	$R_e / R_m$	N
Excellente	0,4 à 0,5	0,24 à 0,27
Bonne	0,5 à 0,6	0,20 à 0,24
Moyenne	0,6 à 0,7	0,18 à 0,20
Médiocre	0,7 à 0,9	0,12 à 0,18

Ceci a une implication importante : le niveau des caractéristiques mécaniques  $R_e$  et  $R_m$  n'est pas l'élément principal de la formabilité, c'est leur relativité. Le fait que les normes limitent la résistance des aciers pour emboutissage n'est plus qu'une persistance du passé, venant de l'époque où la métallurgie était très mal contrôlée [44].

#### II.5.5 Influence de l'allongement

Il est également assez corrélé avec le rapport  $R_e / R_m$ . En principe, plus  $A_g$  ou  $A$  est grand, plus la capacité d'expansion croît. On peut cependant voir cette règle mise en défaut selon la plus ou moins grande tendance du métal à l'endommagement, lequel réduit l'allongement de striction. C'est parfois le cas pour certains aciers inoxydables.

Il a été prouvé que la capacité en pliage est très liée à la réduction de section par striction lors de l'essai de traction et, d'une façon moins nette, à l'allongement de striction lui-même. Il en est de même pour l'expansion des trous, cas dans lequel la capacité d'allongement dépasse très largement celle mesurée à rupture par l'essai de traction. En fait, quand la rupture se produit, tout le pourtour du trou est en striction, et non une petite partie de l'éprouvette comme en traction. Cette remarque

ne s'applique qu'aux matériaux ductiles et bien découpés. Quant au rétreint, on peut dire que la capacité d'allongement n'y joue aucun rôle. Ils s'emboutissent parfaitement en rétreint alors que leur allongement à rupture ne dépasse souvent pas 0,5 % [44].

### II.5.6. Influence de l'épaisseur

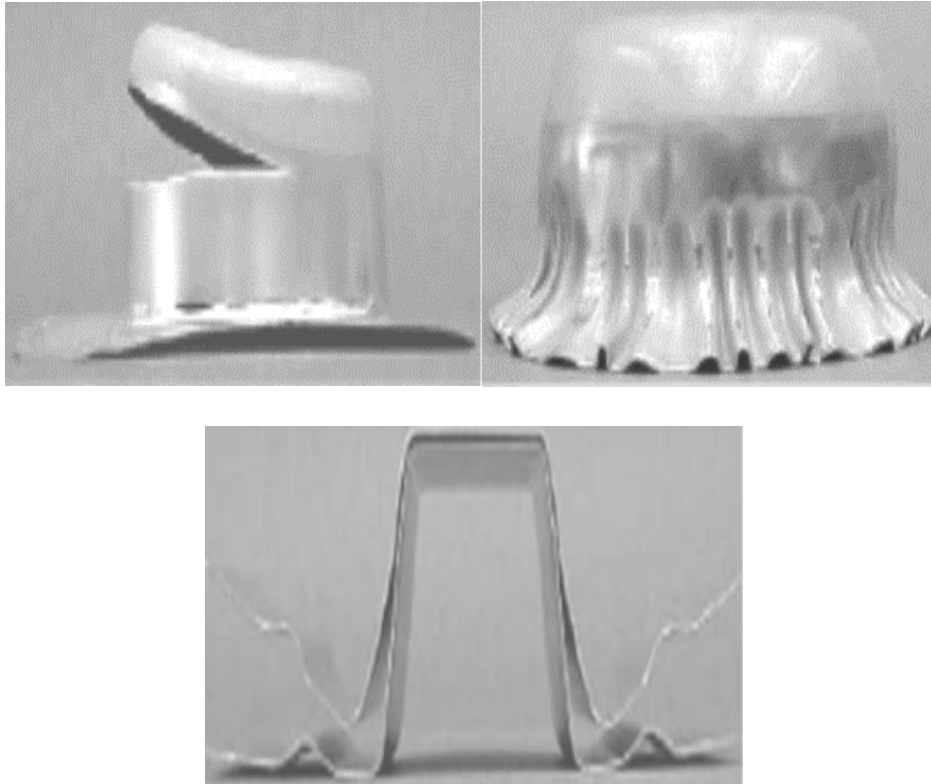
Nous ne reviendrons pas sur la variation du niveau des CLF avec l'épaisseur. Nous regarderons plutôt en quoi elle influence le plissement. La résistance au flambement d'une tôle varie pratiquement comme le cube de son épaisseur. C'est-à-dire que la naissance des plis va être extrêmement sensible à celle-ci. Pour prendre conscience de ce qui se passera en emboutissage, il faut différencier deux cas : celui, très courant, où des plis risquent d'apparaître et celui, plus rare, où ce risque n'existe pas. Commençons par le cas où il n'y a pas de risque de plissement. Si l'on imagine que l'on forme une pièce sur un poinçon hémisphérique, il est clair que toute la surface est en expansion ou, à la rigueur, en traction plane (sur les bords). Il n'apparaît nulle part de contraintes de compression et le risque de plissement est donc nul : il n'y a pas glissement du métal sous le serre-flan. Que la tôle soit épaisse ou mince ne change donc rien puis quelles zones qui se déforment tout comme celles qui transmettent les efforts sont affectées de la même manière. Le cas est tout à fait différent si des plis peuvent se former dans la pièce. Deux phénomènes sont alors à prendre en compte :

- ❖ Comme on vient de le voir, plus l'épaisseur diminue, plus leur formation est probable et facile. Toutes choses égales par ailleurs, il faudra donc augmenter la pression de serre-flan pour s'opposer à cette tendance néfaste ;
- ❖ Néanmoins, la force que peut développer un pli en se formant diminue proportionnellement à l'épaisseur de la tôle. Il y a donc là un phénomène compensatoire, mais dont l'amplitude est plus faible que celle du cas précédent [46].

## II.6. Les principaux défauts des pièces embouties

Au cours de l'opération de mise en forme par emboutissage la feuille métallique subit différents modes de sollicitations. Dans certaines conditions, ces modes conduisent à la formation d'ondulations que nous désignerons généralement sous le nom plis ou à un amincissement excessif conduisant à la rupture de la tôle (Figure II.12) [22].

La rupture et le plissement ne sont pas les seuls critères d'acceptation ou de refus d'une pièce. En effet, selon la fonction recherchée de l'embouti final, les défauts géométriques doivent être pris en compte le plus précocement possible dans la conception des pièces. Il s'agit d'apporter des modifications sur sa géométrie et/ou adapter l'outil ou les paramètres du procédé, pour compenser les écarts géométriques et réduire le retour élastique.



**Figure II.12** : Défauts dans les pièces embouties (Rupture, retour élastique et plissement).

La difficulté principale de l'emboutissage de pièces complexes est de contrôler le procédé à l'intérieur de ces limites de défaillances. Nous souhaitons que la pièce après mise en forme ne présente pas de défauts volumiques, surfaciques et dimensionnels

- les défauts de la surface tels que la présence de rayures, signes de grippage, etc.
- la rupture ;

- la non-conformité de la forme de la pièce qui est due à un retour élastique excessif ou à une formation de plis dans certaines zones de la pièce emboutie ;
- la détérioration du revêtement.

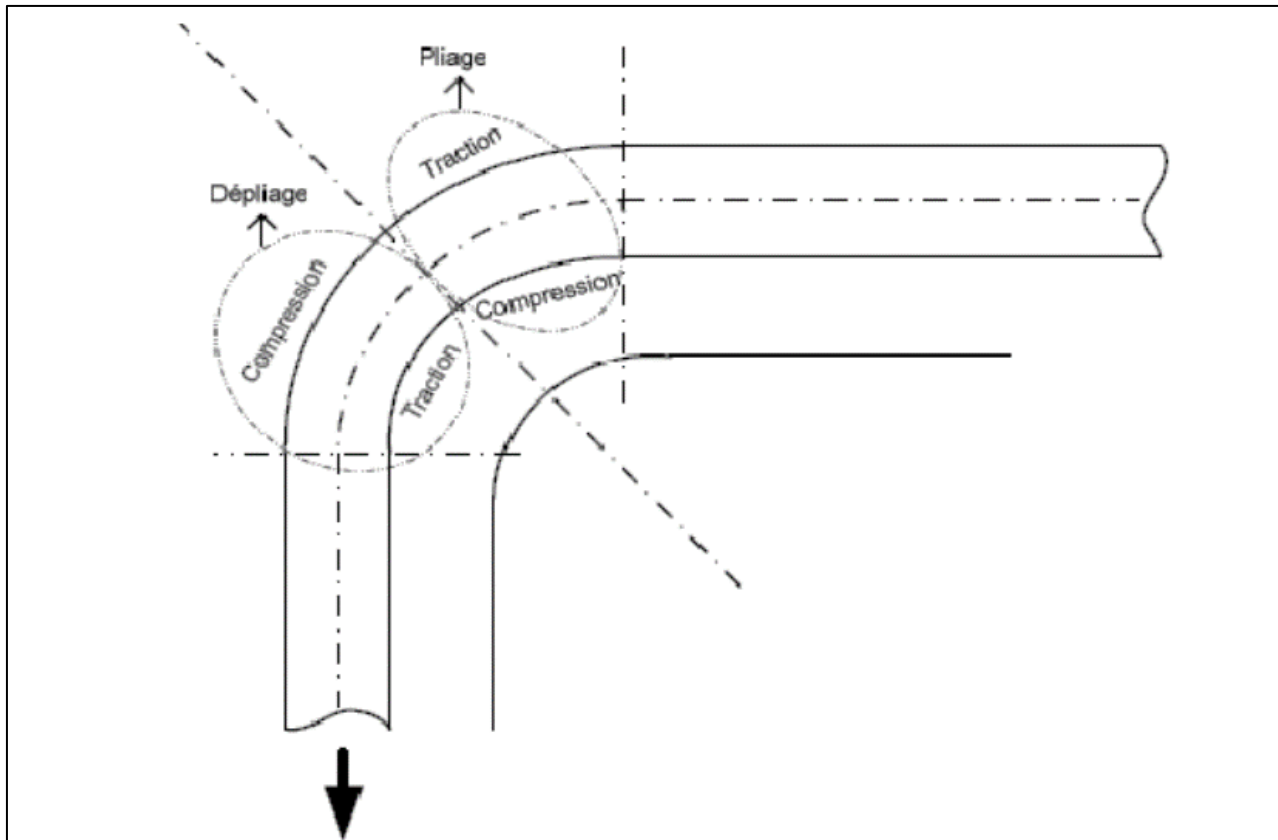
L'aspect de la surface constitue un critère déterminant pour l'acceptation des pièces de robe de la carrosserie et peut également être pris en compte pour certaines pièces de structure partiellement visibles

La rupture, se traduit par une faiblesse du point de vue mécanique et du point de vue aspect. Physiquement, elle se manifeste par une localisation de la déformation. La rupture se produit généralement dans les zones où l'embouti est sollicité en expansion ou en traction plane. Elle apparaît quand les déformations locales ont dépassé la capacité d'allongement plastique du métal. De nombreuses méthodes sont utilisées, pour prédire ce type de défaut [47].

Après extraction de la pièce, on observe souvent des défauts de tolérances dimensionnelles. En effet, la pièce emboutie n'a jamais la géométrie de l'outil. Elle s'en rapproche de très près, mais elle présente en général un écart de cote lié au retour élastique après retrait des outils. Le retour élastique est d'autant plus marqué que la limite d'élasticité du métal est plus élevée (Acier) et son module d'élasticité plus faible (Aluminium). Cet écart à la géométrie nominale peut être minimisé par une mise au point précise des outils. Si cette différence de géométrie n'est pas contenue dans des tolérances sévères, elle peut être préjudiciable au bon fonctionnement de la pièce. Une opération de calibrage peut parfois s'avérer nécessaire pour assurer la précision géométrique recherchée.

Le plissement est un phénomène d'instabilité de type flambement dû à l'existence de contraintes de compression locales dans la tôle. L'analyse du plissement est un problème complexe dans sa globalité. Les plis sont généralement associés à des déformations en rétreint, ils peuvent apparaître aussi bien dans les brins libres (facettes courbes) que sous serre-flan (facettes planes). Ils résultent aussi bien des contraintes de formage proprement dites que des contraintes résiduelles libérées après décharge et extraction de la pièce hors des outils [22].

Comme le montre la figure II.13 par exemple, lors du passage de la tôle par le rayon de courbure de l'outil, sur la partie supérieure de la tôle on passe d'une traction à une compression, tandis que sur la partie inférieure c'est l'inverse qui se produit [32].



**Figure II.13:** Changement du trajet de déformation au cours de passage de la tôle par le rayon de courbure de l'outil [32].

## II.7. Influence de la structure des tôles minces sur leurs emboutissabilité

Les tôles minces ont pour principales caractéristiques d'être des agrégats poly-cristallins. Les propriétés mécaniques et donc l'emboutissabilité des tôles dépendent pour une grande part des caractéristiques de ces agrégats (taille des grains, texture cristallographique), elles dépendent aussi des particules de seconde phase et des teneurs des éléments en solution [27].

### II.7.1. Influence de la taille des grains

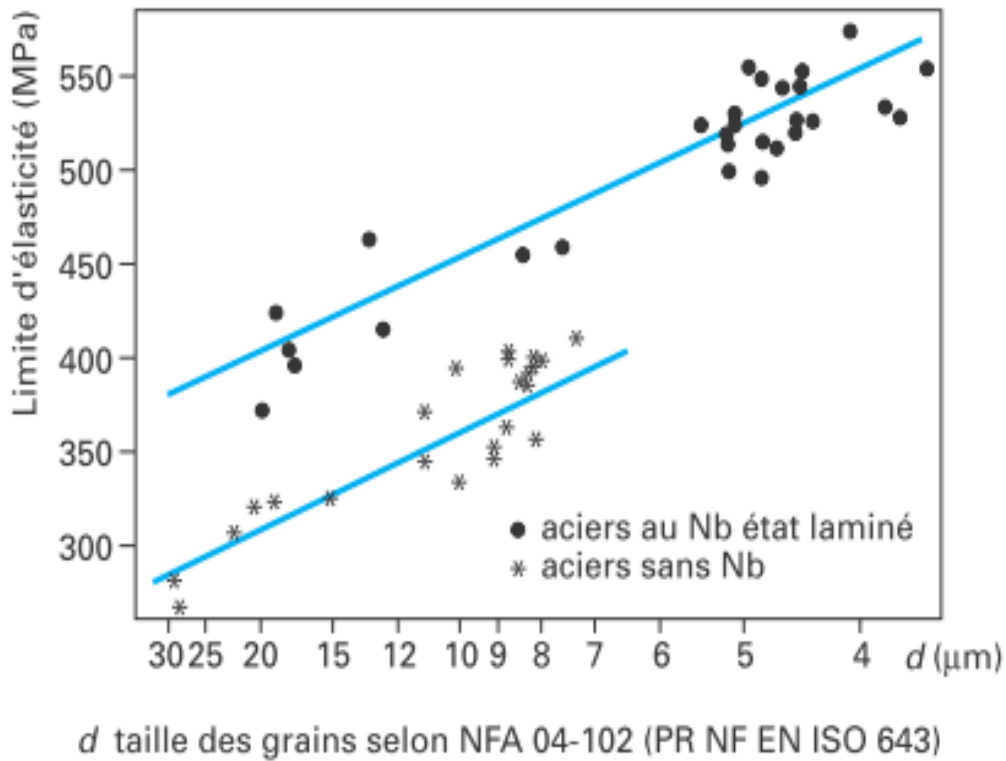
La taille des grains est l'un des paramètres les plus importants, en effet elle agit sur la limite d'élasticité et la résistance à la traction qui sont des critères (conventionnels) de l'emboutissabilité [48]. La limite d'élasticité d'un métal poly-cristallin est donnée par la relation de Hall-Petch

$$\sigma_e = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (\text{II.17})$$

Où  $d$  est le diamètre moyen des grains,  $\sigma_0$  est la limite d'élasticité du monocristal et  $K$  un coefficient dépendant du matériau et de la température. L'augmentation de la taille des grains améliore l'emboutissabilité des tôles minces, mais il faut cependant savoir que cette augmentation de la taille des grains n'est pas limitée. Des grains trop gros entraînent l'apparition de nombreux défauts de surface lors de l'emboutissage [27].

La taille de grain joue aussi sur la valeur de  $n$ , dans le sens inverse, cette fois : plus le grain est fin, plus  $n$  est faible. La taille de grain influence également l'aspect de surface des pièces. Il se produit en effet une modification de la forme des grains durant l'emboutissage, variable suivant leur orientation, et ceci entraîne, en surface, une modification de la rugosité (qui augmente) et que l'on appelle parfois peau d'orange. Évidemment, plus le grain est fin, moins cette modification est visible, ce qui a conduit à l'utilisation d'aciers à grains très fins.

Pour finir, un grain grossier entraîne systématiquement une diminution du coefficient d'anisotropie  $r$ , donc de l'aptitude au rétreint [44].



**Figure II.14** : Influence de la taille de grain sur la limite d'élasticité des aciers [44].

### II.7.2 Influence de la texture cristallographique

Lorsqu'un métal subit des déformations importantes, ces dernières donnent lieu à une orientation cristallographique préférentielle des grains. Cette orientation régulière des cristaux provoquée par les efforts extérieurs est appelée 'texture de déformation'. On sait que le phénomène de glissement ne se fait que lorsque la déformation est importante, la forme des grains change. Avant la déformation, les grains ont une forme grossièrement arrondies (Figure II.15), par contre après la déformation, les grains s'étendent dans le sens des efforts appliqués en produisant une structure fibreuse.



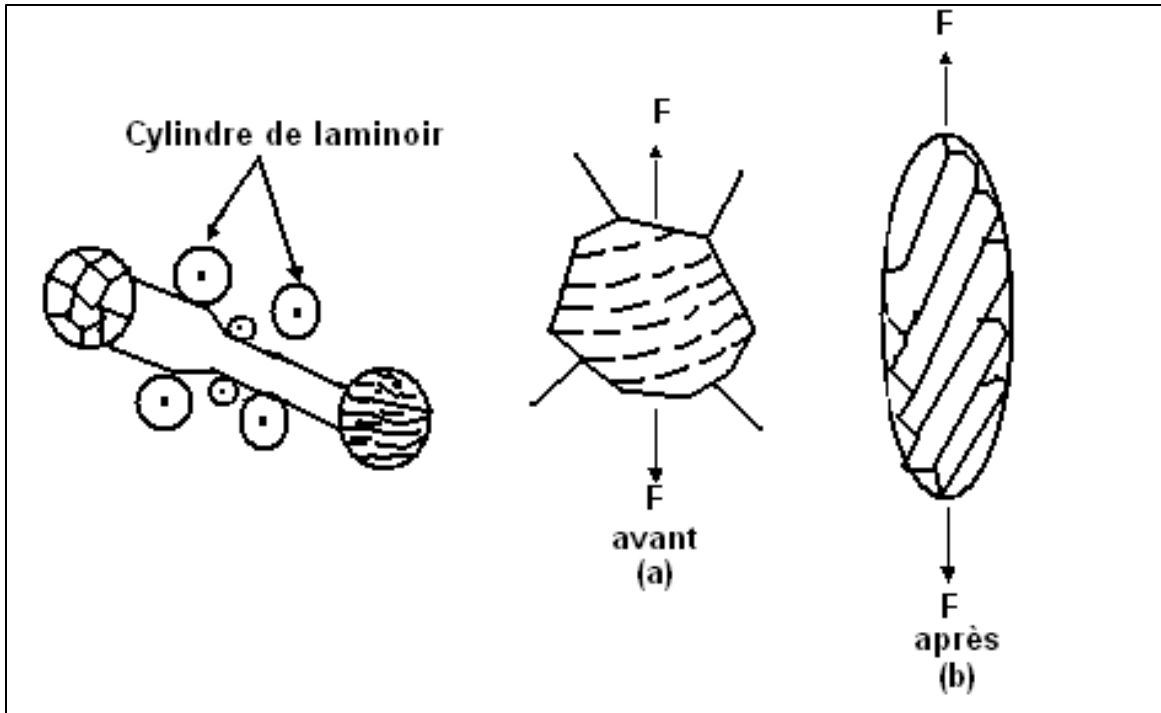


Figure II.15 : Texture de déformation [49].

Il faut tenir compte du fait que l'orientation des grains d'un métal n'est pas la même, et que la déformation plastique ne se produit pas dans le volume entier, plus la déformation est grande, plus le nombre de grains à orientation préférentielle est grand. Le caractère de la texture dépend de la nature du métal et du mode de déformation (laminage, étirage, etc...) [49].

## II .8. Conclusion de chapitre II

Le choix d'une tôle destinée à l'emboutissage exige l'importance de prendre en compte l'Influence des caractéristiques mécaniques sur la mise en forme, telles que le coefficient d'anisotropie, le coefficient d'écrouissage, la limite d'élasticité, la résistance à la traction et les facteurs métallurgiques comme la structure métallographique, la taille des grains, agissent également sur l'aptitude au formage.

**Chapitre III**  
**Partie calcule et**  
**simulation**

### III.1. Introduction de chapitre I

L'expérience est le complément indispensable de la théorie et l'argument de chaque Questions sur le comportement mécanique de l'acier avant et après déformation Dans cette étape, on a effectué une série de calculs, (traction, dureté) sur des éprouvettes plates. et d'autre part, malgré le manque de l'expérience on a tenté par la méthode de calcul, nous avons calculé les paramètres principales responsables du processus d'emboutissage (géométrique et mécanique). Les résultats sont enregistrés et commentés.

### III.2. Procédure expérimentales

#### III.2.1. Choix du métal de base

Le choix de métal de base le (DC04 selon EN, ES selon AFNOR) est motivé par deux raisons.

**Tableau III.1** : désignation de l'acier DC04 D'après EN [50].

Bobine et tôle laminées à froid					
DIN	Ancien	Actuel EN	AFNOR	Désignation numérique	Equivalence DIN/EN
St 14	Fe p04	DC 04	ES	1.0338	10130/10131

Pour identifier la tôle DC04, un récapitulatif est représenté ci-dessous.

