

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Techniques de Production Industriel

Présenté par :

OSSIFAR Smail & BENNAOUI Salah

Thème

MISE EN FORME DES TOLES METALLIQUES

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
DEBIH Ali	MCA	Président
ELHADI Abdelmalek	MCA	Examineur
HOCINE Mustapha	MCB	Encadreur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre : GM/...../.....

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur MR Dr. HOCINE Mustapha, son précieux conseil et son

aide durant toute la période du travail. Nos vifs remerciements vont également aux membre du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurpropositions.

Nous adressons nos vifs remerciements à MR OUADADA

Kamel et l'ensemble du personnel de l'entreprise de

ALGAL+ pour leurs aides

dans notre activité.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce Travail.

A nous familles et nos mères qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Ma très chère mère que
j'aime beaucoup ; Mon très
cher père qui est toujours à
mes côtés*

*Mes très chers frères Djamel,
Messaoud;*

Qui m'ont toujours soutenue ;

A Toute ma famille

A Tout mes ami , Bennaoui Salah / Hachroufe Abd errazake .

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Ma très chère mère que j'aime beaucoup ; Mon très cher père qui est
toujours à mes côtés ;*

Mes très chers frères et sœurs

Qui m'ont toujours soutenue

A Toute ma famille

*A mon ami et collègue dans ce travail OSSIFAR
Smail*

*A mes tous amis surtout BABAH Mustapha et
BETTA Noureddine.*

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié les différents processus de formage de tôle et expliqué chaque processus à son importance dans l'industrie, nous avons identifié chaque procédé comme :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les tôles, leurs types, comment les obtenir.

Dans le deuxième chapitre, nous avons défini et expliqué le procédé de laminage et son rôle dans le formage des tôles métalliques.

Dans le troisième chapitre, nous avons expliqué le procédé d'emboutissage et son importance dans le formage des pièces et le domaine de leur utilisation.

Dans le quatrième chapitre, nous avons parlé le procédé de pliage, de ses types et des moyens de l'obtenir.

Dans le chapitre cinq, nous définissons le processus de cintrage et comment l'obtenir.

Dans le sixième chapitre, nous avons découvert le processus filage, son principe de fonctionnement et ses différents types.

Au chapitre sept, nous avons expliqué le processus de découpage, son application et son principe de fonctionnement.

Dans le huitième chapitre, nous avons défini et expliqué le processus de cisailage qui est effectué sur des tôles.

Dans le neuvième et dernier chapitre, nous avons défini et expliqué le procédé de poinçonnage et le principe de son fonctionnement

Abstract:

In this work, we studied the different processes of sheet metal forming and explained each process about its importance in the industry, we identified each process as:

In the first chapter, we presented generalities on the sheets, their types, how to obtain them.

In the second chapter, we defined and explained the rolling process and its role in the forming of metal sheets.

In the third chapter, we explained the stamping process and its importance in the forming of parts and the field of their use.

In the fourth chapter, we talked about the folding process, its types and the means to obtain it.

In chapter five we define the bending process and how to achieve it.

In the sixth chapter, we discovered the spinning process, its principle of operation and its different types.

In Chapter Seven, we explained the slicing process, its application, and how it works.

In the eighth chapter, we defined and explained the shearing process that is carried out on sheets.

In the ninth and last chapter, we defined and explained the punching process and the principle of its operation.

ملخص :

في هذا العمل ، درسنا العمليات المختلفة لتشكيل الصفائح المعدنية وشرحنا كل عملية حول أهميتها في الصناعة ، وحددنا كل عملية على النحو التالي:

في الفصل الأول قدمنا العموميات على الأوراق وأنواعها وكيفية الحصول عليها.

في الفصل الثاني قمنا بتعريف وشرح عملية الدرفلة ودورها في تشكيل الصفائح المعدنية.

في الفصل الثالث شرحنا عملية الختم وأهميتها في تشكيل الأجزاء ومجال استخدامها.

في الفصل الرابع تحدثنا عن عملية الطي وأنواعها وطرق الحصول عليها.