- D : produit plat pour formage ;
- C : pour les produits laminées à froid ;
- 04 : emboutissage [51].

#### III.2.2. Analyse chimique de l'acier (DC04)

L'analyse spectrale prend une part exceptionnelle à côté des examens mécaniques et chimiques. En peu de temps, elle livre des informations sur l'échantillon en déterminant avec certitude aussi bien les concentrations importantes en éléments d'alliages, que pour les petites teneurs en impuretés indésirables. Elle est l'un des moyens les plus rationnels pour le contrôle des nuances

en usine [50]. La composition chimique de l'acier décarburé utilisés dans notre étude est répertoriée dans le tableau III.2.

**Tableau III.2 :** Composition chimique du métal de base [52].

% C	% Mn	% P	% S
0.08	0,40	0.030	0.030

A partir du tableau ci-dessus, on remarque que la tôle de l'acier DC 04 à une teneur en carbone très faible, c'est ce qui nous permet de dire que l'acier DC 04 est un acier doux. Le pourcentage des additifs de notre acier est aussi faible.

- **Propriétés physiques de l'acier DC04**

Les différentes Propriétés physiques des aciers utilisés sont répertoriées dans le tableau. III.2.

**Tableau III.3 :** Propriétés physiques de l'acier DC04 [50].

<b>Propriétés physiques</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
Masse volumique 20° C	7.86	Kg/dm <sup>3</sup>
Point de fusion	1400-1500	°C
Module d'élasticité longitudinal	210	GPa/mm <sup>2</sup>
Conductivité thermique	45-55	W/M.K
Conductivité électrique	<b>7.7</b>	M/Q mm <sup>2</sup>
Résistivité électrique	0.13	Q mm <sup>2</sup> /M
Coefficient de dilatation linéaire de 20 à 300°C	12 x 10 <sup>-6</sup>	°C <sup>-1</sup>

### III.2.3. Découpage et usinage des éprouvettes

L'éprouvette est constituée soit par un tronçon de tube soit par une bande longitudinale ou transversale découpée dans le tube et ayant l'épaisseur totale de la paroi du tube une éprouvette de section plat usinée dans la tôle. L'échantillon découpé sur l'ébauche et) en mettre en considération [50].

Les éprouvettes comportent généralement deux têtes d'amarrage et une partie calibrée de section constante comportant deux repères distants d'une longueur  $L$  (figure III.1).

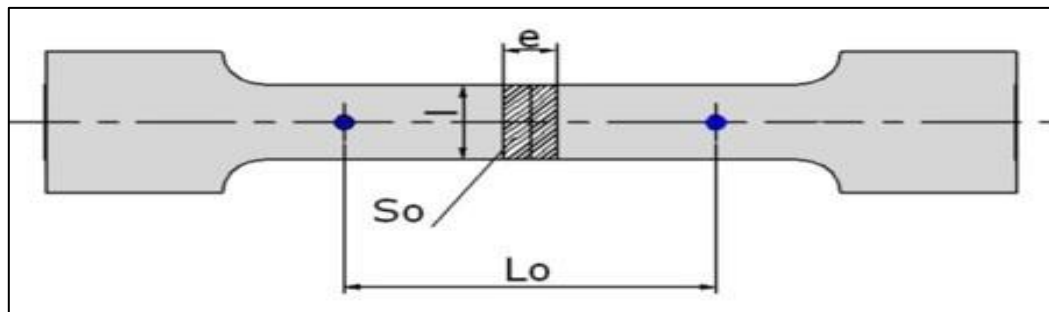


Figure III.1 : Eprouvette de traction prismatique [53].

## III.3. Essais mécaniques

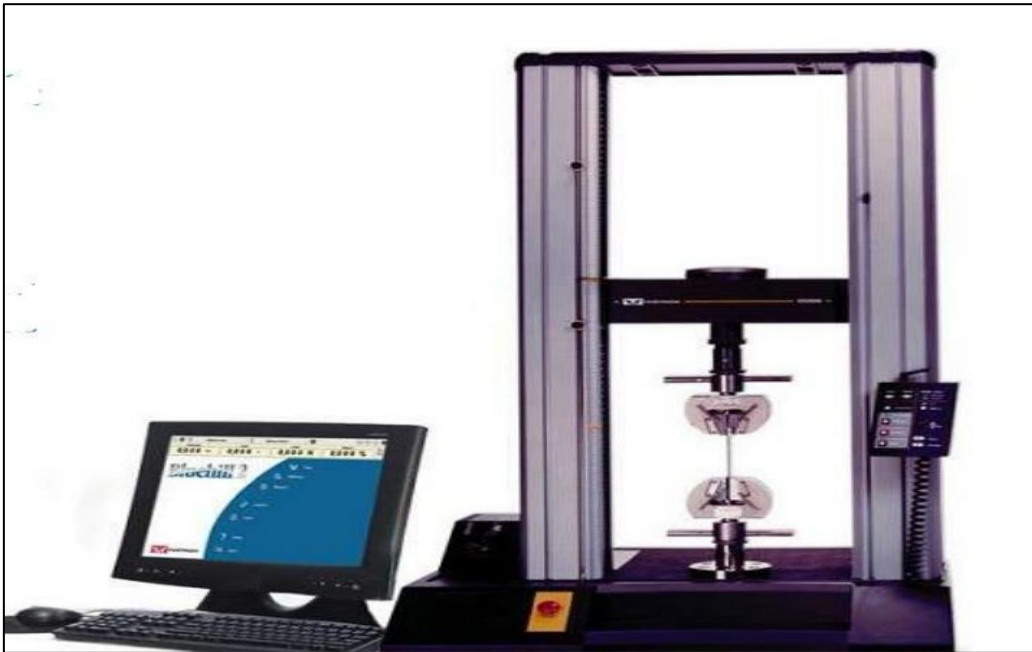
### III.3.1. Essai de traction

Les essais de traction permettent d'expliquer une partie des comportements mécaniques des matériaux. On distingue souvent deux groupes : ceux qui sont dits fragiles et ceux qui sont dits ductiles.

Un matériau est dit fragile lorsque la rupture survient avant même d'entrer dans le domaine plastique. Un matériau qui présente un domaine élastique et un domaine plastique est dit ductile [51].

#### ➤ Principe de l'essai de traction

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction de façon progressive, généralement jusqu'à la rupture dans le but de définir une ou plusieurs caractéristiques mécaniques. Un essai de traction est une expérience qui permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau quelconque [54].



**Figure III.2 :** Machine de traction [56].

On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte. On obtient alors le graphe suivant :

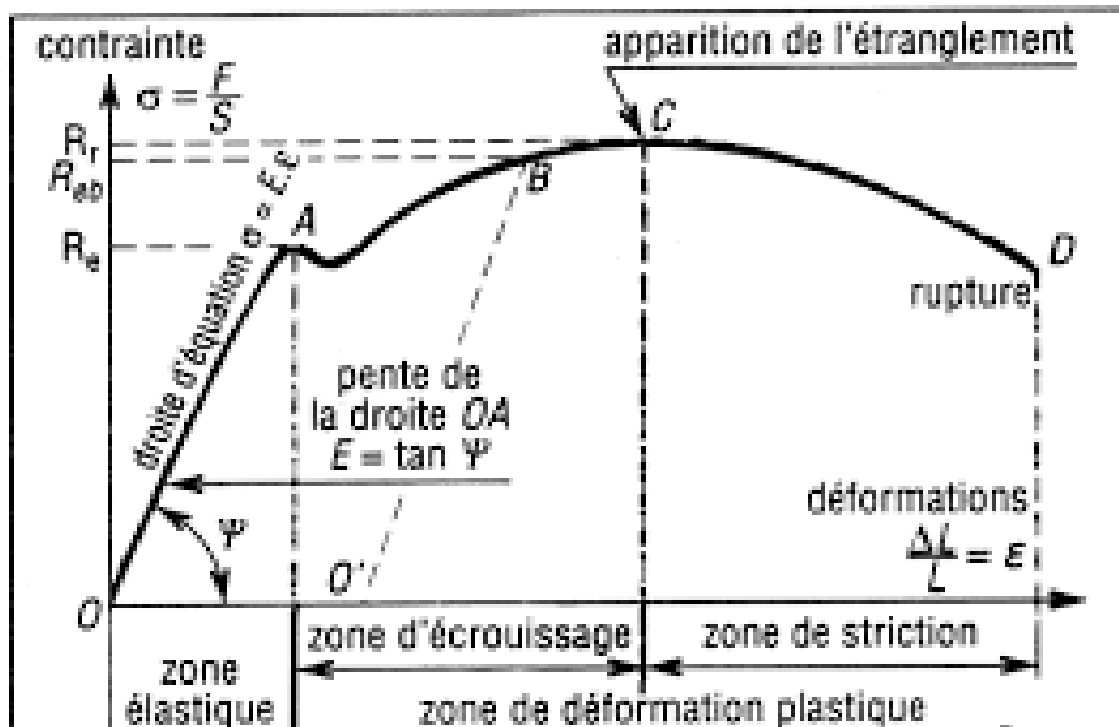


Figure III.3 : courbe de traction conventionnelle [57].

### ➤ Caractéristiques de l'essai de traction

#### 1) Module d'élasticité longitudinale E (MPa)

Le Module d'Young E a la dimension d'une contrainte. Il représente la contrainte qu'il faudrait appliquer pour obtenir une déformation unité soit doubler la longueur initiale [58], La loi d'élasticité est la loi de Hooke ;

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{III.1})$$

E acier = 210000 Mpa

#### 2) Limite élastique Re

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

$$Re = \frac{Fe}{S_0} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$R_e$  : Limite d'élasticité apparente (Mpa)

$F_e$  : charge à la limite apparente d'élasticité (N).

$S_0$  : section initiale (mm<sup>2</sup>).

Section d'une éprouvette plate initiale

$$S_0 = e_0 \cdot l_0 \quad (\text{III.3})$$

#### ❖ Limite conventionnelle d'élasticité $R_e$ 0,2 Mpa

On utilise cette détermination pour les courbes de traction où le palier de fin de limite élastique n'apparaît pas nettement. Pour la mesure de  $R_e$  on tolère une légère déformation permanente de 0,2% ( $A\% = 0,2$ ) [50].

#### ❖ Limite maximale de la résistance à la rupture $R_m$ (Mpa)

C'est la contrainte maximale que peut supporter le matériau avant d'atteindre la zone de striction. Utilisé dans le calcul des organes de sécurité. Souvent appelée résistance à la rupture [12].

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (\text{III.4})$$

$F_m$  : charge maximale.

#### 1) Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture donne une valeur de l'aptitude du métal à la déformation plastique.

$$\varepsilon(\%) = \frac{L_f - L_0}{L_0} 100 \quad (\text{III.5})$$

$L_f$ : Longueur de l'éprouvette reconstituée après rupture

$L_0$ : Longueur initiale de l'éprouvette.

#### 2) Striction

$$Z(\%) = \frac{\Delta S}{S_0} 100 \quad (\text{III.6})$$

Section finale

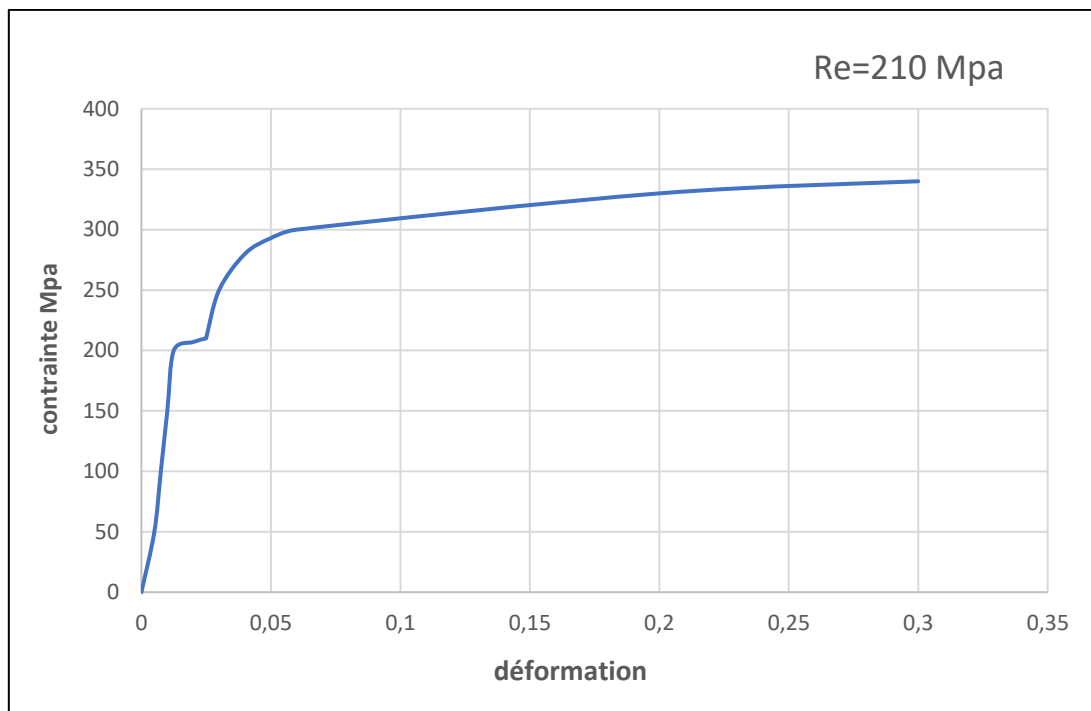
$$S_f = e_f \cdot L_f \quad (\text{III.7})$$



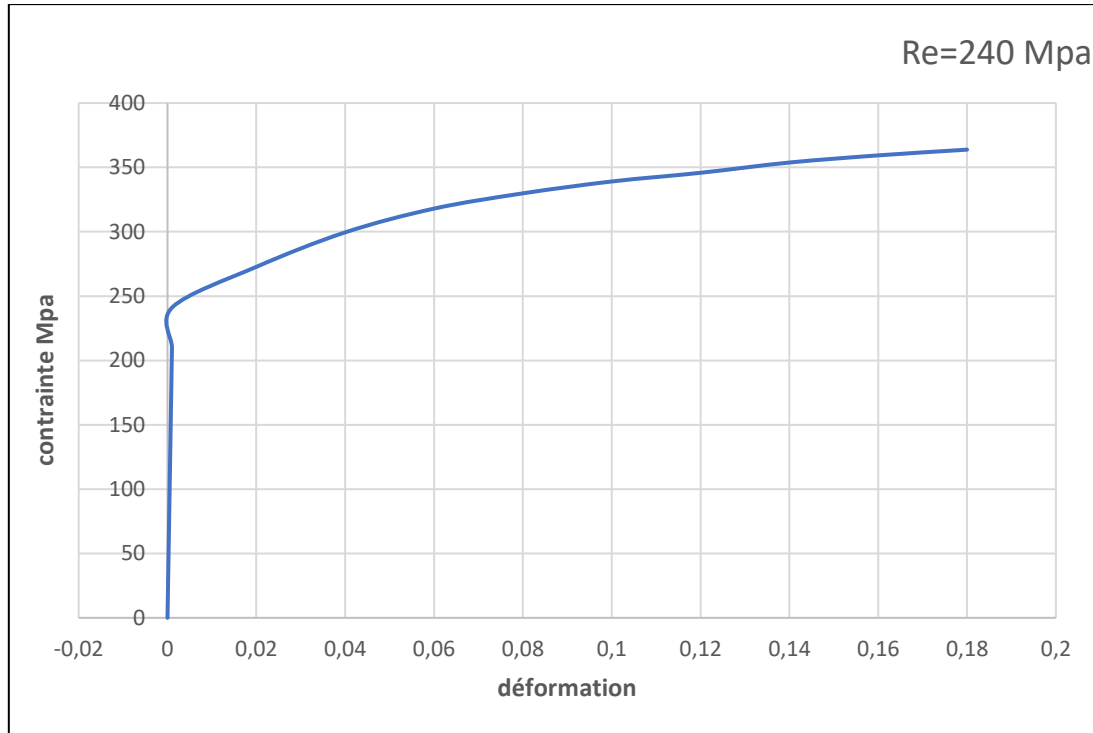
*Tableau III.4 : donne théorique [58].*

caractéristiques mécaniques	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A%	Coefficient n
Avant déformation	210	270/350	30	0.24
Après déformation	240	340/440	18	

Les courbe de traction (après et avant) déformation sont enregistrement, voire figure (III.9 et III.10)



**Figure III.4 :** Courbe rationnelle de traction avant déformation.



**Figure III.5 :** courbe rationnelle de traction après déformation.

### III.3.2. Essais de dureté

La dureté caractérise la résistance à la déformation qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps dur. L'essai de dureté, qui généralement s'effectue sur des machines d'essai appelées duromètres, a pour but de déterminer la dureté des matériaux. C'est un moyen de contrôle non destructif utilisé dans la production pour un contrôle rapide de la qualité des produits finis car il permet d'évaluer les propriétés d'un matériau tel que sa résistance à la traction, sa ductilité et sa résistance à l'usure. Selon les normes, la dureté est exprimée comme un nombre sans dimension. Les essais les plus courants sont les essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell [59].

#### ➤ Principe de l'essai de dureté

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à tester. La charge appliquée est constante et on mesure la dimension de l'empreinte. Celle-ci est d'autant plus grande que le métal est mou. La dureté  $H$  s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte [51] :

$$H = \frac{F}{S} \quad (\text{III.8})$$

Avec

H : symbole de dureté (MPa)

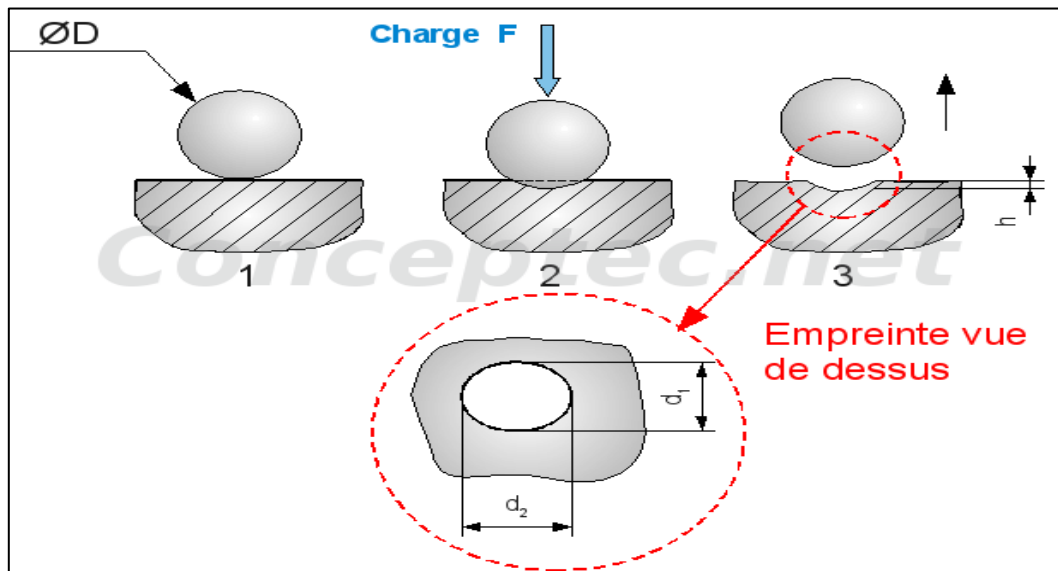
F : charge d'essai (N)

S : surface de l'empreinte (mm<sup>2</sup>)

➤ **Types d'essai**

**1. Essai Brinell**

Il consiste à imprimer dans la pièce à tester une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F, et à mesurer le diamètre d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge [51].



**Figure III.6 : Essai de dureté Brinell [60].**

La dureté Brinell est donnée par la relation suivante :

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \times 0.102 \tag{III. 9}$$

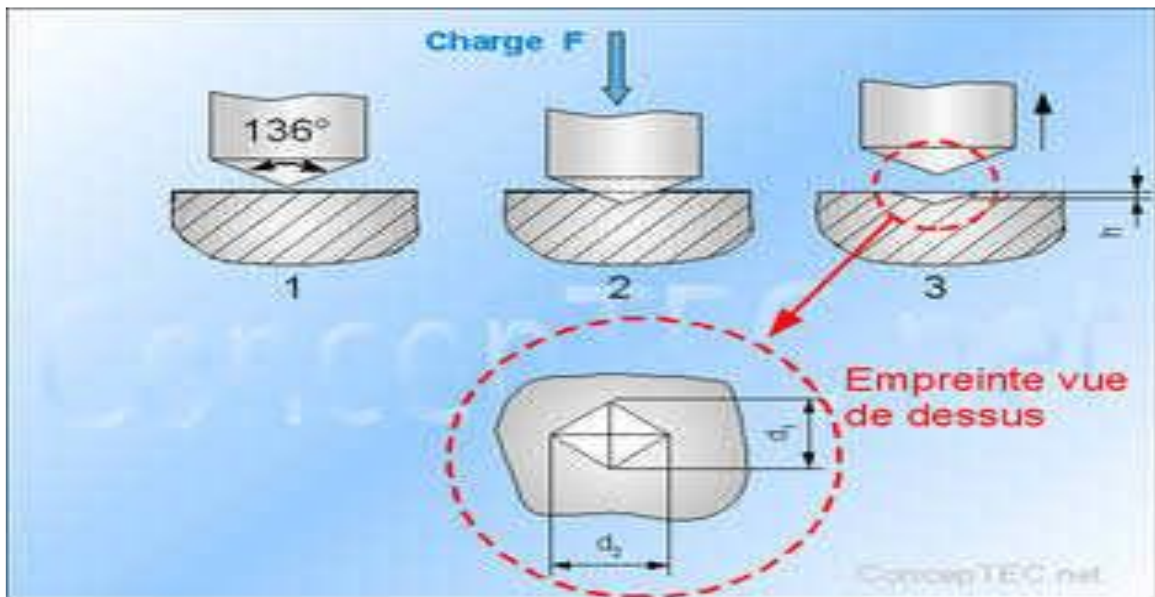
P : la charge appliquée

D : diamètre de la bille (mm)

$d$  : diamètre de l'empreinte (mm).