في الفصل الخامس نحدد عملية الانحناء وكيفية تحقيقها.

في الفصل السادس اكتشفنا عملية الغزل ومبدأ عملها وأنواعها المختلفة.

شرحنا في الفصل السابع عملية التقطيع وتطبيقها وكيفية عملها.

في الفصل الثامن ، قمنا بتعريف وشرح عملية القص التي تتم على الأوراق.

في الفصل التاسع والأخير ، قمنا بتعريف وشرح عملية التنقيب ومبدأ عملها.

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION GENERAL	02
<i>CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES TOLES METALLIQUES</i>	
I 1 Introduction	04
I 2 Définition Les tôles	04
I 3 Aspects généraux	05
I 4 Evolution de la mise en forme des métaux	07
I 5 Substitution de procédés	10
I 6 Suppression ou réduction des traitements de finition des pièces	11
I 7 Enchaînement continu des diverses opérations	11
I 8 Le recours aux logiciels de simulation numérique	12
I 9 Problématiques scientifiques	14
CHAPITRE II : LA MINAGE	
II 1 Le laminage	16
II 2 Le laminoir	16
II 3 Les types de laminage	17
II.3.1. Le laminage à chaud	17
II 3 2 Le laminage à froid	18
II.3.3. Laminage quarto	19
CHAPITRE III : EMBOUTISSAGE	
III 1 INTRODUCTION	21
III 2 DEFINITION	22
III 3 PRINCIPES DE L'OPERATION	22
III 4 MODES D'EMBOUTISSAGE	23
III 5 PROCÉDES D'EMBOUTISSAGE	26
III 6 EMBOUTISSAGE SANS SERRE FLAN SIMPLE EFFET	27
III 7 EMBOUTISSAGE AVEC SERRE FLAN OU DOUBLE EFFET	28
III.8. Détermination du flan primitif	28
III.8.1 ARRONDI SUR LA MATRICE	29
III.8.2 ARRONDI SUR LE POINÇON	30

III.8.3 RAYONDU FLAN	31
III.8.4 JEU ENTRE MATRICE ET POINÇON	31
III.9. DETERMINATIONDU DIAMETRE INITIAL DU FLAN	33
III.9.1 DETERMINATIONDES FORCES D'EMBOUTISSAGE	34
III.10. Emboutissage cylindrique	34
III.11. Emboutissage rectangulaire	35
III.12. DETERMINATIONDES FORCES DE SERRAGE DU SERRE-FLAN	37
III.12.1 En cylindrique	37
III.12.2 En rectangulaire	38
III.13. VITESSE D'EMBOUTISSAGE	38
III.14. EMBOUTISSAGE CYLINDRIQUE PROFOND	39
III.15. La courbe limite de formage	39
III.16 Etude des contraintes et déformation dans l'emboutissage	40
III.17 Influence du coefficient d'écrouissage	47
CHAPITRE IV : PLIAGE	
IV 1 Introduction	49
IV 2 DEFINITION	49
IV 3 PRINCIPE DU PLIAGE	49
IV 4 Machines de pliage	50
IV 5 DIFFERENTS techniques de pliage	51
IV 5 1 Pliage en frappe	51
IV 5 2 Pliage en l'air	51
IV 5 3 Pliage sur élastomère	52
IV 5 4 Pliage en équerre	53
IV 6 Le pliage en U	53
IV 7 Pliage en Z	54
IV 8Le pliage en L	55
IV 9Analyse de la déformation	55
IV 10 Position de fibre neutre	55
IV11 Allongement de la fibre extérieure	55
IV 12 Rayon minimale de pliage	56
IV 13 Avantages et Inconvénients	57
IV 14 Développement du flan	57