## 2. Essai de dureté Vickers

Il consiste à imprimer dans la pièce à tester un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet  $136^\circ$ , sous une charge  $F$ , et à mesurer la diagonale  $d$  de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge [2].



**Figure III.7** : Principe de l'essai Vickers [61].

La dureté Vickers est donnée par la relation suivante:

$$HV = \frac{0.189 \times P}{d^2} \quad (\text{III.10})$$

Tel que :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{III.11})$$

$P$  (N) : La charge appliquée au pénétrateur.

$d$  (mm) : La diagonale moyenne de l'empreinte.

Des Conditions nécessaire de l'essai Vickers tel que :

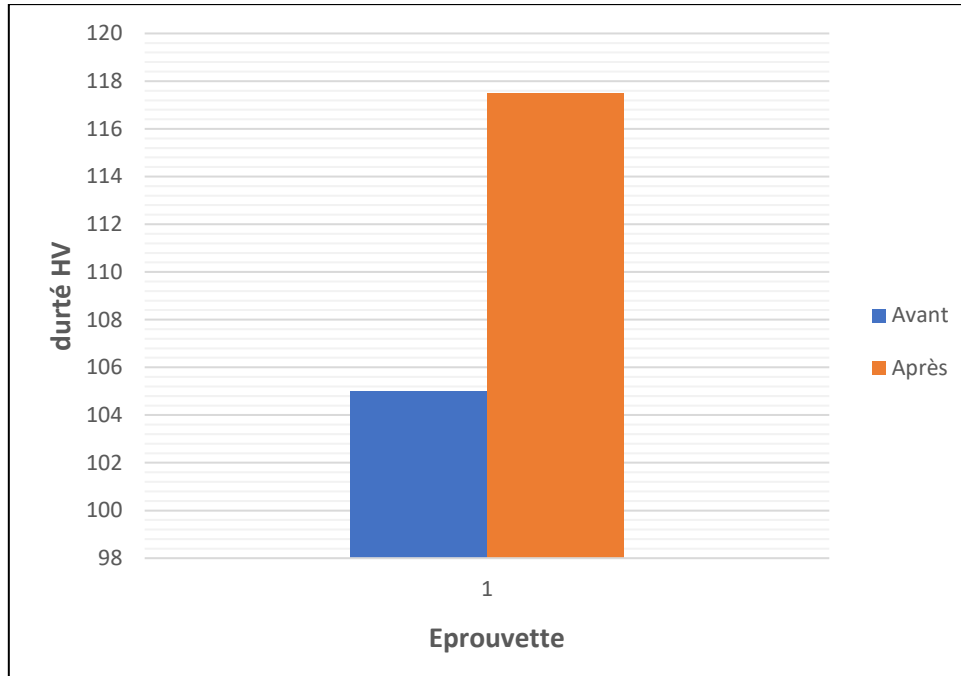
- L'essai est normalement effectué à température ambiante,
- La charge est appliquée progressivement de façon à atteindre au bout d'un temps déterminé ( $\cong 15$  secondes) la charge fixée, sans chocs ni vibrations, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes.
- On préparera la surface pour éviter toute altération.
- L'épaisseur minimale de la pièce doit être suffisante afin que la pénétration de la pyramide droite ne déforme pas la pièce sinon la mesure ne sera pas fiable [59].

### 3. Essai Rockwell

Il consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur de type normalisé (cône ou bille) et à mesurer l'accroissement rémanent  $h$  de la profondeur de pénétration [12].

Tableau III.5 : donné théorique [65].

Essai de dureté HV	
Avant emboutissage	Après emboutissage
105	117.5



**Figure III.8 :** histogramme de Dureté avant et après déformation.

### III.3.3. Essai de Résilience (K)

L'essai de résilience (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie  $W$  (en joules) absorbée par la rupture [62].

L'essai Charpy est très utilisé industriellement pour caractériser la fragilité des matériaux et Principalement des métaux. Son développement, qui a conduit à l'établissement de normes (ISO 179 pour les plastiques, ISO 1456 pour les aciers, par exemple), résulte de la facilité et de la rapidité de son exécution, mais également de la faible quantité de matière nécessaire Cet essai permet de mesurer la résistance au choc d'un matériau en présence d'une entaille dite en U ou en V, selon sa géométrie [63].

**Résilience en U :** Barreau unifié français (KCU). Eprouvette normalisée dont l'amorce de rupture est en forme de U.

**Résilience en V :** Barreau suivant la méthode Charpy (KCV). Eprouvette normalisée dont l'amorce de rupture est en forme de V.

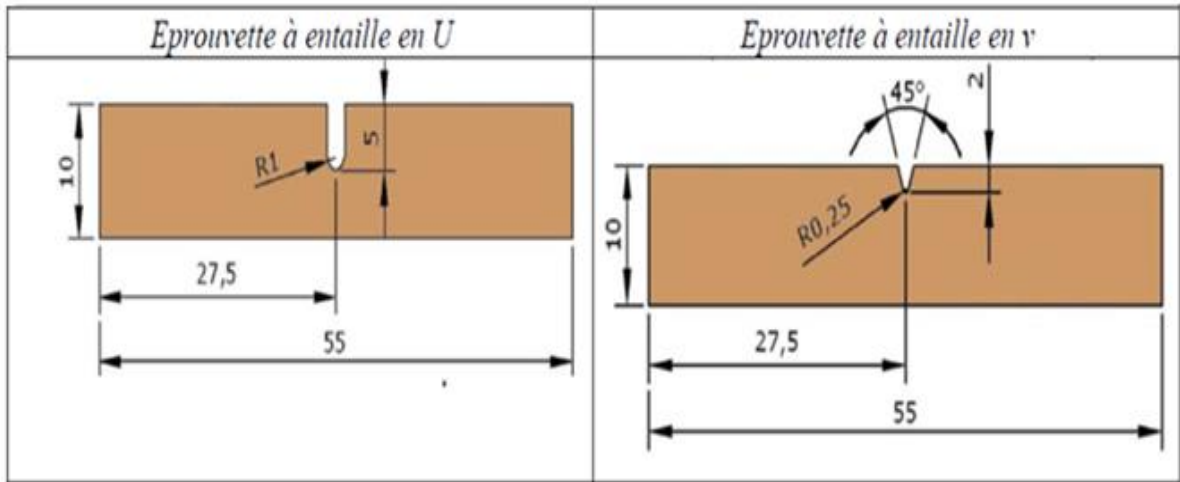


Figure III.9 : éprouvette de résilience à entaille en U et V [62].

Elle est définie par :

$$K = \frac{W}{S} \tag{III.12}$$

W : travaille nécessaire  
 S : section après entaille

➤ **Principe de l'essai**

Un marteau de masse m est fixé à l'extrémité d'un pendule. Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce que le marteau atteint sa position initiale P et on le lâche. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait sa position de départ  $mgh_0$ , h étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre .après la rupture, le marteau remonte .dans son point culminant (hauteur h1), l'énergie cinétique résiduelle s'est de nouveau transformée en énergie potentielle  $mgh_1$ .

L'énergie K dépensée pour rompre l'éprouvette [56] vaut alors:

$$KV = mg (h_0-h) \tag{III.13}$$

La figure (III.17): montre une représentation schématique de cet essai de Charpy : la hauteur initiale du mouton est indiquée par  $h_0$  et la hauteur finale par  $h_1$ .

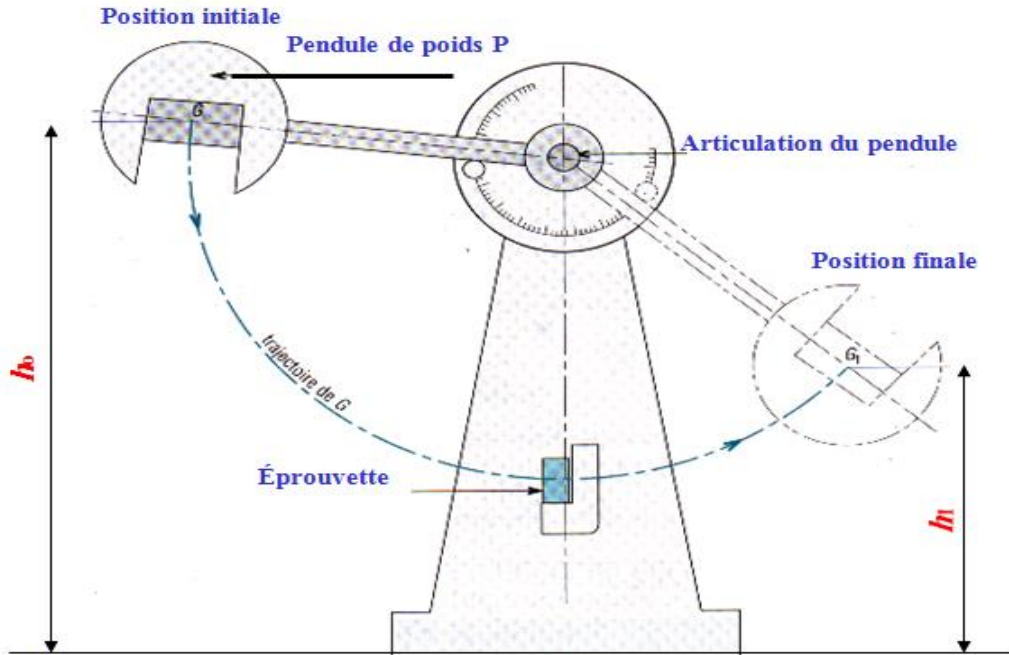


Figure III.10 : Essai de [64].

### III.3.3.1 Conditions de réalisation de l'essai

- L'essai est réalisé à une température ambiante.
- L'éprouvette doit être disposée sur les appuis du mouton de Charpy, de manière à ce que l'arrêt du couteau du mouton vienne la frapper dans le plan de symétrie de l'entaille et sur la surface opposée à celle-ci.
- Pour l'essai normal, l'énergie nominale du mouton doit être de 300 joules.
- Si pendant l'essai, l'éprouvette ne se rompt pas complètement, la valeur obtenue pour la résilience est incertaine, dans ce cas il faudra mentionner : «Eprouvette non rompue par X joules», et on relèvera l'angle de rupture de la pièce [65].

## III.4 Détermination des différents paramètres d'emboutissage

### III.4.1 Détermination du diamètre initial du flan

La taille et la forme du flan sont importantes pour la consommation de matières (dimensionnement correct de réduire les déchets), pour la conception de l'outillage d'emboutissage et l'optimisation du rapport coût-efficacité du processus.



Dans cette étude on considère l'emboutissage cylindrique. Lors de la détermination de la taille du flan circulaire, on suppose que l'épaisseur du matériau reste constante tout au long de l'emboutissage

Dans le cas d'un emboutissage cylindrique le rapport d'emboutissage est donné par la relation (voir figure ci-dessous):

$$F_{SF} = p \cdot S_{SF} \tag{III.14}$$

Où  $p$  est la pression de serrage du serre-flan et  $S_{SF}$  la surface du serre-flan.

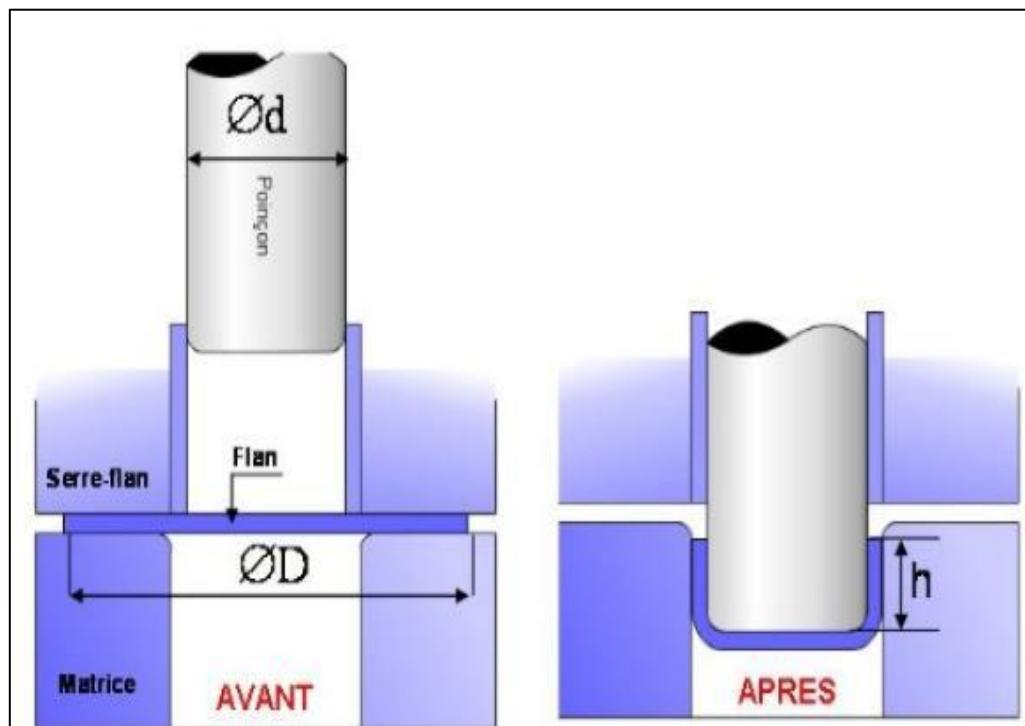


Figure III.11 : Schématisation d'une machine d'emboutissage [66].

Si l'emboutissage s'effectue en une seule passe le rapport vaut :

$$p = (\beta_{actual} - 1)^2 + \frac{d}{200.e} * \frac{Rm}{400} \tag{III.15}$$

Où  $d$  est diamètre du poinçon et  $R_m$ : Résistance à la rupture ;  $e$  : épaisseur.

Le r rapport d'emboutissage pour  $n = 1$

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (\text{III.16})$$

- la longueur du flan D.

$$D = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad (\text{III.17})$$

$h$  : La hauteur

- Si l'emboutissage s'effectue en plusieurs passes, alors le rapport vaut :

$$\beta_{total} = \frac{D\emptyset_{initial\ Flan}}{d\emptyset_{Final\ poincon}} = \frac{D}{dn} \quad (\text{III .18})$$

Le rapport d'emboutissage dépend des paramètres suivants :

- Diamètre initial du flan D (mm)
- Diamètre du poinçon d (mm)
- Coefficient de frottement entre la pièce et le poinçon ( $\mu$ )
- Épaisseur de la tôle e (mm)
- Coefficient d'anisotropie du matériau (r)

Le rapport total d'emboutissage ne doit pas dépasser une valeur limite :

$$\beta_{total} < \beta_{max}(D, d, \mu, r, t, \dots)$$

Pour chaque matériau, le coefficient limite d'emboutissage vaut [66].

*Tableau III.6* : LDR pour chaque matériau [66].

Matériau	Anisotropie (r)	LDR
Zinc alloys	0.4-0.6	1.8
Hot-rolled steel	0.8-1.0	2.3-2.4
Cold-rolled rimmed Steel	1.0-1.4	2.3-2.5
Cold-rolled al-killed Steel	1.4-1.8	2.5-2.6
Aluminum alloys	0.6-0.8	2.2-2.3
Copper and brass	0.6-0.9	2.3-2.4
Ti alloys ( $\alpha$ )	3.0-5.0	2.9-3.0

Les dimensions initiales du flan peuvent être estimées en considérant que la variation de l'épaisseur du flan est faible.

#### III.4.2. Détermination des forces d'emboutissage

- **Effort d'emboutissage sans frottement**

Pour pouvoir mieux juger de l'influence des caractéristiques mécaniques sur la formabilité, nous avons besoin de considérer les forces mises en jeu.

La description de ces efforts n'est pas simple. Il n'existe pas de loi analytique précise permettant de les prévoir, ce qui oblige, soit à utiliser des formules approchées, soit à pratiquer des calculs par simulation numérique. Nous allons raisonner sur des pièces de forme simple (calotte cylindrique).

L'effort nécessaire pour emboutir des pièces cylindriques dépende des diamètres de l'embouti et du flan, de l'épaisseur, du type de matériau, de la pression serre-flan, de la vitesse d'emboutissage, de rayon entrée matrice, du jeu entre poinçon-matrice et de lubrification [66].

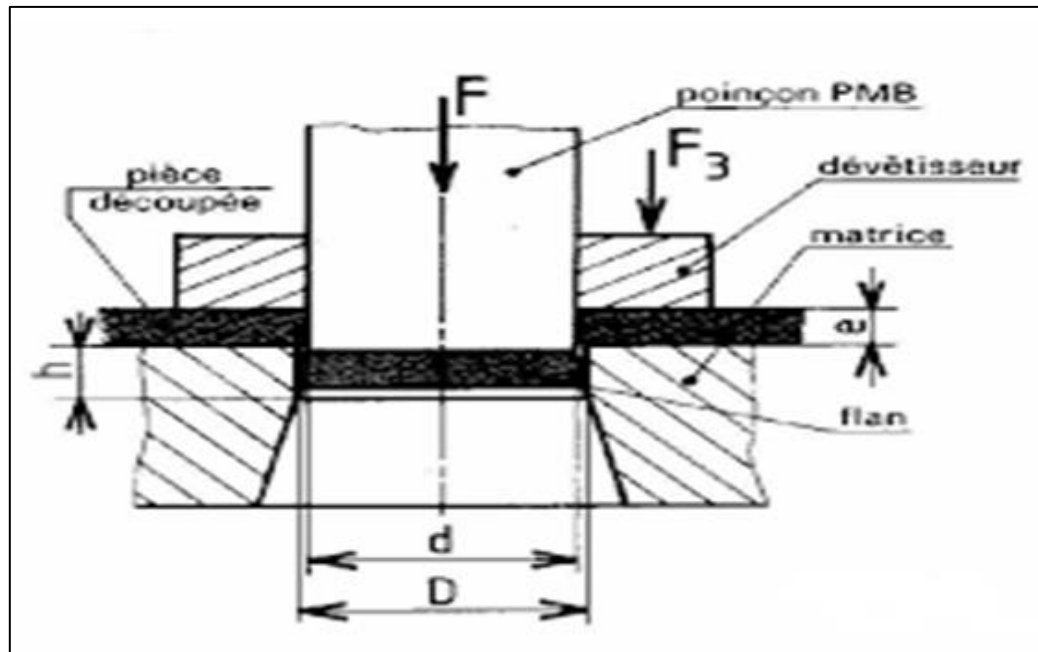


Figure III.12 : Procédé d'emboutissage [67].

-la Force d'emboutissage :

$$F = \pi \cdot d_p \cdot e \cdot Rm \cdot K \quad (\text{III.19})$$

Avec ;

F : la fore d'emboutissage (N)

Rm : est la contrainte limite du matériau (Mpa).

K : coefficient qui dépend du rapport d'emboutissage ;(voir tableau III .8)

e : épaisseur (mm).

$d_p$  : Diamètre du poinçon (mm).

**Tableau III.7:** paramétré K en fonction du rapport  $\beta$  [66].

K	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
$\beta_{actual} = \frac{d}{D}$	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2

- **Effort avec frottement**

Une lubrification adaptée facilite l'écoulement de la tôle entre la matrice, le serre-flan et le poinçon.

Si le frottement est Faible :

- tôle/lubrifiant/serre-flan
- tôle/lubrifiant/anneau d'emboutissage
- tôle/lubrifiant/rayon d'anneau d'emboutissage Élevé :

Entre le poinçon et la paroi de la pièce métallique : pour pouvoir transmettre au maximum la force du poinçon. Ce qui suit s'applique à d'état de stabilité

$$F \leq \pi \cdot \mu \cdot Rm \cdot d_p \cdot e \quad (\text{III.20})$$

Avec :

F : la fore d'emboutissage (N)

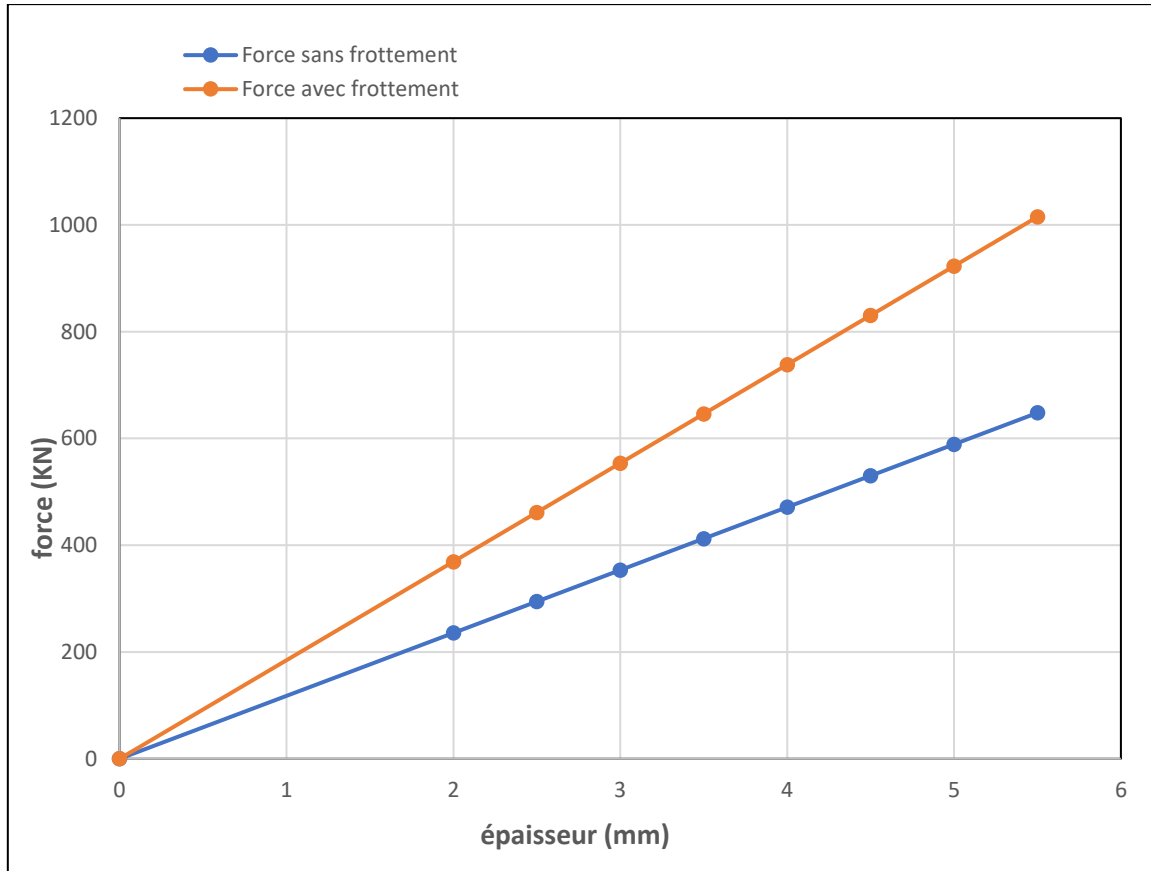
$\mu$  : Coefficient du frottement

Rm : Résistance à la rupture (Mpa).