IV 15 Méthode des sections: (1ère Méthode)	57
IV 16 Calcul théorique: (2 ^{ème} Méthode)	58
IV 17 Les côtes machine (côte de mise en buté)	59
IV 18 Rayon et Angle du poinçon à utiliser en pliage	60
IV 19 CALCUL DE L'EFFORT DE PLIAGE	63
IV 20 Le pliage en V	64
IV.21. Pliage en U	65
IV.22. LE RETOURELASTIQUE	66
IV.23. CONCLUSION	68
CHAPITRE V : LECINTRAGE	
V 1 INTRODUCTION	70
V 2 DEFINITION	70
V 3 PROCEDEDE TRAVAIL	70
V4 CINTRAGE DES tôles	70
V 5 Principe	70
V 6 Longueur développée	71
V 7 Machines à cintrer les tôles	71
V8 Diffèrent types de machines	71
V 9 Cintrage a la presse	75
V 10 Cintrage d'un tronc de cône	76
CHAPITRE VI : FILAGE	
VI 1 Définition	78
VI 2 Quantification de la déformation	78
VI 3 Coefficient de déformation	78
VI 4 Rapport de filage	78
VI 5 Force de filage	79
VI 6 Les différents types de filage	79
VI 6 1 Le filage direct	79
VI 6 2 Le filage inverse	80
VI 6 3 Le filage inverse en conteneur	81
VI 6 4 Le filage sur aiguille	82
VI 7 Lubrification	83
VI 7 1 Filage de l'acier	83

VI 7 2 Filage des alliages d'aluminium	84
CHAPITRE VII : DECOUPAGE	
VII 1 INTRODUCTION	86
VII 2 DEFINITION	86
VII 3 PRINCIPES DE DECOUPAGE	87
VII 4 OPERATION DE DECOUPAGE	87
VII 5 EFFORT DE DECOUPAGE	88
VII 6 Méthode analytique	88
VII 7 Méthode utilisant l'abaque	89
VII 8 VITESSE DE DECOUPAGE	90
VII 9 EFFORT A CREER SUR LE DEVISSSEUR ET EFFORT DE L'ATTRACTION	90
VII 10 JEUX DE DECOUPAGE	91
VII 11 L'ANGLE TRANCHANT	92
VII 12 EFFETS DE LA COUPE	93
VII 13 CONCLUSION	93
CHAPITRE VIII : LE CISAILLAGE	
VIII 1 Définition	95
VIII 2 Principe	95
VIII 3 Effort de coupe	96
VIII 4 Différentes méthodes de cisailage	96
VIII 4 1 Cisaille à lames parallèles	96
VIII 4 2 Cisaille à lames obliques	97
VIII 4 3 Cisaille à lames circulaires	99
VIII 5 Paramètres de coupe	100
VIII.5.1. L'angle d'attaque	100
VIII.5.2. L'écartement entre les lames (ou jeu entre lames)	100
VIII.5.3. L'angle de coupe (ou angle de tranchant)	101
CHAPITRE IX : POINÇONNAGE	
IX 1 INTRODUCTION	103
IX 2 DEFINITION	103
IX 3 LE PROCÉDÉ DE POINÇONNAGE	103
IX 4 ORGANES DE L'OUTILS	105
IX 5 Rayon du poinçon	107

IX 6 MATRICE ET POINÇON	107
IX 7 Jeu poinçon–matrice	108
IX 8 EFFORT D'EXTRACTION	109
IX 9 ÉJECTEURS	109
IX 10 PREDECOUPE	109
IX 11 FORME DE L'OUTIL	110
IX 12 FORME DE LA MATRICE	110
IX 13 DEPOUILLE	111
IX 14 USURE DES OUTILS DE DECOUPAGE	112
IX 15 EFFORT DE POINÇONNAGE	113
IX 16 CONCLUSION	114
CONCLUSION GÉNÉRALE	116

LISTE DES FIGURES

Figure I 1: Bobinage de tôle.

Figure I 2: Bobine de tôle.

Figure I 3: Principaux procédés de fabrication des matériaux métalliques

Figure I.4 : Opération de forgeage à tiède (600°C) d'engrenage en acier—L'optimisation multicritère de la forme géométrique de la préforme permet de réduire de 9,4 % la force de forgeage et de 9,8% les risques de repli [CEMEF]

Figure I.5: Problèmes scientifiques de la mise en forme par déformation plastique

Figure I.6: Les interactions thermomécaniques, métallurgiques et tribologiques dans un procédé de mise en forme

Figure II 1: Le laminage.

Figure II 2: Principe de fonctionnement des cylindres de laminage

Figure II 3: Laminage à chaud.

Figure II 4: Train de laminage.

Figure II 5: Laminage à froid

Figure II 6: Schéma d'une cage quarto de laminage.

Figure III 1 : procédés de l'emboutissage

Figure III 2 : Schématisation de l'opération d'emboutissage

Figure III 3: Procédé d'emboutissage.

Figure III 4: Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôles ou s serre flan.

Figure III 5: Principaux types de déformation par emboutissage.

Figure III 6: Emboutissage mixte

Figure III 7 : Étapes de réalisation d'une cannette

Figure III 8 : Emboutissage sans serre flan simple effet

Figure III 9 : Emboutissage avec serre flan ou double effet

Figure III 10: Variation de l'arrondi sur l'amatrice

Figure III 11: le rayon sur le poinçon

Figure III 12: Paramètres

Figure III 13 : Jeu entre matrice et poinçon

Figure III 14: jeu de la forme conique

Figure III 15: Détermination du diamètre initial du flan

Figure III 16 : Courbe limite de formage pour différents domaines [Arwidson05].

Figure III 17 : Etats de contrainte et de déformation d'un élément fini de tôle mince.[O.Markova06]

Figure III 18 : Diagramme des états de déformations plans (modes de déformation) rencontré sen emboutissage. [O.Markova06]

Figure III 19 : Diagramme des états de contraintes plans rencontré sen Emboutissage. [O.Markova06]

Figure III 20 : Variations de la limite inférieure d'un acier doux en fonction de-là taille du grain. [O. Markova 06]

Figure III 21:Texture de dé formation. [Michel. Colomb]

Figure IV 01: Procédés de pliage : **(a)** pliage par rotation d'un outil pivotant, **(b)** pliage sur presse plieuse.

Figure IV 02:Plieuse à tablier manuelle

Figure IV 03 : Plieuse presse universelle

Figure IV 04:pliage en frappe

Figure IV 05:pliageenl'air

Figure IV 06:pliage sur élastomère

Figure IV 07 : pliage en V

Figure IV 08 : pliage en équerre

Figure IV 09:pliage avec ailes extérieur en deux passes **(a)**, **pliage avec outil à cames (c)**, pliage avec ailes intérieur en deux passes**(b)**

Figure IV 10: **a)**trois opérations **b)** deux opérations

Figure IV 11 : Outil de liage en Z

Figure IV 12:Pliage en L.

Figure IV 13 : longueur de son flan

Figure IV 14: La développée avant pliage

Figure IV 15: l'angle de pliage

Figure IV 16:Abaquedédéterminationde la valeur de C

Figure IV 17 : Côte machine (côte de mise en buté)

Figure IV 18 : Phénomène du retour élastique

Figure IV 19 : pliage en V sur presse plieuse

Figure IV 20: Abaque du Coefficient de retour élastique

Figure IV 21 : Effort de pliage : F_1

Figure IV 22 : Coefficient en fonction de V

Figure IV 23: Effort de pliage pour un acier de résistance $400 < R_m < 450 \text{ N/mm}^2$

Figure IV 24 : Opérations réalisées sur une presse plieuse

Figure IV 25 : Visualisation des contraintes dans l'épaisseur du matériau après flexion (à gauche) et retour élastique (à droite)

Figure IV 26 : .Exemple d'ouverture d'une pièce en U après retour élastique

Figure IV 27 : Retour élastique lors du pliage.

Figure V 01: principe

Figure V 02 : Principe de LE CROQUAGE

Figure V 03 : Cintrage total

Figure V 04 : Cintrage total L'action du rouleau cintreur

Figure V 05 : Principe de cintrage à la presse

Figure V 06 : Machines utiles

Figure VI 01 : schéma du filage direct

Figure VI 02 : schéma le filage inverse

Figure VI 03 : schéma Le filage inverse en conteneur

Figure VI 04: Schéma du filage sur aiguille permettant d'obtenir un tube sans soudure

Figure VI 05 : Défaut d'invagination en bout de barra

Figure VII 1: Découpage des tôles à la presse.