$d_p$  : Diamètre du poinçon (mm).

e : Epaisseur (mm).

Dans le cas d'un poinçon de petit rayon, il est préférable de ne pas lubrifier voire même d'augmenter la rugosité du poinçon afin d'éviter une forte déformation par expansion localisé [66].



**Figure III. 13** : Effort d'emboutissage en fonction de l'épaisseur.

### III.4.3 Détermination des forces de serrage du serre-flan

- La force de serrage est estimée par l'expression :

$$F_{SF} = p \cdot S_{SF}$$

Où  $p$  est la pression de serrage du serre-flan et  $S_{SF}$  la surface du serre-flan.

La présence du serre-flan ne s'impose que si :

$$\left\{ \begin{array}{l} d < 0.95D \\ \text{ou} \\ e < 0.02 (D - d) \end{array} \right\} \quad (\text{III.21})$$

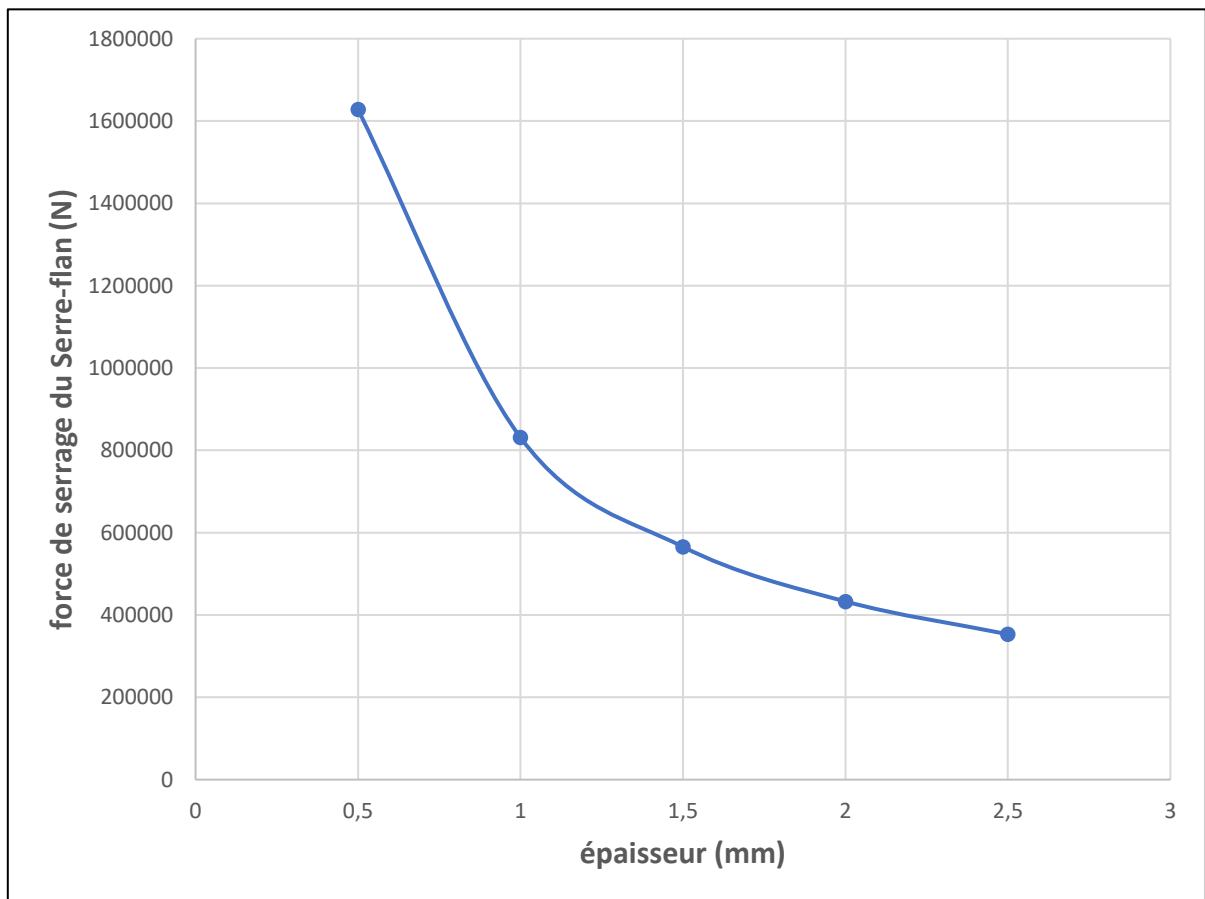
Pour un embouti cylindrique on trouve l'équation (III.14):

$$p = (\beta_{actual} - 1)^2 + \frac{d}{200 \cdot e} * \frac{R_m}{400}$$

Où  $d$  est diamètre du poinçon et  $R_m$ : Résistance à la rupture ;  $e$  : épaisseur.

La surface  $S_{SF}$  du serre flan est estimée dans le cas d'un emboutissage cylindrique [66] :

$$S_{SF} = (D^2 + de^2) \cdot \frac{\pi}{4} \quad (III.22)$$



**Figure III.14** : force de serrage du Serre-flan en fonction de l'épaisseur.

#### III.4.4 Détermination du diamètre de la matrice

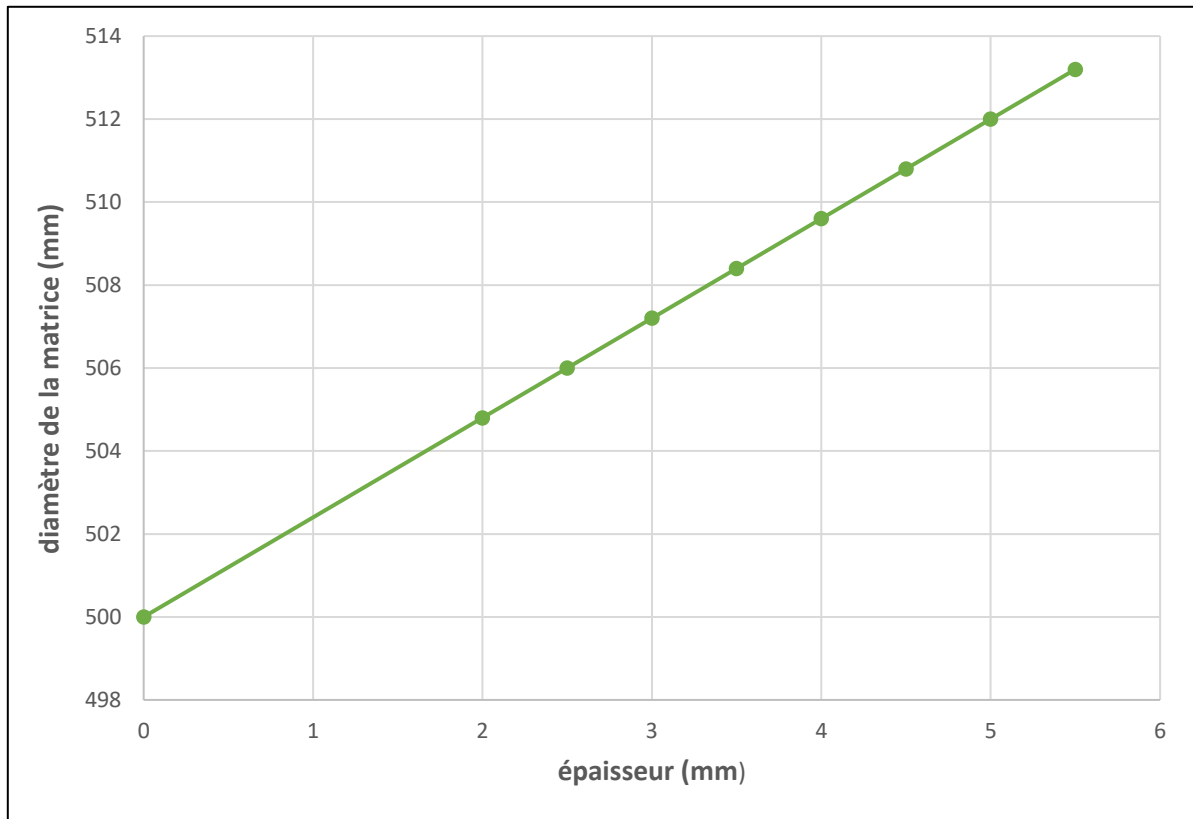
Le diamètre de la matrice est estimé par la relation [66] :

$$dm = d + 2\delta \quad (III.23)$$

Avec

$$\delta = (1.3 \text{ à } 1.5)e$$

(III.24)



**Figure III.15** : diamètre de la matrice en fonction de l'épaisseur.

#### III.4.5 Détermination du jeu poinçon-matrice

L'augmentation du jeu entre poinçon et matrice a une influence favorable sur l'effort du poinçon, mais d'autre part entraîne des inconvénients qui sont les suivants :

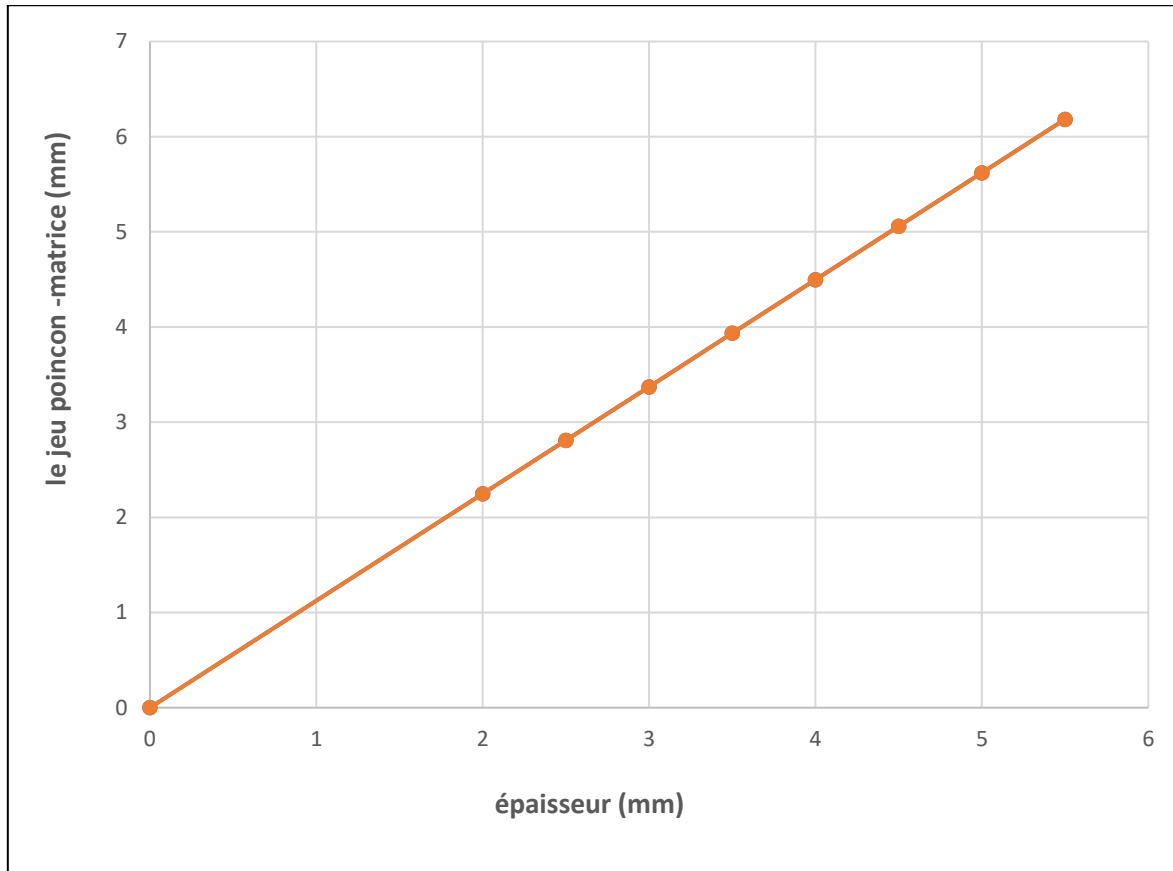
- l'augmentation sensible du jeu amène à la détérioration du profil de la paroi
- De plus, si le jeu est trop grand, il peut se produire une déviation du poinçon d'où l'apparition de languettes sur le bord de l'embouti.
- Des plis peuvent se former sur la paroi de l'embouti.

La relation empirique suivante permet de calculer ce jeu [75] :

$$J = e \sqrt{\frac{D}{d_p}} \quad (\text{III.25})$$



Le jeu  $J$ , est la moitié de la différence entre le diamètre du diamètre sur la matrice  $d_m$  et le diamètre du poinçon  $d_p$ .



**Figure III.16** : jeu poinçon-matrice en fonction de l'épaisseur.

#### III.4.6 Détermination du rayon sur la matrice

Des rayons matrice trop petits induisent des déformations importantes du flan. Des rayons trop grands induisent la formation des plis par conséquent le serre-flan n'est plus efficace. Le rayon efficace sur la matrice est estimé par la relation suivante [66] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Acier} \\ rm = 0.8\sqrt{e.(D - d)} \\ \\ \text{Alu} \\ rm = 0.9\sqrt{e.(D - d)} \end{array} \right\} \quad (\text{III.26})$$

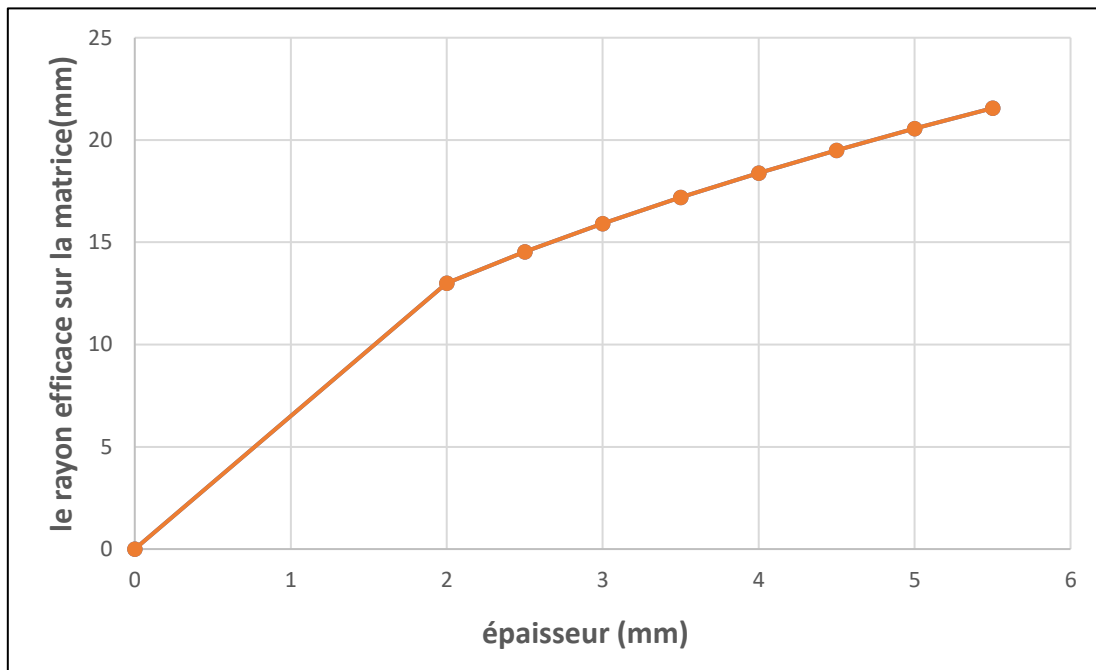
Dans notre cas le matériau étudié si l'acier Avec ;

$D$  : diamètre de flan (mm)

$d$  : diamètre de l'embouti (mm)

$r_m$  : Rayon sur la matrice (mm)

$e$  : épaisseur (mm)

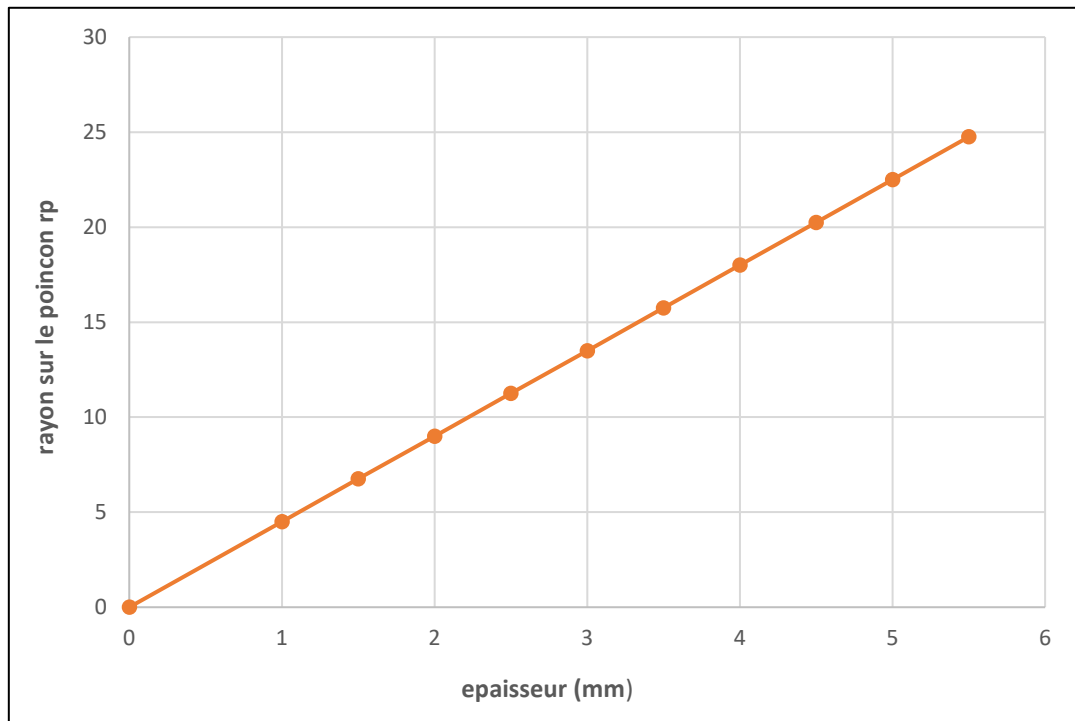


**Figure III.17** : rayon efficace sur la matrice en fonction de l'épaisseur.

### III.4.7 Détermination du rayon sur le poinçon

La partie de la tôle qui se trouve en contact avec le rayon trop faible de poinçon subie une diminution d'épaisseur, après emboutissage, le défaut se retrouve sur la surface latérale de l'embouti. Le rayon sur le poinçon est estimé par [66].

$$Rp = (4 \text{ à } 5). e \quad (\text{III.27})$$



**Figure III.18** : rayon sur le poinçon en fonction de l'épaisseur.

### III.4.8. Détermination de l'énergie d'emboutissage

L'énergie nécessaire pour une opération d'emboutissage (double action) est le produit de la force de pression d'emboutissage par le déplacement du poinçon (h) :

$$W = (F \cdot \alpha) \cdot h \quad (\text{III.28})$$

Le coefficient ( $\alpha$ ) dépend du rapport d'emboutissage (*Tableau III.10*) [66].

Tableau III.8 : Coefficient Beta-alpha [66].