Figure VII 2:Principe du de coupage

Figure VII 3 : **a)** Phases de l'opération de découpe **:b)** Courbe effort-déplacement

Figure VII 4: abaque permettant de déterminer l'effort de de coupage

Figure VII 5: Influence de la vitesse du poinçon sur l'effort de découpe

Figure VII 6: Jeu de dé coupage.

Figure VII 7: L'angle tranchant des lames

Figure VII 8 : jeu entre les lames fixe et mobile

Figure VIII 1: Cisailages des tôles

Figure VIII 2: Cisaille à lames parallèles

Figure VIII 3: Cisaille à lames obliques

Figure VIII 04: Cisaille manuelle

Figure VIII 05 : **a** : Cisaille à lames longues, **b**: Cisaille à lames courtes

Figure VIII 06: Cisaille à lames circulaires

Figure VIII 07: Exemple de cisaille circulaire

Figure VIII 08: L'angle d'attaque

Figure VIII 09: L'angle de coupe(ou angle de tranchant)

Figure IX 1 : Poinçonnage.

Figure IX 2: Les différentes étapes du poinçonnage

Figure IX 3 : Vue éclatée de l'outillage

Figure IX 4:le rayon sur le poinçon

Figure IX 5:Poinçon (à gauche) et matrice (à droite)

Figure IX6 : Contraintes à l'origine de l'effort de dévêtissage

Figure IX 7 : Vue en coupe d'une chute

Figure IX 8 : forme de l'outil de poinçonnage

Figure IX 9 : les étapes de poinçonnage

Figure IX 10 : Matrice avec un angle de dépouille de 2° à 3° .

Figure IX 11 : Matrice avec un angle de dépouille de 1° .

Figure IX 12 : Evolution des arêtes de découpe d'un poinçon et d'une matrice

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Évolution et formes diverses des procédés de mise en forme des métaux et alliages métalliques

Tableau III 1: L'emboutissage passe par les phases

Tableau III 2: le coefficient K en fonction de d/D

Tableau III 3 : Effort de poinçon

Tableau III 04 : Matériaux du flan et leurs pressions spécifiques

Tableau III 05: les vitesses optimales des matériaux

Tableau III 06 : Modes de déformation d'emboutissage. . [O.Markova06]

Tableau III 01 : Tableau de coefficient de proportionnalité

Tableau III02 : Rayon minimal de pliage

Tableau III 03 : Coefficient du Retour élastique

Tableau V 01 : Principe de cintrage

Tableau V 02 : Cintrage forme cylindrique ou conique

Tableau V 03 : Les machines de cintrage

Tableau V 04 : Le CROQUAGE pour différentes épaisseur de pièce

Tableau V1: résistance au cisaillement des matériaux courant



INTRODUCTION
GENERALE

Introduction

Introduction

Dans les industries mécaniques, la mise en forme des tôles par déformation est largement utilisée pour réaliser divers composants (emboutissage de carter, de portières, de capots et autres éléments de carrosserie) ...etc. Ce procédé a une importance considérable dans de nombreuses industries telles que la construction mécanique, l'automobile ou l'aéronautique. L'industrie sidérurgique développe actuellement de nouvelles tôles à partir de matériaux combinant à la fois résistance et large aptitude à la mise en forme (formabilité). Cette branche d'activité occupe une place importante dans cette industrie.

Des développements considérables ont été également réalisés ces dernières années pour l'amélioration des procédés de mise en forme de ces tôles.

Les procédés de mise en forme des tôles sont des opérations réalisées dans le but d'obtenir des formes finales désirées dans les applications industrielles et la mise en forme par découpage dans une tôle. Cette opération est particulière, parce qu'elle nécessite une analyse fine où le comportement du matériau voit une dégradation continue de ces propriétés élastiques et plastiques, pour déboucher à la fin du processus sur la rupture totale de la partie découpée.

Le déchirement prématuré de la tôle lors de la mise en forme (emboutissage, pliage et le découpage) est l'un des grands problèmes posés actuellement au niveau de l'industrie mécanique. Les scientifiques et les industriels cherchent donc toujours les meilleures conditions pour lesquelles l'aptitude à la déformation peut aller à son tour au maximum afin de minimiser les rebuts. C'est ainsi que l'opération d'emboutissage entre dans cette catégorie.

L'opération de découpage des métaux peut être considérée comme une opération de mise en forme particulière dans la mesure où le but final est l'obtention d'une pièce où la forme finale de la pièce est donnée par celles du poinçon et de la matrice.

L'emboutissage, et plus généralement, tous les procédés d'obtention de pièces manufacturées par déformation des matériaux métalliques sont des procédés largement utilisés en fabrication mécanique et qui progressent technologiquement sans cesse pour s'accaparer des nouveaux marchés.



CHAPITRE I
GENERALITE SUR LES
TOLES METALLIQUES

I.1. Introduction

On entend par tôle, un produit métallique plat, qui peut se présenter sous forme de feuilles ou de bobines. La fabrication des pièces de tôle aux formes demandées, est obtenue par différentes opérations.

Le but de cette dernière est de conférer à une pièce métallique des dimensions situées dans une fourchette de tolérances données. Les principaux procédés d'obtention des pièces mécaniques sont apparus progressivement. Les formes modernes des divers procédés sont apparues pour assurer la production en grande série de pièces à faible cout. On note les divers procédés des principaux travaux par déformation plastique: Emboutissage, Découpage, Poinçonnage, Pliage ...etc.

I.2. Définition Les tôles

Les tôles sont des produits plats de section droite presque rectangulaire et dont la largeur est très supérieure à l'épaisseur tirés des brames par laminage à froid pour les tôles minces, dont l'épaisseur est inférieure à 3 mm ; ou à chaud, C'est-à-dire que les plaques d'acier, issues de la coulée, sont réchauffées entre 800 et 1200°C puis écrasées par un passage successif entre deux rouleaux jusqu'à obtention de l'épaisseur voulue. Elles sont conditionnées en bobines, en bandes refendues ou en feuilles.

Les dimensions varient en fonction de l'acier (nuance et type), de l'épaisseur et des revêtements appliqués, On distingue :

Suivant leurs épaisseurs

- Les tôles fines (< 3 mm).
- Les tôles fortes (> 3 mm).

Suivant leurs finitions

- La tôle noire dont les faces ont un fini brut, sans revêtement.
- La tôle galvanisée, pour sa part, elle dotée d'un revêtement anticorrosion au niveau de ses deux faces.
- La tôle pré laquée qui présente une surface anticorrosion comme chez la galvanisée, en-dessus de laquelle on ajoute une/des couches de peinture.



Figure I 1 : Bobinage de tôle.

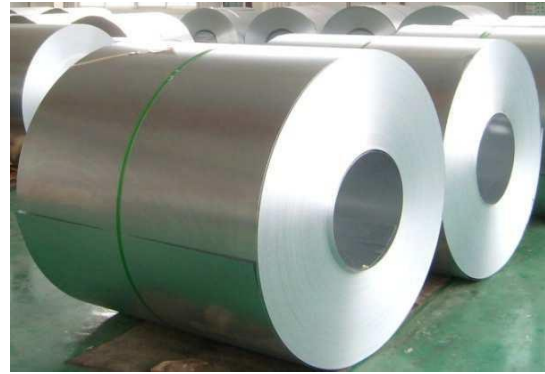


Figure I 2 : Bobine de tôle.

Ce chapitre présente l'ensemble des procédés de fabrication des pièces métalliques, puis décrit de manière détaillée les opérations de mise en forme par déformation plastique avec et sans enlèvement de matière. Après avoir précisé la géométrie et la cinématique des différents procédés, le chapitre présente les phénomènes physiques fondamentaux, puis les modalités de la mise en œuvre pratique des procédés selon la température et la nature des principaux alliages (base fer, aluminium et cuivre).