$\beta$ - actual	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	0.25
$\alpha$	0.8	0.77	0.74	0.70	0.67	0.64

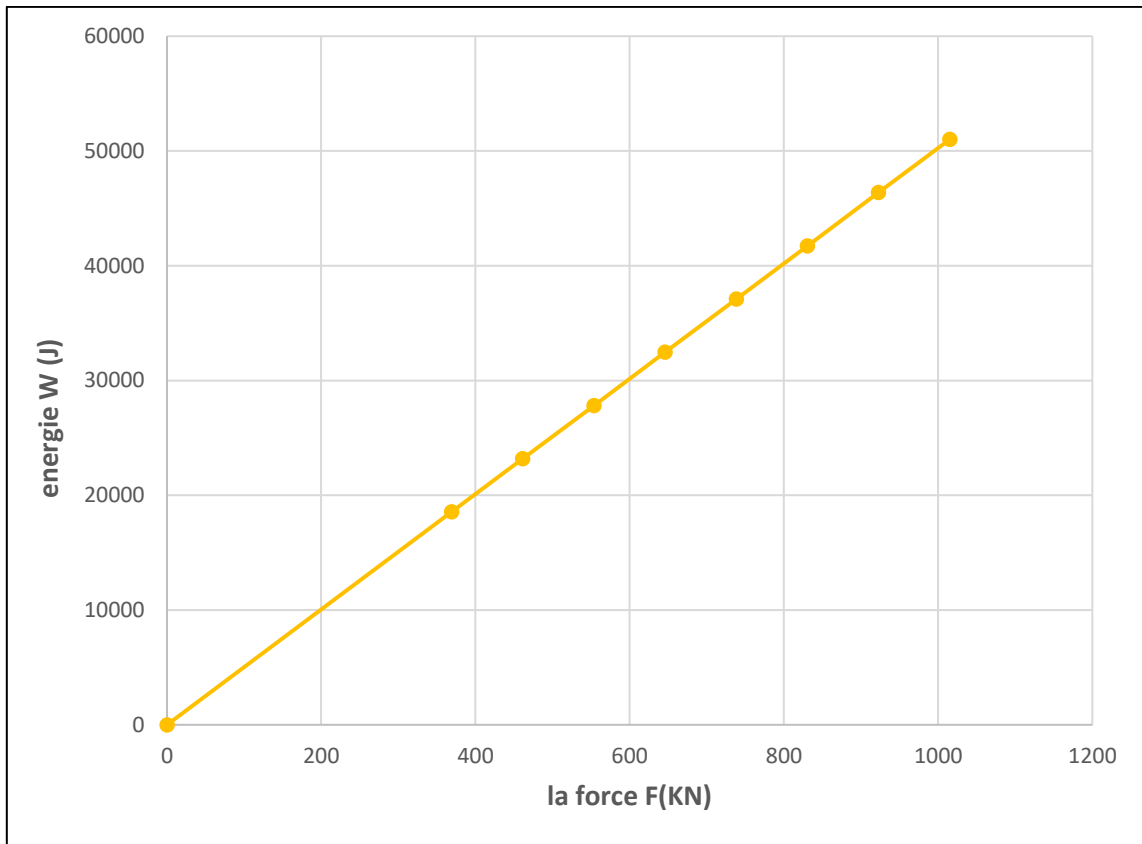


Figure III.19 : l'énergie d'emboutissage en fonction de la force.

III.4.9. Variation de l'épaisseur par apport à l'épaisseur initiale

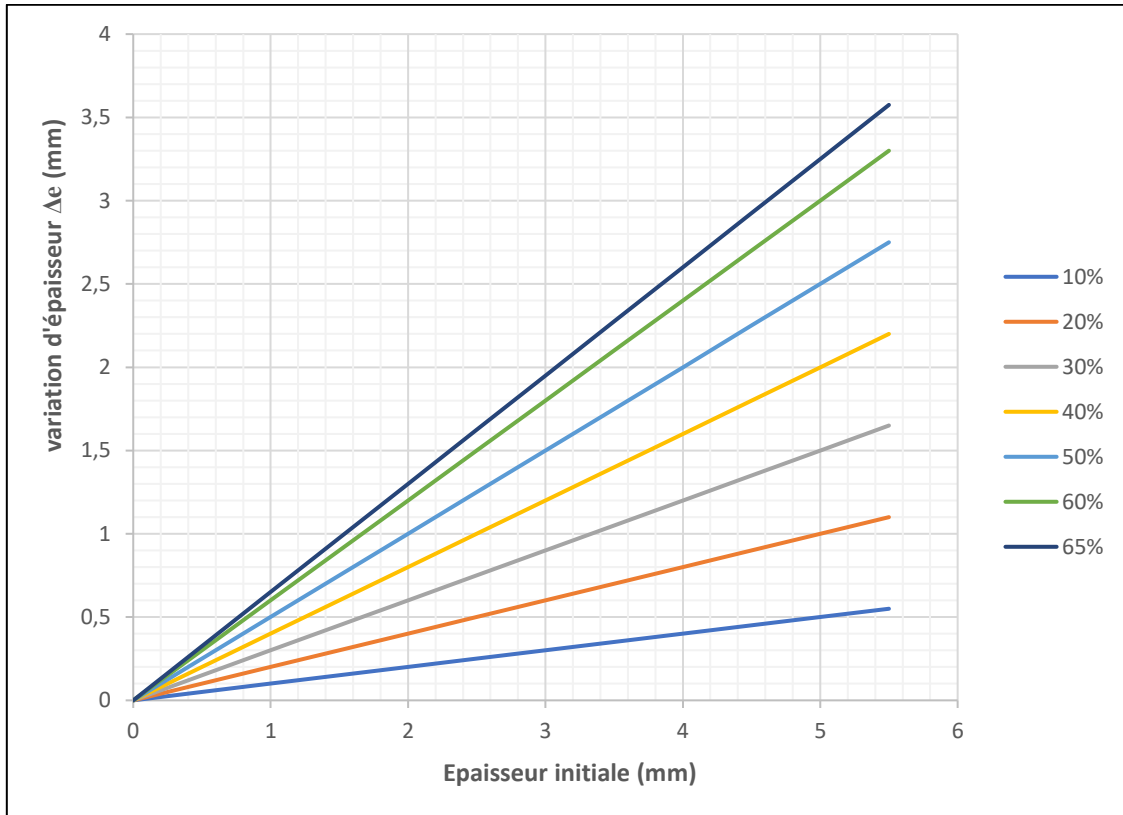


Figure III.20 : variation de l'épaisseur en fonction de l'épaisseur initiale.

III.4.10 réduction des diamètres

Nous prenons deux types d'acier (aciers ordinaire et aciers ferritique) pour déterminer les diamètres pour chaque passe, par la relation suivants

$$d_1 = m_1 \cdot D_f \tag{III.29}$$

Et ainsi de suite jusqu'au diamètre n° 4:

$$d_4 = m_2 \cdot d_3 \tag{III.30}$$

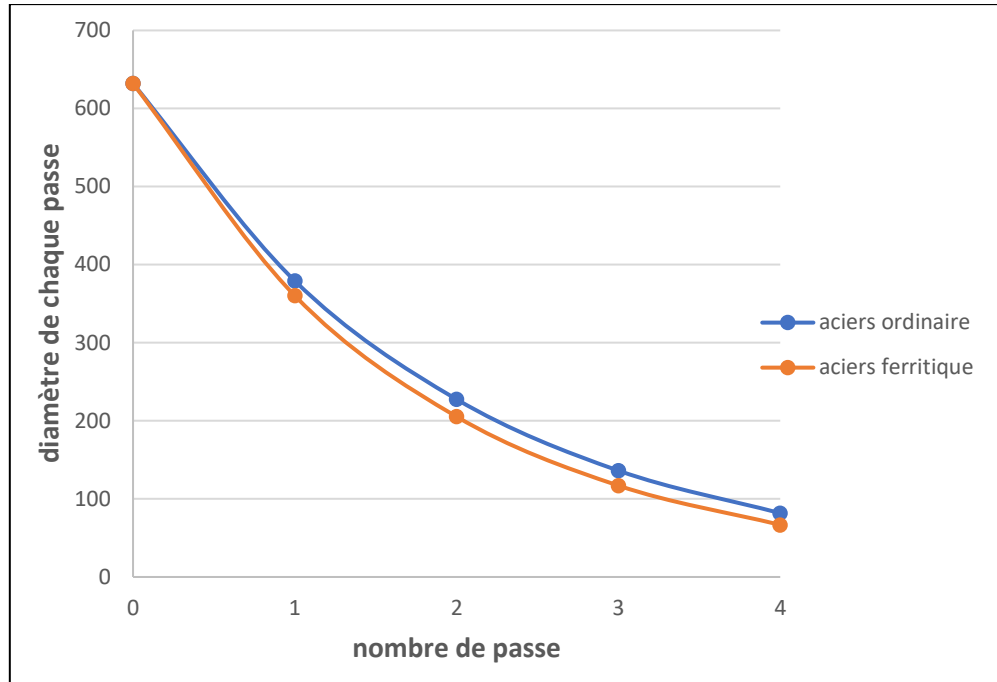


Figure III.21 : Diamètre en fonction de nombre de passe

III.5. Courbe limite d'emboutissage

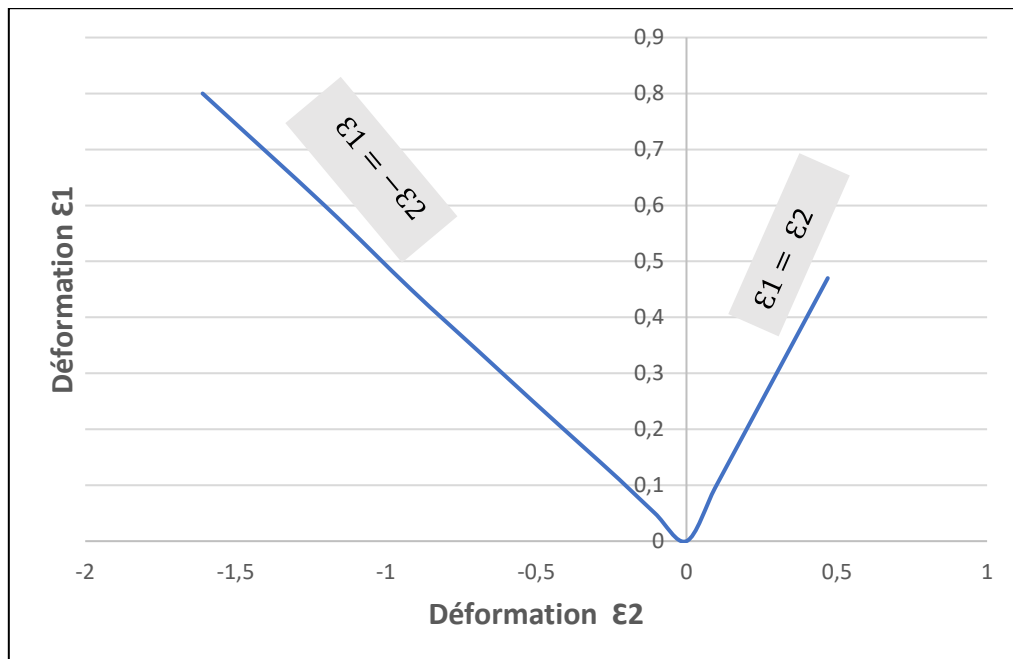


Figure III.22 : courbe limite d'emboutissage.

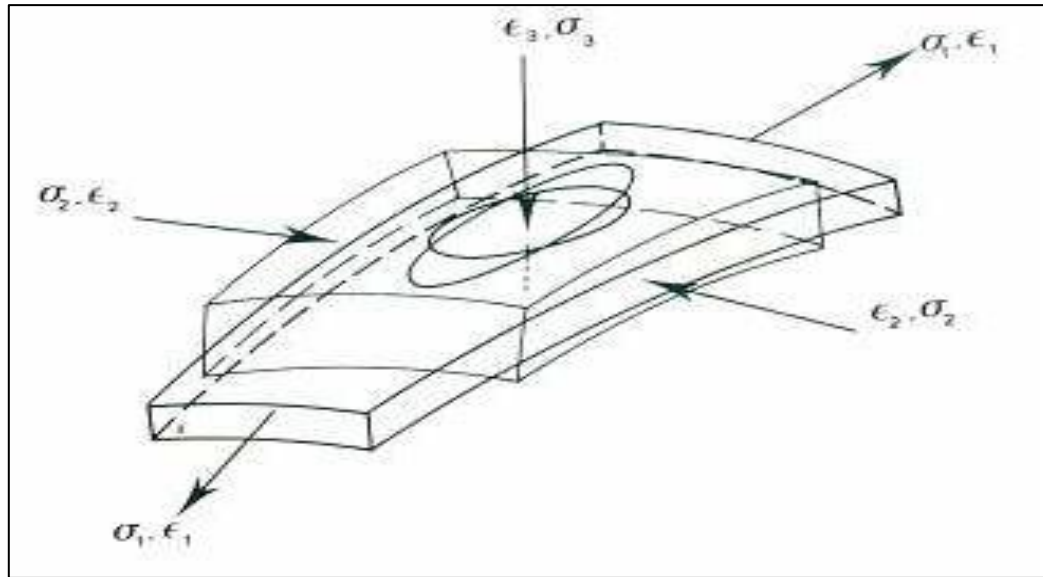


Figure III.23 : Etats de contrainte et de déformation [69].

## III.6. Initiation à la simulation numérique par la méthode des éléments finis avec Freecad.

### III.7.1. A propos de Freecad

Free CAD est un modéleur paramétrique 3D de CAO d'utilisation générale. Free CAD est directement destiné à l'ingénierie mécanique et à la conception de produits mais s'adapte également à une gamme plus large d'utilisations autour de l'ingénierie, comme l'architecture, l'analyse par éléments finis, l'impression 3D et d'autres tâches [70].

Free CAD propose des fonctionnalités similaires à CATIA, ou Solid Edge. Il vise la conception paramétrique avec une architecture modulaire qui permet l'ajout facile de fonctionnalités supplémentaires sans modifier le cœur du programme.

Free CAD est aussi multiplateforme, et fonctionne présentement parfaitement sous Windows, Linux/Unix et Mac OSX, avec la même apparence et les mêmes fonctionnalités sous toutes les plateformes.

L'atelier FEM fournit un flux de travail moderne d'analyse par éléments finis (FEA) pour Free CAD. Cela signifie principalement que tous les outils permettant d'effectuer une analyse sont combinés dans une seule interface utilisateur graphique (GUI).

Les étapes pour effectuer une analyse d'éléments finis sont les suivantes :

- 1) Prétraitement : configuration du problème d'analyse.
- 2) Modélisation de la géométrie: création de la géométrie avec Free CAD, ou importation depuis une autre application.
- 3) Créer une analyse.
  - ❖ Ajout de contraintes de simulation telles que des charges et des supports fixes au modèle géométrique.
  - ❖ Ajout de matériaux aux parties du modèle géométrique.
  - ❖ Créer un maillage d'éléments finis pour le modèle géométrique, ou l'importer d'une autre application.
- 4) Résolution : exécution d'un solveur externe à partir de Free CAD.
- 5) Post-traitement : visualiser les résultats de l'analyse depuis Free CAD, ou exporter les résultats pour qu'ils puissent être post-traités avec une autre application.

**Tableau III.9** : Données géométriques et propriétés mécaniques de la structure emboutis.

Donnée géométrique de ¼ de la structure circulaire				
Epaisseur (mm)		Diamètre total du flan (mm)		
2		100		
Donnée mécaniques de ¼ de la structure circulaire				
Contraint appliqué (Mpa)	Module de young (GPa)	Densité (Kg.m <sup>-3</sup> )	Coefficient de Poisson	Limite élastique (MPa)
200	210	7800	0.3	210



III.6.2. simulation de ¼ de la structure circulaire

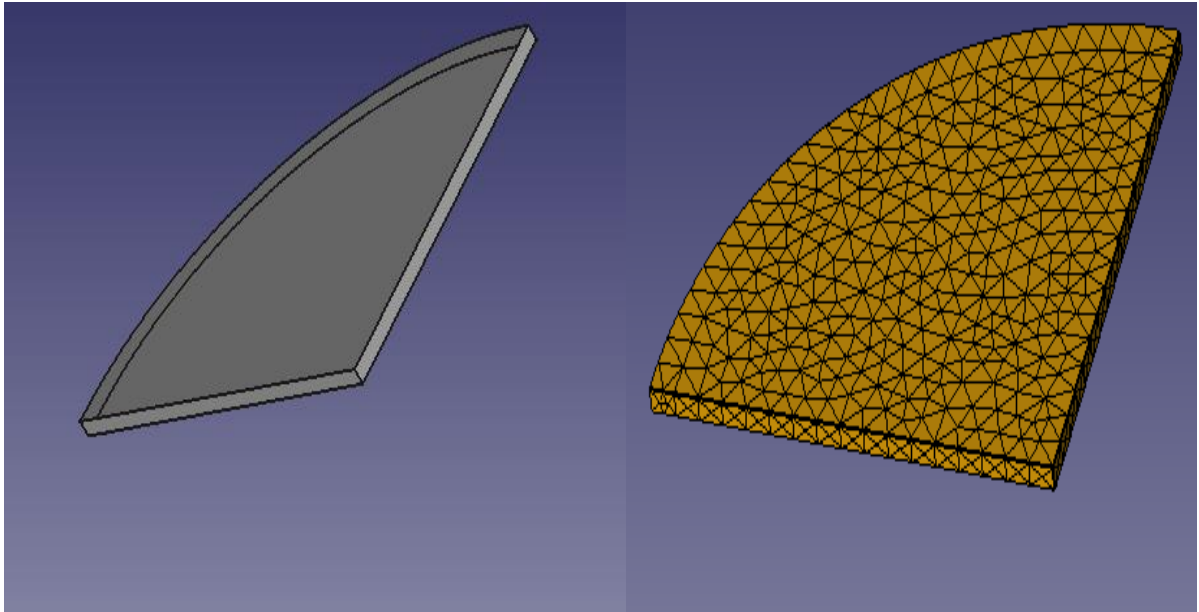


Figure III.24 : conception et maillage du ¼ de la structure du flan.

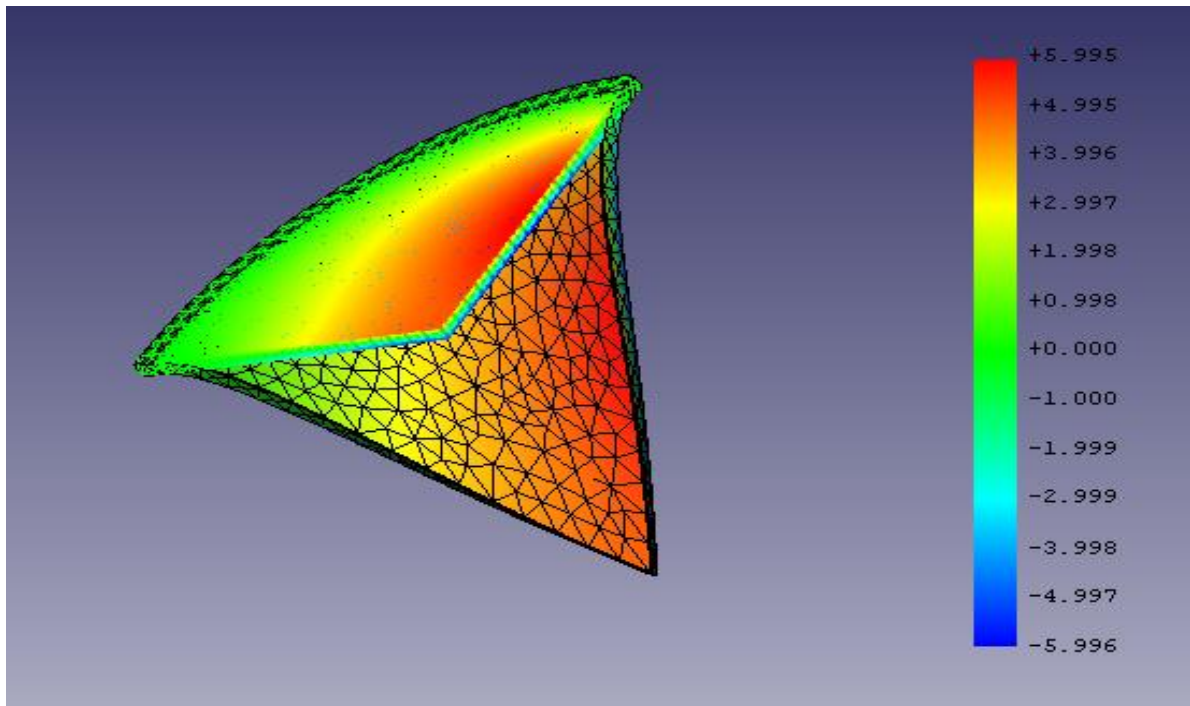
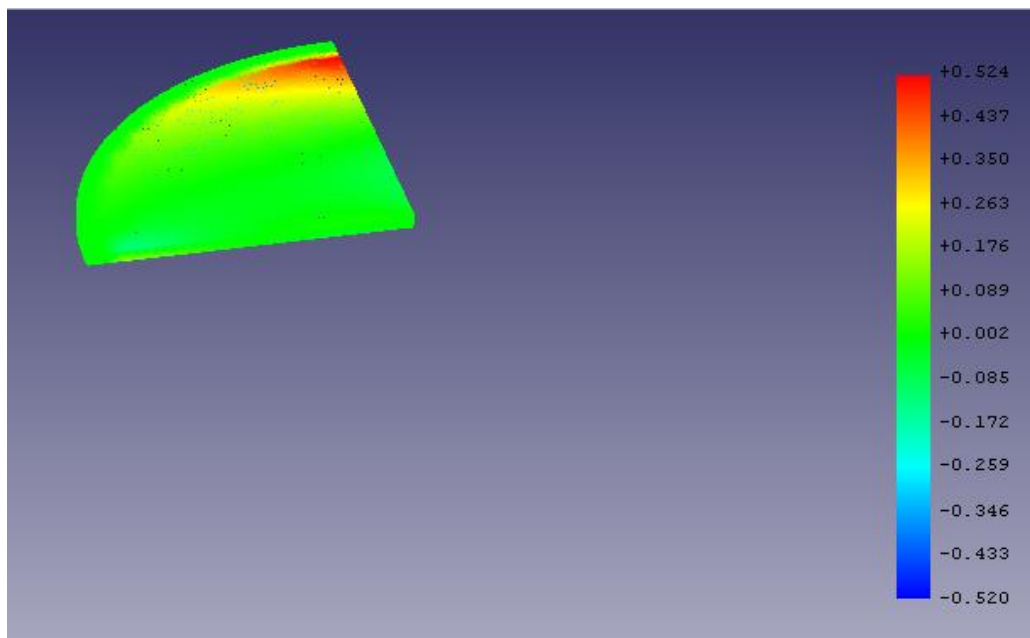
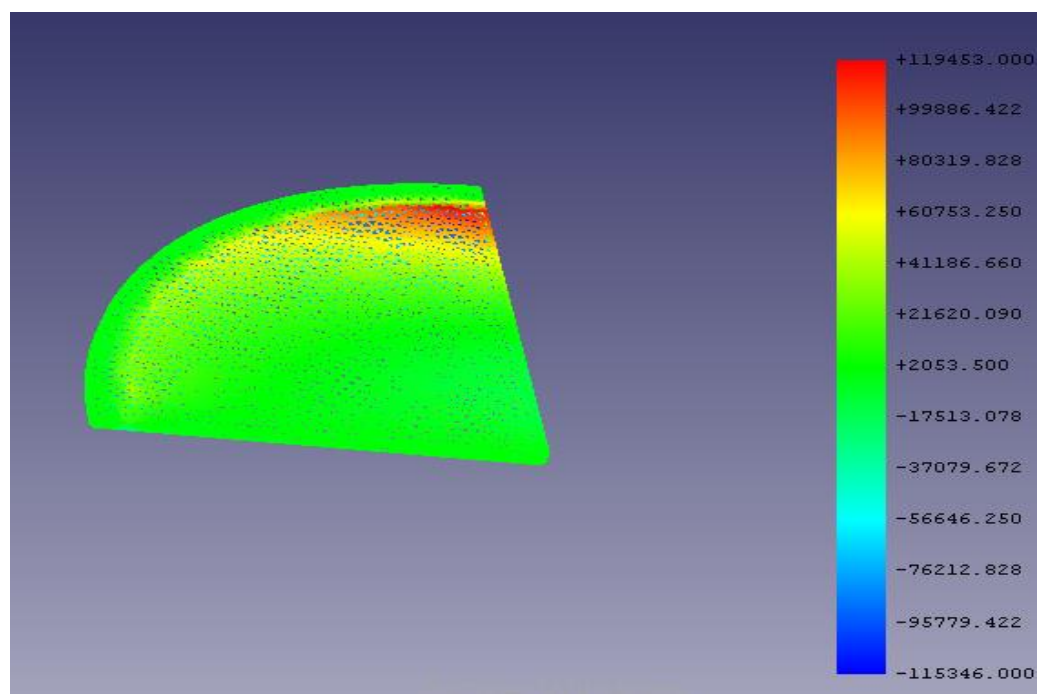


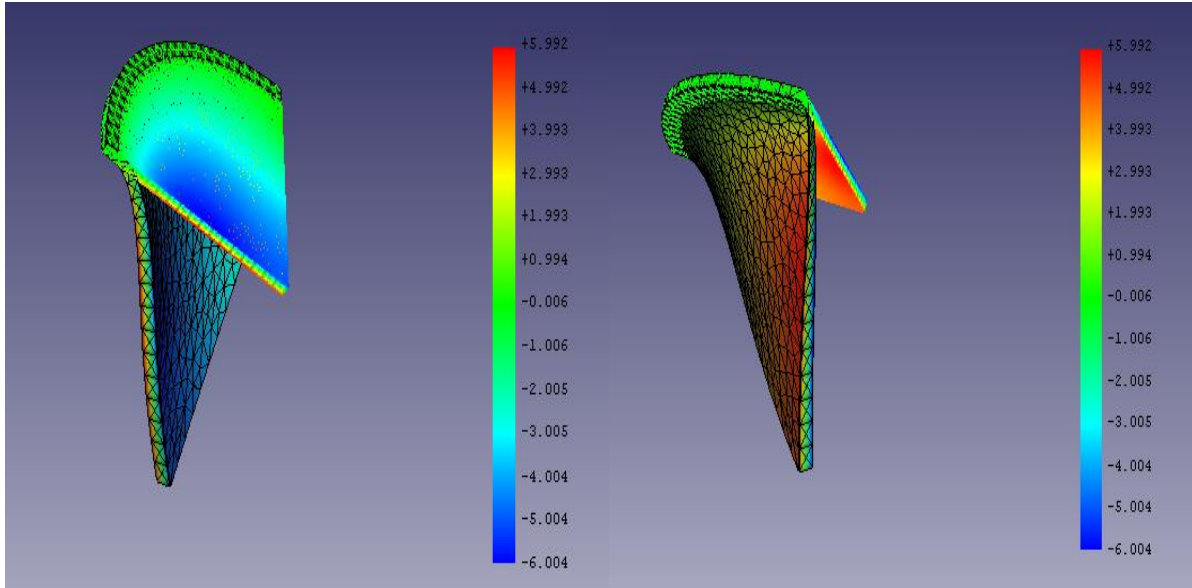
Figure III.25 : Déplacement suivant l'axe X du 1 /4 de structure.



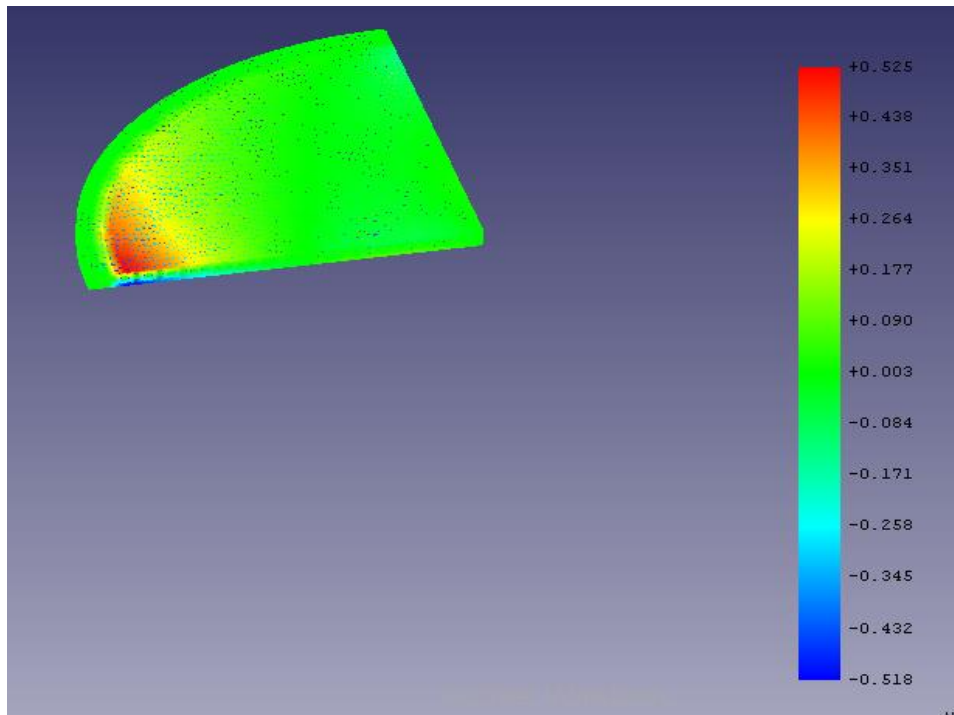
**Figure III.26:** Déformation suivant l'axe X du 1 /4 de structure.



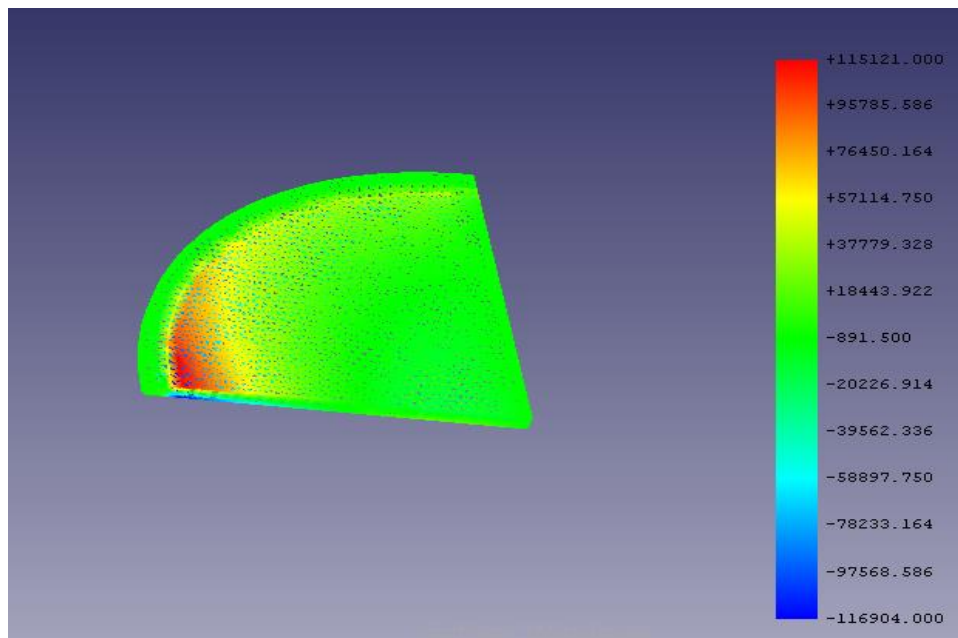
**Figure III.27 :** Contrainte suivant l'axe X du 1 /4 de structure.



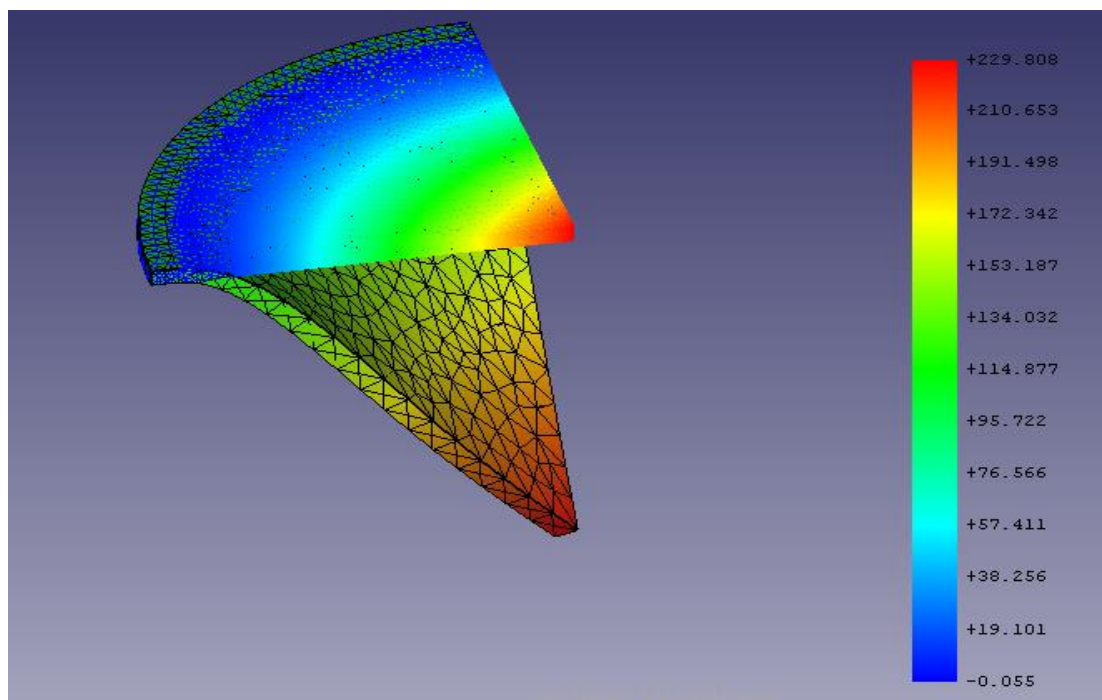
**Figure III.28** : Déplacement suivant l'axe Y du 1 /4 de structure.



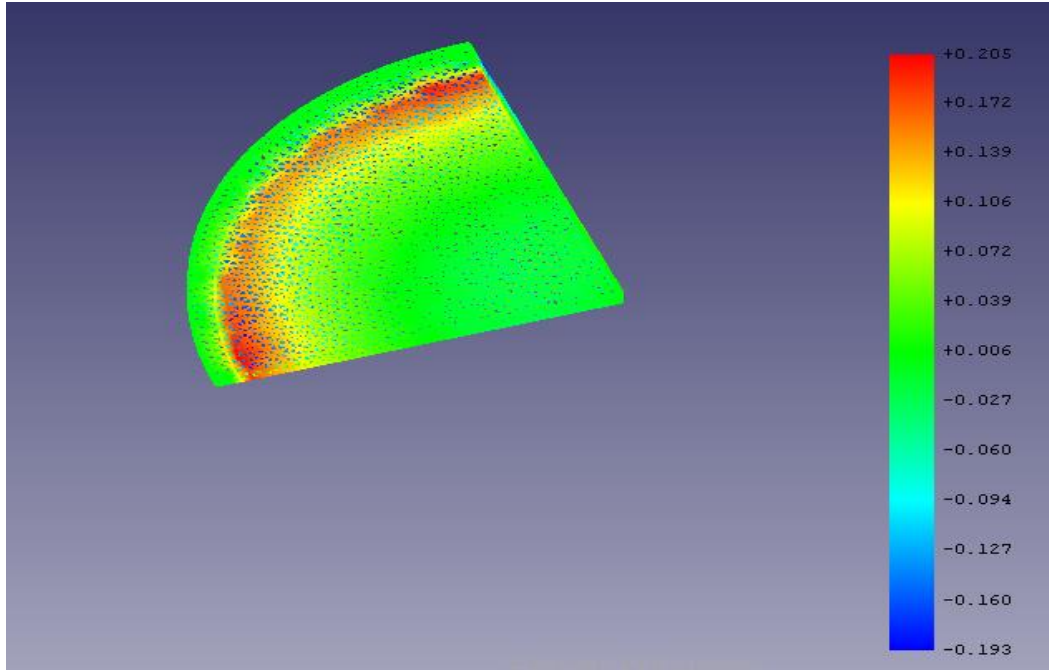
**Figure III.29** : déformation suivant l'axe Y du 1 /4 de structure.



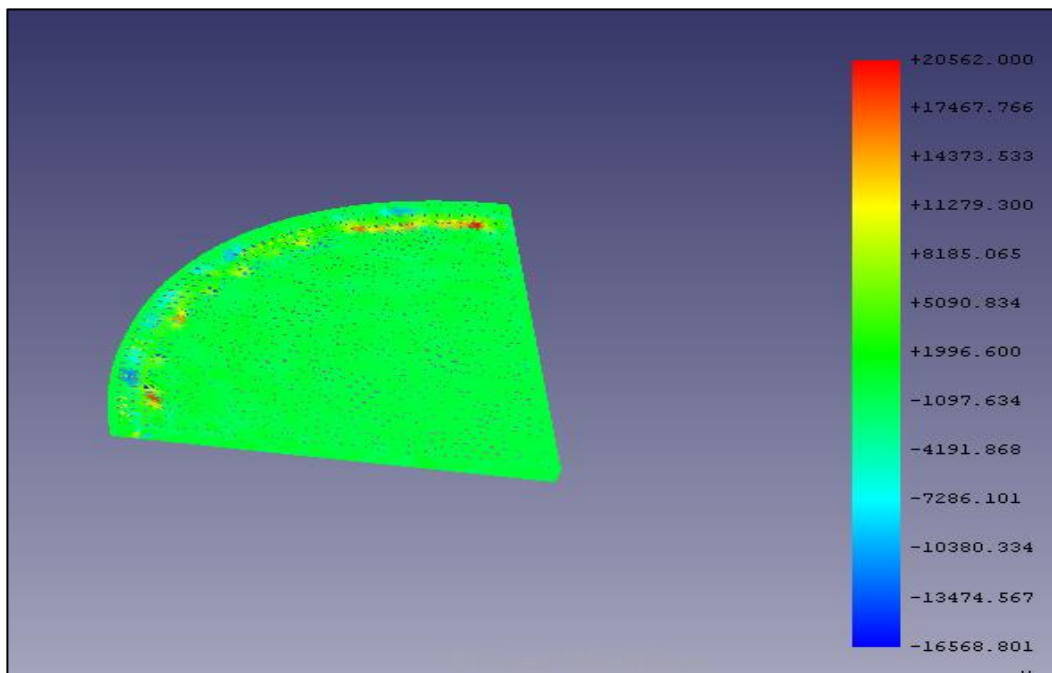
**Figure III.30** : Contrainte suivant l'axe Y du 1 /4 de structure.



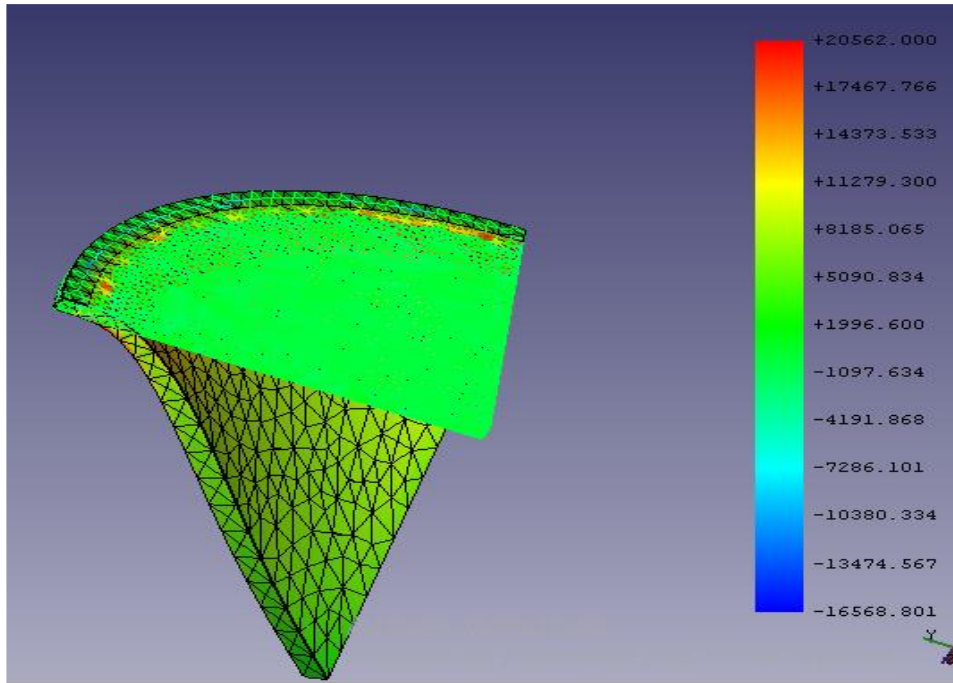
**Figure III.31** : Déplacement suivant l'axe Z du 1 /4 de structure.



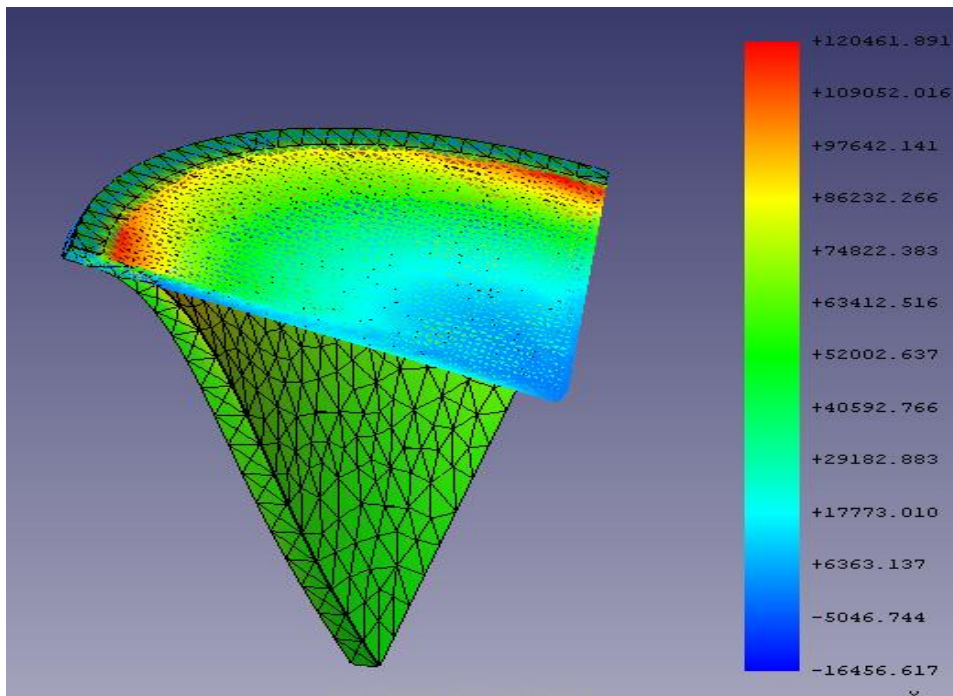
**Figure III.32** : Déformation suivant l'axe Z du 1 /4 de structure.