I.3. Aspects généraux

Opérations de fabrication des pièces métalliques Principales:

La figure I.3 récapitule les principales classes de procédés utilisés. Elle montre qu'il existe trois voies principales de fabrication de pièces métalliques selon l'état de départ du matériau métallique:

- Le moulage à partir de l'état liquide.
- Le façonnage à partir d'une ou plusieurs pièces à l'état solide. Cette voie peut, elle-même, se scinder en formage, ou mise en forme sans enlèvement de matière par déformation plastique, usinage, ou mise en forme avec enlèvement de matière, et l'assemblage, où l'on solidarise deux ou plusieurs pièces selon les procédés.
- Le frittage à partir de poudres par disparition des vides inters granulaires à haute température et éventuellement sous pression hydrostatique (compaction isostatique) ou un état de contrainte plus général par forgeage, filage...

En raison, entre autres causes, de la classification socio-économique des secteurs industriels correspondants, on distingue dans le formage :

- Le travail des métaux à l'état massif, pratiqué essentiellement dans les industries métallurgiques : laminage, forgeage, filage, étirage, tréfilage.
- Le travail des métaux en feuilles, pratiqué comme l'usinage dans les industries mécaniques et dont le principal procédé est l'emboutissage des tôles.

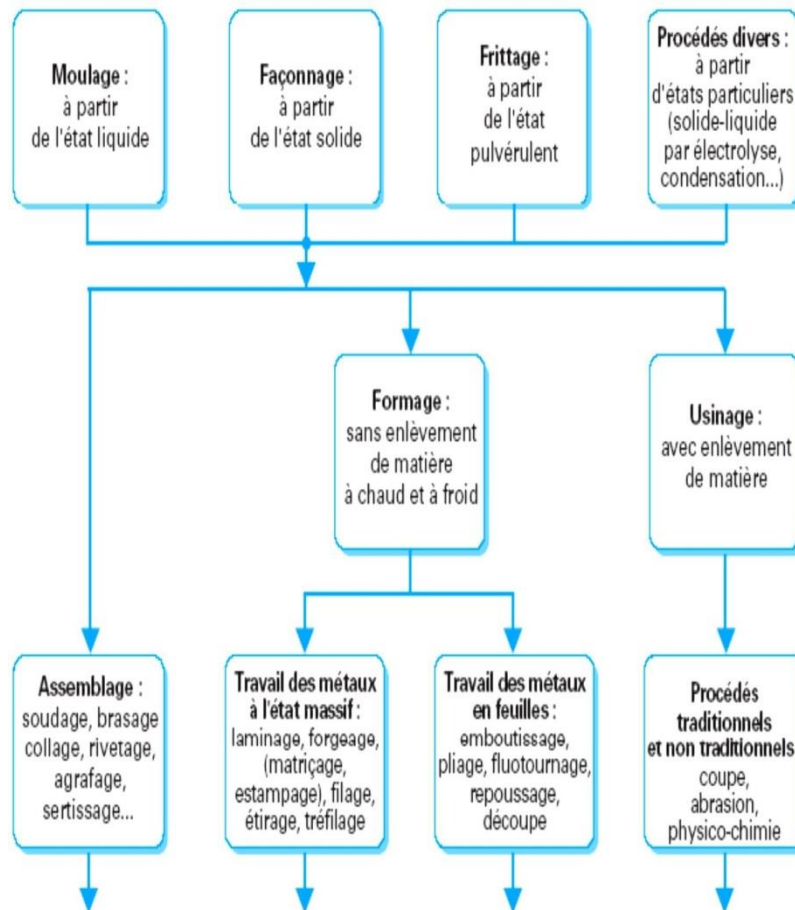


Figure I.3 : Principaux procédés de fabrication des matériaux métalliques [T.I.]