**Figure III.33** : Contrainte suivant l'axe Z du 1 /4 de structure.

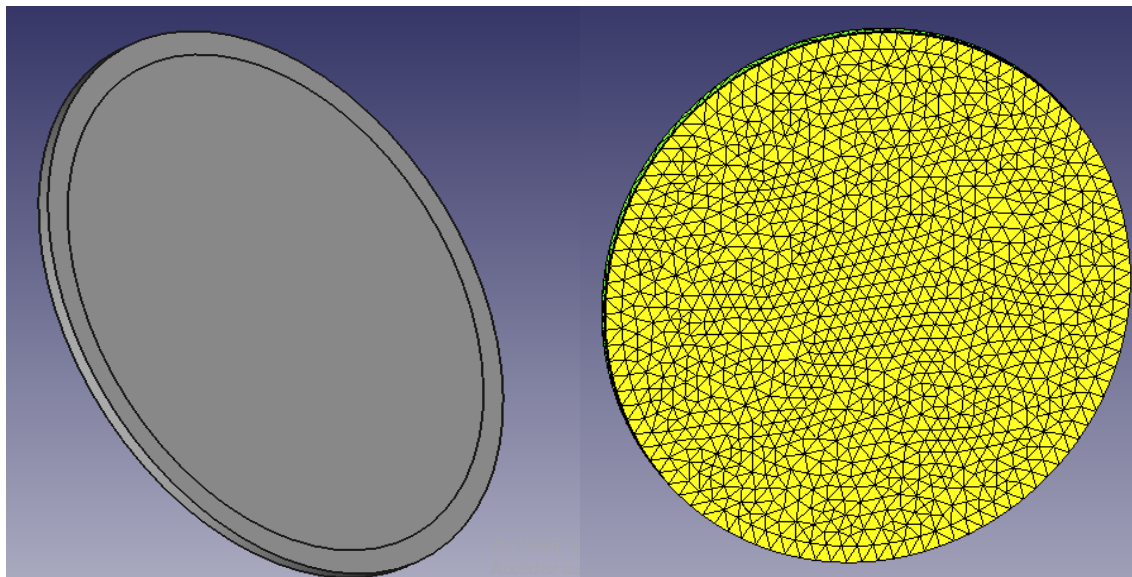


**Figure III.34** : Contrainte Von mises du  $\frac{1}{4}$  de la structure considérée.

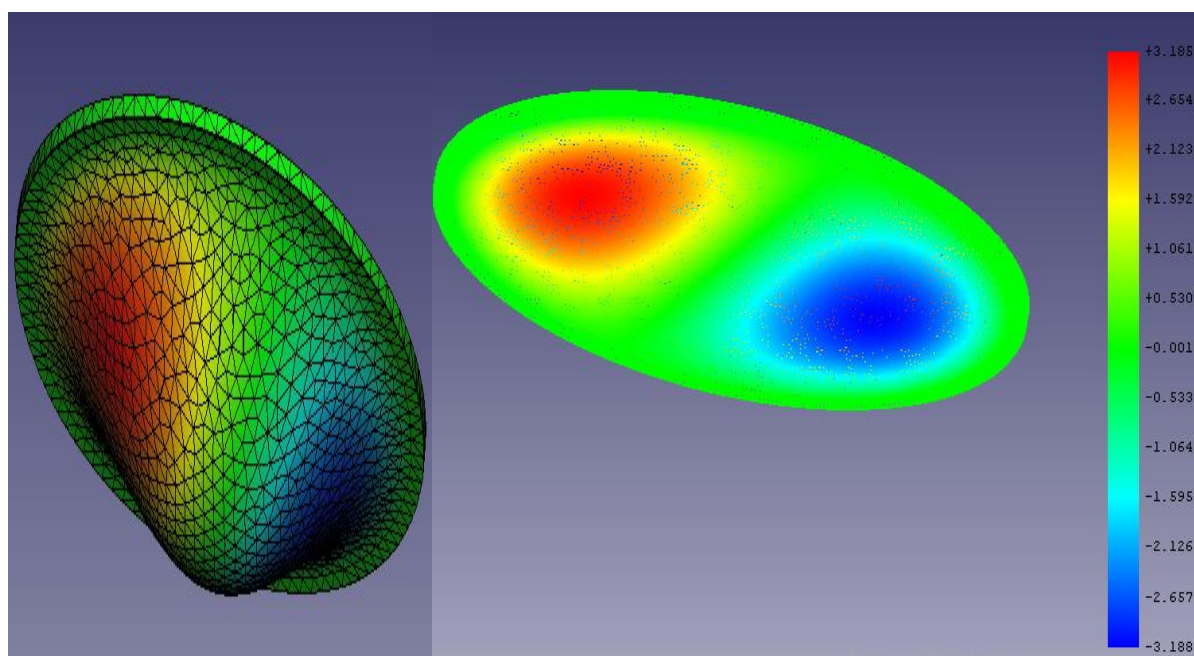


**Figure III.35** : Contrainte maximale du  $\frac{1}{4}$  de la structure considérée.

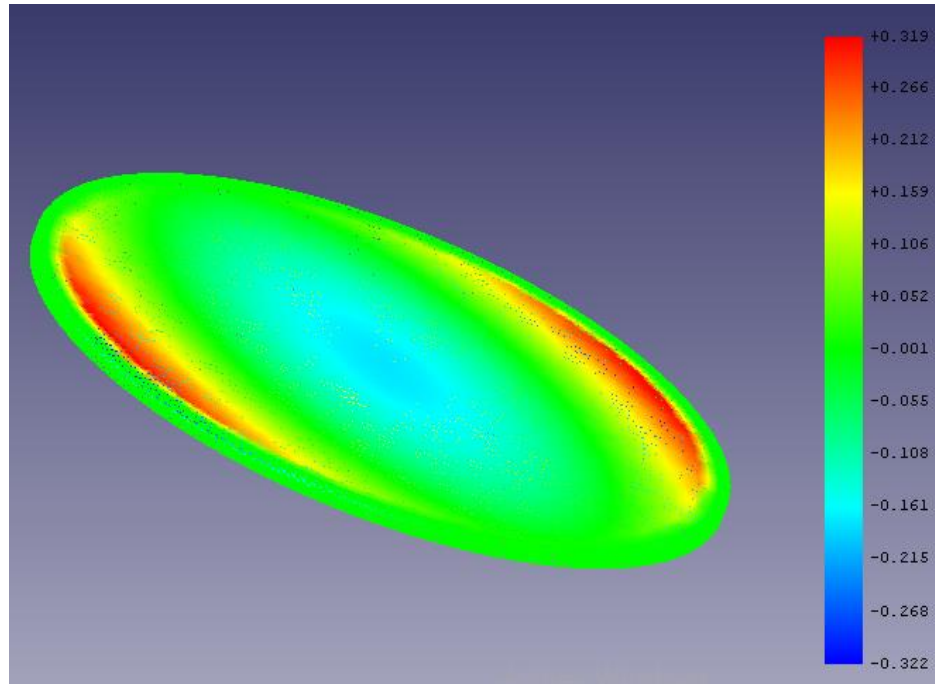
## III.6.3. simulation de la structure finale par symétrie



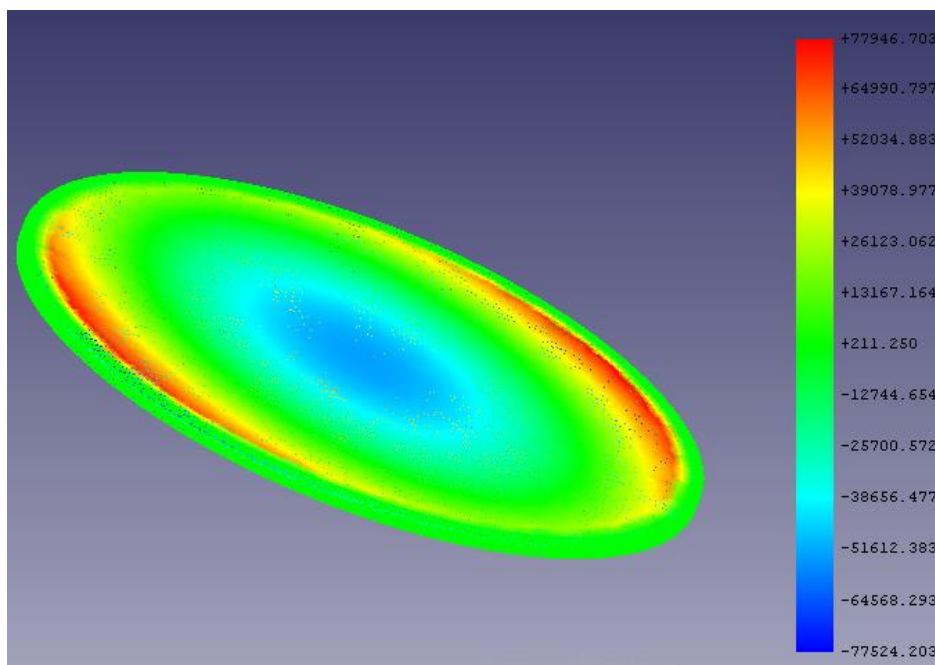
**Figure III.36** : conception et maillage de la structure cylindrique.



**Figure III.37** : Déplacement suivant l'axe X.

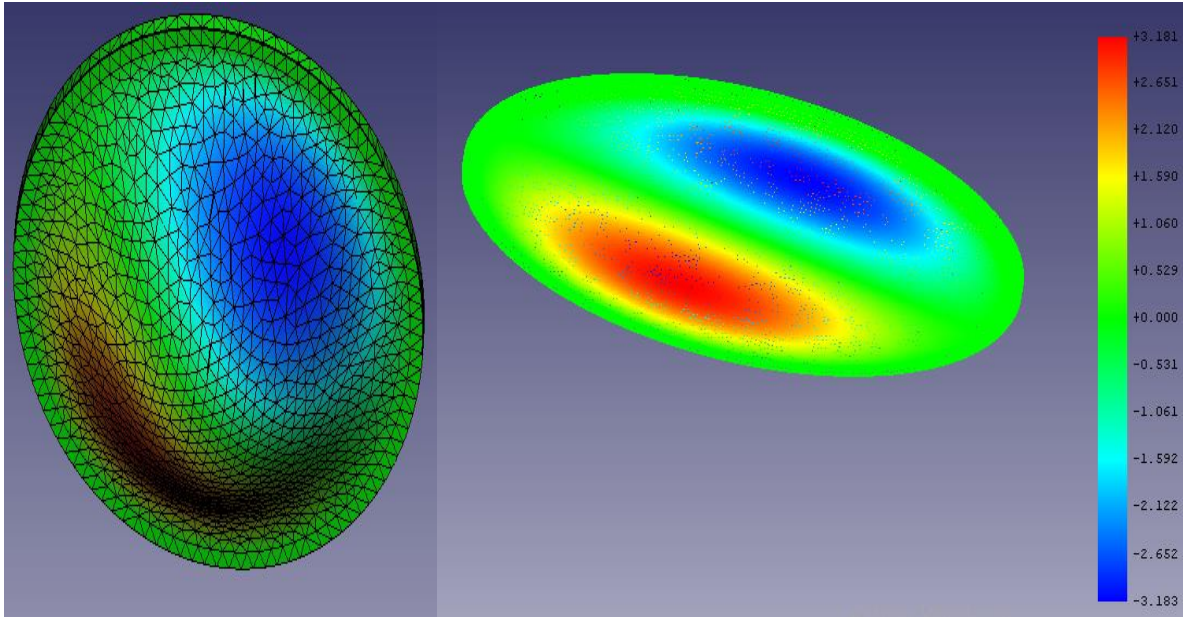


**Figure III.38** : Déformation suivant l'axe X.

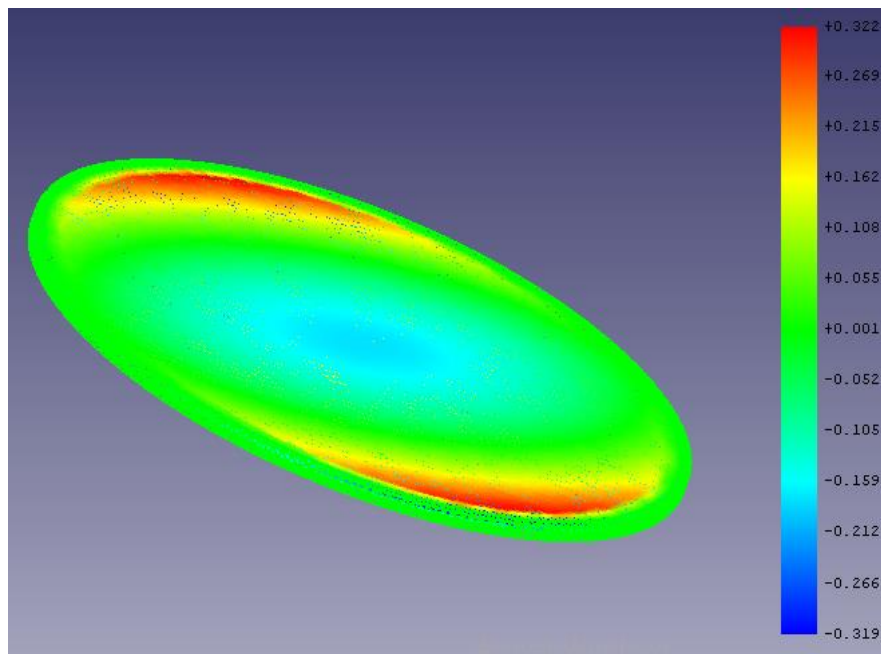


**Figure III.39** : Contrainte suivant l'axe X.





**Figure III.40** : Déplacement suivant l'axe Y.



**Figure III.41** : Déformation suivant l'axe Y.

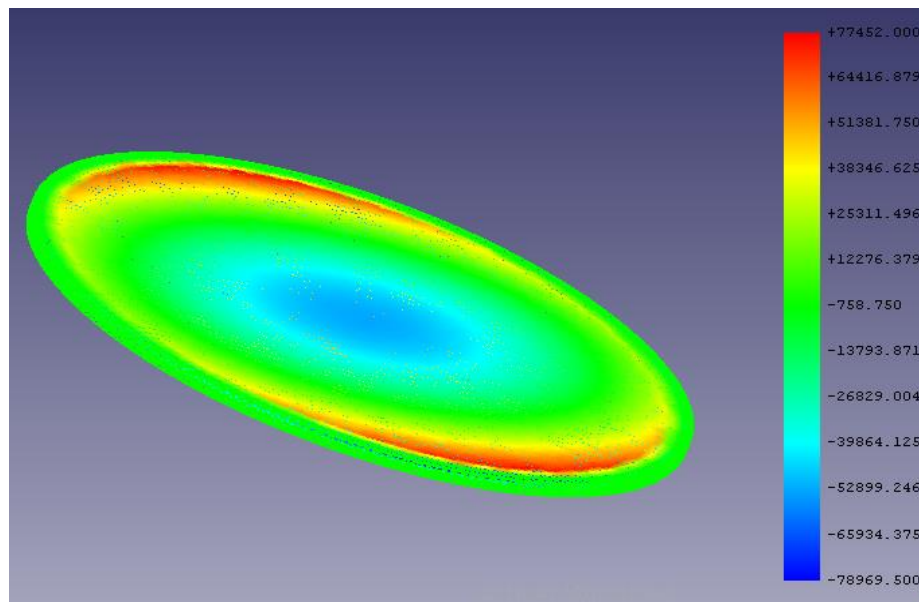


Figure III.42 : Contrainte suivant l'axe Y.

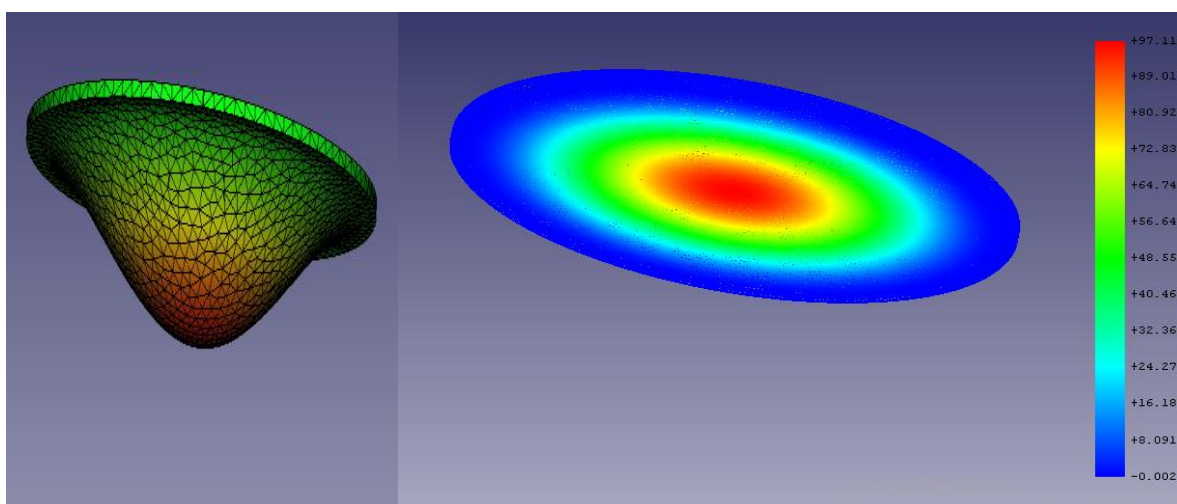
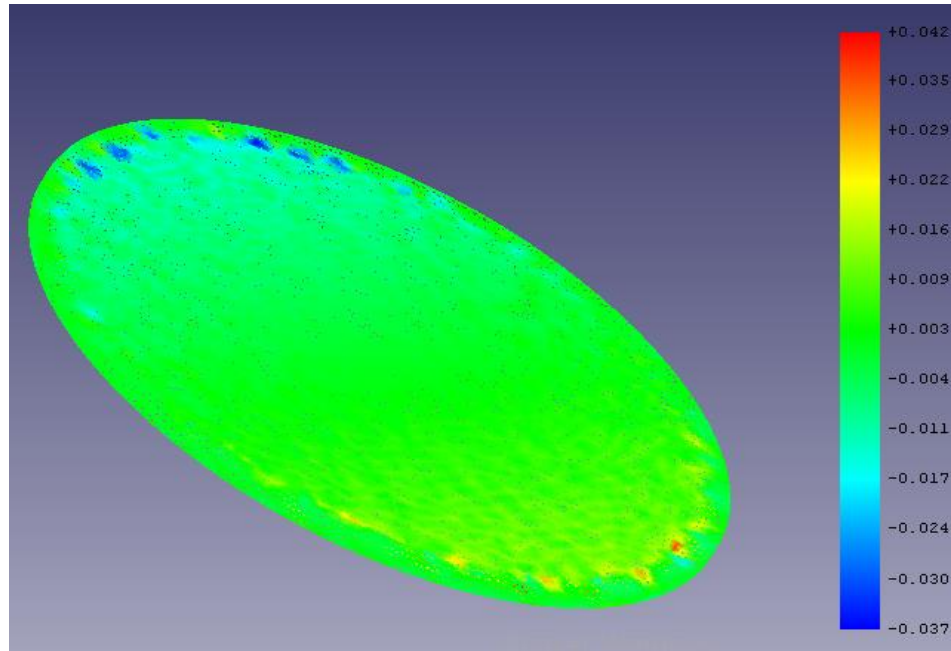
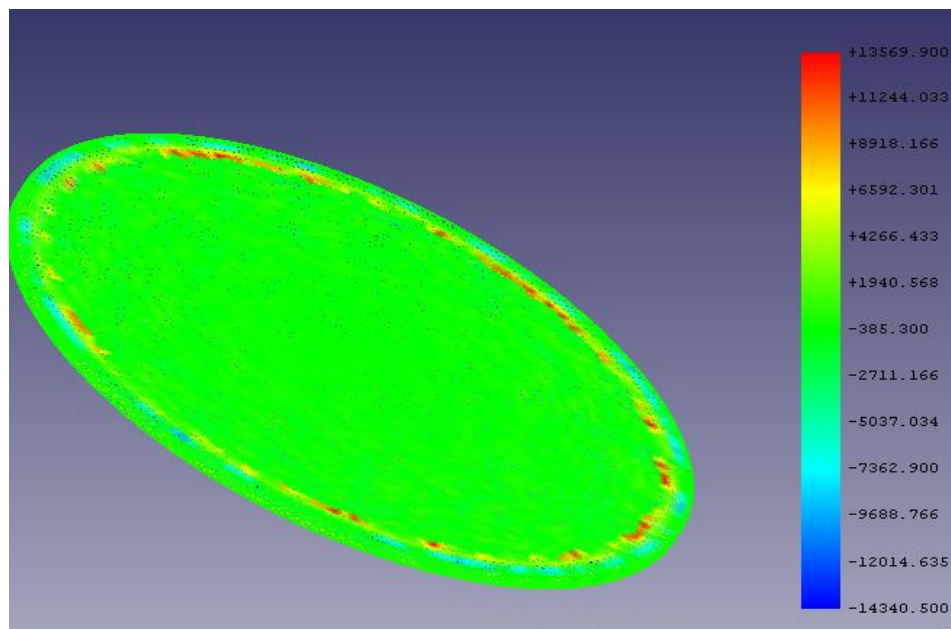


Figure III.43: Déplacement suivant l'axe de chargement Z.



**Figure III.44** : Déformation suivant l'axe Z.



**Figure III.45** : Contrainte suivant l'axe Z.

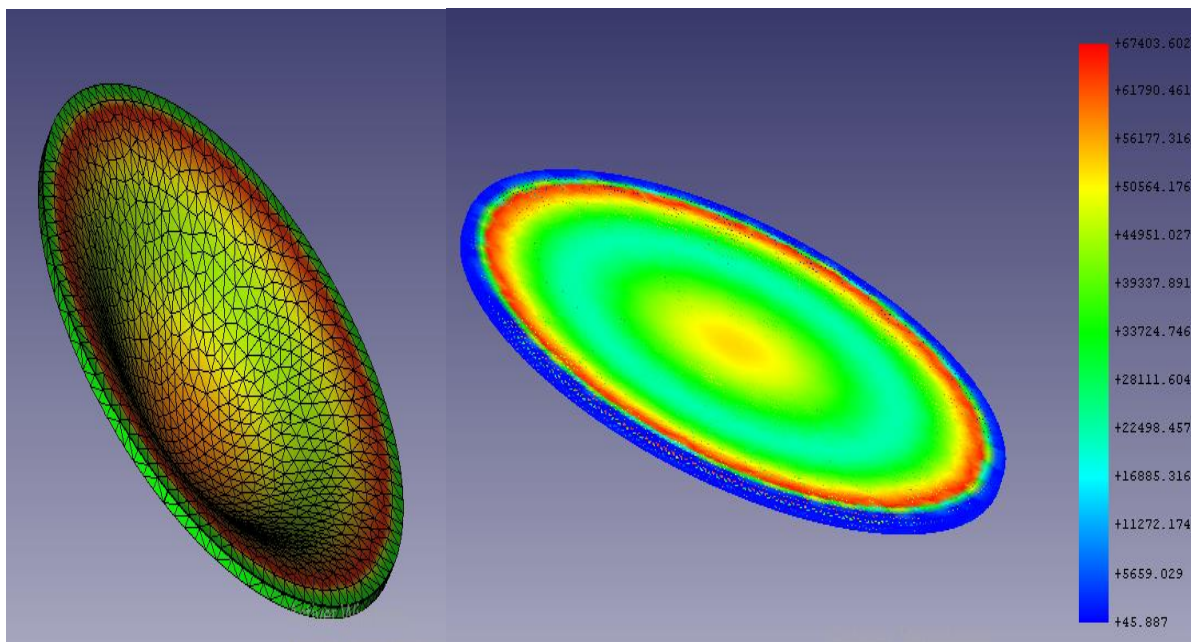


Figure III.46 : Contrainte de Von Mises.

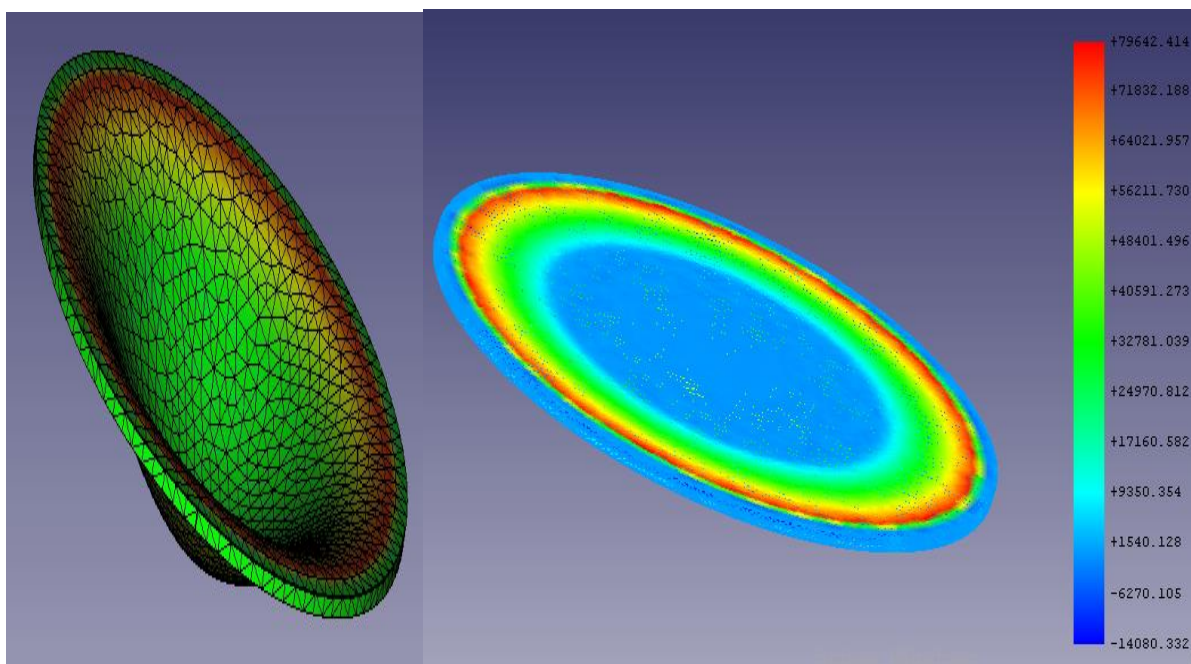


Figure III.47 : Contrainte maximale.

### III.7. DISCUSSION DES RESULTATS

D'après les résultats présentés dans les courbes des figures ci-dessus des essais de traction et de dureté qui engendre une augmentation considérable des propriétés de résistance des déformés; et moins intense pour les courbes avant déformation. Ainsi que là de la dureté du comparer de la courbe III. 8 Ou on note que des grandes duretés après déformation et glissement par génération de défauts linéaire. On note que cette croissance est du principalement à la déformation plastique subit par durcissement et écrouissage.

En plus des propriétés mécaniques pré-mentionnées, les paramètres géométriques des emboutis sont déterminer suivant les formules théoriques, leurs variations avec l'épaisseur elles sont résumés en:

- Diamètre du flan.
- Force d'emboutissage.
- Force de serrage de la serre flan.
- Diamètre de la matrice.

Le jeu poinçon- matrice ; Lorsque le jeu entre le poinçon et la matrice est théoriquement égal à l'épaisseur de la tôle, il se produit une augmentation de l'épaisseur de la paroi. L'augmentation de ce jeu a une influence favorable sous l'effet du poinçon.

- Rayon sur la matrice.
- Rayon sur le poinçon.
- Energie d'emboutissage.

Ces grandeurs industrielles nous permis de bien choisir les conditions adaptées de mise en œuvre des grandeurs des tôles minces par emboutissage afin d'éliminer les causes de vos rebuts. Il nous a permis aussi de bien choisir une tôle adaptée à sa mise en œuvre.

L'effort nécessaire pour emboutir des pièces cylindriques dépende des diamètres de l'embouti et du flan, de l'épaisseur, du type de matériau, de la pression serre-flan, de la vitesse d'emboutissage, de rayon entrée matrice, du jeu entre poinçon-matrice et de lubrification. L'estimation des paramètres mécaniques de l'opération d'emboutissage des tôles en acier considérées sont essentiellement:

- L'effort d'emboutissage est considérée en deux types avec et sans frottements (voir Figure III.18), très importantes par rapport à celui sans frottement, cela est dû essentiellement à la

force de glissement et en cisaillement. Lubrifier la face du flan opposée au poinçon: la lubrification de la partie centrale du flan a un effet néfaste car la lubrification diminue l'adhérence entre le poinçon et les parois de l'embouti.

Fonctions :

- Diminuer les efforts et les énergies de mise en forme.
  - Refroidir l'outillage.
  - Réduire l'échauffement du métal.
  - Obtenir un état de surface désiré.
  - Minimiser l'usure de l'outillage.
  - Éviter le collage produit/outil
- Le rôle du serre flan consiste à empêcher la formation de plis sur le rebond du flan en exerçant une pression appropriée. Si cette force est trop importante, le flan risque de se fissurer, par contre si cette force est trop faible, le flan risque de présenter des plis.

Lors de l'emboutissage, les éléments de tôle subissent une déformation que l'on peut matérialiser à l'aide d'un réseau de cercles tracés au préalable sur le flan; les dimensions des ellipses résultantes permettent d'estimer les déformations dans le plan de la tôle  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  ( $\epsilon_1 > \epsilon_2$ ) dont on peut déduire, du fait de l'incompressibilité du matériau (pas de variation de volume), la déformation à travers l'épaisseur associée vaut  $\epsilon_3 = -(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ .

On détermine les valeurs des déformations des zones de rupture qui, reportées sur un diagramme ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ), se situent au voisinage d'une courbe assez peu dépendante de la nature de la tôle ; Notant que le point de cette courbe égale à l'origine correspond à la déformation plane ( $\epsilon_2 = 0$ ).

Pour le bon déroulement de notre approche, et afin d'améliorer le comportement mécaniques des alliages d'aluminium, on a proposé une initiation à la simulation numérique par la méthode des éléments finis, dont on a pu décrire et voir, l'essai de traction uni axiale, avec enregistrement des différents paramètres en image et en valeurs, les résultats présentés dans les courbes des figures ci-dessus :

- Maillage d'une éprouvette circulaire, avec et sans mode de symétrie.
- Enregistrement des déplacements suivant les trois axes (x, y et z).
- Enregistrement des déformations suivant les trois axes (x, y et z).

- Enregistrement des contraintes réparties suivant les trois axes (x, y et z).
- Enregistrement des contraintes de Von Mises et maximales.

### **III.8. Conclusion de chapitre III**

Le choix d'un métal pour un certain but d'utilisation, s'effectue sur la base de ses propriétés physico-chimiques, mécaniques et technologiques. Les essais mécaniques font partie de la technique des métaux, leur but est de caractériser ou d'évaluer numériquement les propriétés du matériau. La connaissance des grandeurs caractéristiques et leur détermination sont les conditions essentielles pour les calculs des différents paramètres.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**



### CONCLUSION GÉNÉRALE

Les techniques de transformations de tôles sont très variées. L'emboutissage est l'un des plus importants procédés qui permet d'avoir des pièces non développables (contrairement au pliage).

L'emboutissage est une technique de fabrication permettant d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle plane et mince, un objet dont la forme n'est pas développable. Généralement de forme relativement complexe.

L'emboutissage se pratique à l'aide de presses à emboutir de forte puissance munies d'outillages spéciaux qui comportent, en principe, trois pièces :

- une matrice, en creux, qui épouse la forme extérieure de la pièce
- un poinçon, en relief, qui épouse sa forme intérieure en réservant l'épaisseur de la tôle
- un serre-flan entoure le poinçon, qui s'applique contre le pourtour de la matrice et sert à coincer la tôle pendant l'application du poinçon.

Outre la forme de l'outil, qui dépend de la complexité de la pièce à obtenir, de nombreux paramètres conditionnent la réussite de l'opération : ceux liés au processus d'une part, tels que réglages de la presse, vitesse d'emboutissage, lubrification, et ceux liés aux qualités de la tôle elle-même et à sa capacité de formage, encore appelée formabilité.

La mesure des caractéristiques mécaniques des tôles ainsi que l'interprétation de leur relation avec l'aptitude au formage, est un progrès marquant.

On a essayé de montrer quelles sont les caractéristiques des tôles métalliques qui sont Influence vis-à-vis de la mise en forme, en particulier en relation avec les modes locaux de déformation qui jouent ici un grand rôle. Notre cas concerne les tôles minces, c'est-à-dire, dans la pratique, les tôles d'épaisseur comprise entre 0,5 à 5,5 mm. Les paramètres géométriques jouent un rôle intéressant, dans l'opération d'emboutissage.

Parallèlement, aux calculs des paramètres géométriques, on a déterminé les caractéristiques mécaniques gouvernant le procédé d'emboutissage.

Pour terminer notre étude, une initiation à la simulation des emboutis cylindriques, à été réalisé, pour savoir les différentes zone de concentration des contraintes, des emboutis déformés après chargement.

On conclut que cette étude est bénéfique de point de vue découverte et caractérisation, calcul et simulation.

# **REFERENCES**

## Références bibliographie

---

### Références bibliographie

- [1] A. HAMMADI, Simulation de l'emboutissage à froid par une méthode asymptotique numérique, Mécanique [physics.med-ph]. Université Paul Verlaine - Metz, 2001, page 5 et 11.
- [2] F. SADOU et K. TIOUCHICHINE, thèse de Master Etude de voilage d'une tôle en acier au cours d'emboutissage par une méthode expérimentale et numérique, Université de Tizi-Ouzou, 2018/2019.
- [3] É. Felder, « *Procédés de mise forme : Introduction* », Techniques de l'ingénieur, M 3000, 2000
- [4] construire acier.fr /technique /familles de produits.toles.2
- [5] Document internet, catégories. Web/tôle-acier, <https://e.steel.arcelormittal.com>
- [6] L. MOUHOUBI, K. MERZOUK, étude et conception d'un moule d'emboutissage pour des tôles inférieur à 2mm, thèse de master, Université Bejaia, le 04/07/2019.
- [7] Document-internet, [https://www.researchgate.net/figure/Procede-demboutissage-Photo-Emb02\\_fig8\\_30515383](https://www.researchgate.net/figure/Procede-demboutissage-Photo-Emb02_fig8_30515383)
- [8] Document-internet, [http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1/EXPORTS\\_S113.publi/web/co/module\\_S113\\_4.html](http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1/EXPORTS_S113.publi/web/co/module_S113_4.html)
- [9] M.S. DRIDI, A. GUENDOUIZI, conception d'une presse mécanique pour emboutissage de 40 tonnes, thèse de master, Université Jijel, 2019.
- [10] Document internet cours sur l'emboutissage, <https://www.rocdacier.com/cours-emboutissage/>
- [11] Document internet, l'emboutissage procédé et utilisation, <http://www.acheter-vendre-machines.fr/2013/06/l'emboutissage-procede-et-utilisation.htm>
- [12] le feuillard technique, l'emboutissage de l'aluminium, centre de recherche et développement de l'aluminium, Québec CANADA
- [13] E Felder., « *Tribologie de l'emboutissage* », Techniques d'ingénieur, Traité Mécanique et Chaleur, B7535.

## Références bibliographie

---

[14] R. DJABRI, I. MIHOUBI, thèse de master Etude Et Réalisation D'une Emboutisseuse Des Tôles De Faible Epaisseur, Université de M'sila, 18 / 06 / 2018.

[15] S. CHIHAOUI, Mémoire de Magistère, l'amincissement des tôles minces lors d'une opération de mise en forme, Mémoire de Magistère, Université du Guelma, 2014/2015.

[16] C. ARWIDSON, «Numerical simulation of sheet metal forming for high strength steels», Sweden, 2005.

[17] LOUIS LAMONTAGNE, ETUDE SUR L'APPLICATION DE L'HYDROFORMAGE, UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2010.

[18] B. TOUATI. M. AZIL, Mémoire de Master, Méthodologie de fabrication des spires d'une vis D'ARCHIMEDE par emboutissage, Université BEJAIA, 28/06/2018.

[19] M. OUDJENE. Modélisation et optimisation du comportement mécanique des outils d'emboutissage stratifiés précontraints par vissage, Institut National Polytechnique de Lorraine, le 09 décembre 2005. Page 2.

[20] Service des Études et des Statistiques Industrielles (Sessi) du Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie ; La sous-traitance en chiffres (métaux, plastiques, caoutchouc, électronique), Dossiers sectoriels, téléchargeable <http://www.industrie.gouv.fr/sessi/>, 2004.

[21] Document internet <https://slideplayer.fr/slide/2571855>, Uploaded by: Hamnet Monnier, Jule 12, 2017.

[22] F. HAMIDOU , T. SADOUNE, mémoire de master simulation du procédé d'emboutissage en utilisant un code de calcul, thèse de master, université Bejaia, le 01/07/2019.

[23] Document internet ; Emboutissage : quels sont ses avantages ?,

<https://www.outillageprofessionnel.net/emboutissage-quels-sont-ses-avantages/>

[24] Document-internet,[http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-1/EXPORT\\_S111.publi/web/co/module\\_S111\\_3.html](http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-1/EXPORT_S111.publi/web/co/module_S111_3.html)

## Références bibliographie

---

- [25] M. JERB, support de cours, procédés de mise en forme, institut de Nabeul, 2017 /2018 page 50.
- [26] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/essais-mecaniques-sur-les-metaux-et-alliages-42531210/essais-d-aptitude-a-la-mise-en-forme-m4162/essais-d-emboutissage->
- [27] D. KHIRANI, mémoire de magister, Répartition des déformations en étirage-plier et leurs effets sur le retour élastique, Université Ferhat Abbas Setif, 10 / 05 / 2010.
- [28] H. CHABANE, Z. BELKACEM, Étude et conception d'un outil poinçonnage et détournage d'un bandeau bombé en inox d'une cuisinière E N I E M , Université de Tizi-Ouzou 24/11/2018.
- [29] M. AZAOUZI, Modélisation et optimisation numérique de l'emboutissage de pièces de précision en tôlerie fine, École doctorale EMMA Lorraine, 11 Décembre 2007
- [30] F. RONDE- OUSTAU, conception et mise au point d'une gamme d'emboutissage, Techniques de l'ingénieur, BM 7 540,
- [31] A. Col, Emboutissage des tôles : Importance des modes de déformation, Techniques de l'ingénieur, BM 7 510,2002.
- [32] T. SADOUDI et N. MEDJBARI, thèse de master Influence de l'essai d'emboutissage sur l'évolution microstructurale d'un acier à effet TRIP 304L, Université Tizi-Ouzou, 2017/2018.
- [33]T. SEDRAT, mémoire de magister Étude et conception d'un procédé d'emboutissage (Appliqué aux moules d'emboutissage pour emballage métallique), Université de Batna, 15 / 05 / 2007.
- [34] A. DJELIL, mémoire de master Etude de la technologie de fabrication d'un embouti de bouteille à gaz – Test de l'aptitude à l'emboutissage de l'acier P265NB, mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019/2020.

## Références bibliographie

---

- [35] G. POMEY\_ Rapport IRSID RFP (Les essais des tôles minces. La partie : mesure des caractéristiques d'emboutissabilité), 9.Novembre 1972.
- [36] P. PARNIERE , G.SANZ ,chapitre XIX: Appréciation des caractéristiques d'emboutissabilité des tôles minces Institut de recherches de la sidérurgie française 185, rue du  $p^t$ Roosevelt 78104 s<sup>t</sup> Germain en laye.
- [37] B. WASSILIEFF, Emboutissage. Règles principales, calculs, exemples. Edition Dunod, Paris, 1970.
- [38] Document-internet, caractérisation de quatre nouveaux matériaux en emboutissage-  
<https://www.cetim.fr/mecatheque/Resultats-d-actions-collectives/Caracterisation-de-quatre-nouveaux-materiaux-en-emboutissage> Créé le : 03/08/2009
- [39]  
[http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M12/EXPORTS\\_S123.publi/web/co/module\\_S123\\_3.html](http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M12/EXPORTS_S123.publi/web/co/module_S123_3.html)
- [40] S. Fromentin, Etablissement d'un critère de striction intrinsèque des tôles et validation numérique par simulations d'emboutissage, Université de metz, le 03 Juillet 1998 page 10.
- [41] K. Debray, F. Bogard, Y. Li, Y. Q. Guo, Optimisation des surfaces additionnelles en emboutissage des tôles minces. 17<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique Troyes, 2005.
- [42] « *Formage à la presse* » BT2, 7510, PB7510-3.
- [43] R. DIETRICH, G.Facy, E.Hugonnaud, M. Pompidou, J.P.Trotignon tome 2 méthodes fabrication et normalisation AFNOR NATHAN. Livre
- [44] A. COL, emboutissage des tôles : Aspect mécanique, technique de l'ingénieur, BM7511.
- [45] O. KEBDANI et R. Bouchaib, Simulation et prédiction de la formabilité de la tôle via le simulateur emboutissage AutoForm, Université Hassan 1er, Maroc page 4.
- [46] K. NAKAZIMA, T. KIKUMA, K. ASUKA. – Study on the formability of steel sheet. Yawata Technical Report, No 264, Sept. 1968.

## Références bibliographie

---

- [47] N. BOUDEAU, Approches méthodologiques, numériques et expérimentales en mise en forme des structures minces, poudre et polymères chargés, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Franche-Comté, 2003
- [48] A. REDJAÏMIA "Etude morphologique structural de la décomposition de la ferrite delta Dans un acier inoxydable" Thèse de doctorat d'État, 1991, INPL.
- [49], « *Matériau industriels et Matériaux Métalliques* », S8/62292
- [50] B. FAR, T. MARZOUGUI, Caractérisation du procédé d'emboutissage des tôles en acier, Université de Tébessa, 2017/2018.
- [51] Belkadi Mohamed Ameziane, ben Abdellah Mohand, caractérisation des tôles utilisées dans le process refrigerateure ENIM influence des traitements surfaciques sur l'adhérence de la peinture, Université Tizi-Ouzou ; 2012/2013
- [52] Document internet ; aciers doux pour formage à froid ; [https://www.aciers-coste.com/wp-content/uploads/2020/01/BROCHURE\\_ACIER-DOUX-et-TOL.pdf](https://www.aciers-coste.com/wp-content/uploads/2020/01/BROCHURE_ACIER-DOUX-et-TOL.pdf)
- [53] <https://www.rocdacier.com/essai-de-traction-2/>
- [54] <https://www6.nancy.inrae.fr/silva/Plateformes/SilvaTech/Equipements/Pole-Imagerie-Microscopies-IM/Microscopes-photoniques>
- [55] R. SAHLI ; thèse de master, étude de la rupture de la formabilités des tôles en acier A60 ; propriétés et microstructure ; Université Tizi-Ouzou ; 2012.
- [56] A. DIHA, cour essai mécaniques : essai de traction ; université Tébessa ; 2020/2021.
- [57] G. MOULIN ; comportement des matériaux en traction P03 ; <http://www.utc.fr/~moulin/MQ17/C3MQ17plan.pdf>
- [58] Jean-Claude Charmet ; cours M' mécanique du solide et des matériaux Elasticité-Plasticité-Rupture ; ESPCI - Laboratoire d'Hydrodynamique et M' mécanique Physique.
- [59] Document internet, produits plats et feuillards non revêtu laminée à froid, <http://www.ars-metal.com/uploads/produits/41cb8799a167e15f58f1242abbf4259d.pdf>
- [60] B. Gharbi, cour essais de durté, université Batna 2.

## Références bibliographie

---

- [61] <https://conceptec.net/fr/techniques-de-base/materiaux/essais-et-contrôles/durete-brinellhttps://conceptec.net/fr/techniques-de-base/materiaux?tmpl=component&limitstart14=60&start=25>
- [62] A. HIDOURI; Technologue ; Travaux Pratiques de Sciences Des Matériaux ; Institut Supérieur des Études Technologiques Gafsa ; 2013/2014.
- [63] C. BERDIN, Claude PRIOUL ; Relation résilience – ténacité- Apports de la modélisation numérique ; Issu des Techniques de l'ingénieur ; 10 sept. 2007 Relu et validé le 01 juin 2015.
- [64] <https://www.cours-et-exercices.com/2016/04/essai-de-resilience-les-essais.html>
- [65] H. MOUSTABCHIR ; ÉTUDE DES DEFAUTS PRÉSENTS DANS DES TUYAUX SOUMIS À UNE PRESSION INTERNE ; Université Paul Verlaine de Metz, 07 Mars 2008.
- [66] [http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-2/EXPORTS\\_S125.publi/web/co/module\\_S125\\_3.html](http://mediamef.utt.fr/modules/P1/M1-2/EXPORTS_S125.publi/web/co/module_S125_3.html)
- [67]Dossiers technique, procédés d'élaboration, <http://arno.carre.free.fr/microtech/procedeelaborationmicro.pdf>
- [68] DT3, paramètres d'emboutissage [https://edu.ens-rennes.fr/pluginfile.php/1623/mod\\_folder/content/0/gm812.pdf?forcedownload=1](https://edu.ens-rennes.fr/pluginfile.php/1623/mod_folder/content/0/gm812.pdf?forcedownload=1)
- [69] O. MAKAROVA, Thèse de doctorat, Définition de protocoles rationnels d'identification de lois de comportement élastoplastiques : Application à la simulation éléments finis d'opérations industrielles d'emboutissage 22 septembre 2006.
- [70] Document Internet, À propos de Freecad [https://wiki.freecadweb.org/Feature\\_list/fr](https://wiki.freecadweb.org/Feature_list/fr).