Bien que le volume de pièces concernées soit nettement plus modeste, il ne faut pas oublier diverses autres voies permettant de modifier la forme d'un solide et très utiles dans diverses situations, notamment pour la réalisation ou la réparation d'outillages de mise en forme :

- Addition d'un matériau métallique solide à une pièce en le transformant temporairement en ions par électrolyse (électroformage), en liquide (rechargement par les techniques de soudage) ou en gaz (pulvérisation et condensation).

- Passage temporaire d'un alliage métallique par l'état semi-solide entre liquidus et solidus et injection dans un moule.

I.4. Evolution de la mise en forme des métaux

L'objectif premier de la mise en forme des métaux est de conférer à une pièce métallique des dimensions situées dans une fourchette de tolérance donnée. Les principaux procédés de mise en forme des métaux sont apparus progressivement, donnant naissance par la suite à diverses variantes, parfois très nombreuses. Les formes modernes des divers procédés sont le plus souvent apparues récemment pour assurer la production en grande série de pièces à faible coût. On note dans le tableau I.1 quatre stades principaux d'émergence des divers procédés.

- Dès les débuts de l'élaboration des métaux et alliages métalliques à partir de minerais sont pratiqués, semble-t-il, le moulage à partir de l'état liquide, le forgeage libre à chaud de pièces massives brutes de coulée ou réchauffées et le formage à froid de feuilles métalliques. Il s'agit en effet d'une extension assez naturelle du processus d'élaboration mettant en jeu des moyens assez simples : des fours, des moules, un outil de frappe et un support. Pour les pièces minces, les artisans pratiquaient sans doute le travail à froid par frappes successives entrecoupées de réchauffages pour adoucir le métal et restaurer sa capacité de déformation. Par la suite, il a fallu attendre 1940 pour que les Allemands inventent la forge à froid (extrusion) des aciers pour fabriquer des pièces d'armement durcis par écrouissage en économisant des éléments d'alliage. Cette innovation majeure a été rendue possible par l'introduction de la lubrification par la phosphatation et le savonnage.
- En 1970 dans le cadre des politiques d'économie d'énergie imposées par le premier choc pétrolier, la coulée continue des demi-produits en acier prend son véritable essor industriel et a depuis supplanté totalement la coulée traditionnelle en lingots pour la fabrication des produits courants en aciers. Depuis 1990 environ, l'hydroformage constitue une opération intéressante de certaines gammes industrielles de travail des métaux en feuille.
- Vers les premiers siècles de l'ère chrétienne, apparaissent les procédés d'étirage de fils à travers des plaques percées et d'usinage de pièces à l'aide de burins, forets, limes et scies. Petit à petit, ces procédés mécaniques d'usinage (dits traditionnels)

se sont diversifiés en tournage, fraisage, perçage, brochage, taraudage..., procédés pratiqués sur diverses machines-outils spécialisées. Leur mise en œuvre et leurs performances ont considérablement évolué à partir de 1960 avec l'introduction de la commande numérique qui

- donne naissance, entre autres machines-outils polyvalentes, aux centres d'usinage. Malgré les progrès des procédés de formage sans enlèvement de matière, les procédés mécaniques d'usinage restent les procédés de mise en forme des métaux les plus importants d'un point de vue économique.
- À la Renaissance, apparaissent le laminage, devenu depuis, du fait de sa très haute productivité et de sa grande polyvalence, le procédé de mise en forme sans enlèvement de matière le plus important, et le procédé de gravure par eau forte, devenu à l'ère moderne l'usinage chimique. Ce dernier procédé reste toutefois le procédé d'usinage non traditionnel le plus confidentiel (si l'on excepte l'usinage des circuits imprimés dans l'industrie électronique), à côté des autres procédés développés à partir de 1945 : procédés d'usinage par abrasion (meulage, rectification, polissage, rodage, jet d'eau abrasif, ultra-sons), électroérosion, usinages électrochimique, au jet d'eau, oxycoupage, avec un faisceau de lumière laser ou d'électrons. Ces procédés ont permis, entre autres applications, de résoudre les problèmes d'usinage et/ou polissage des matériaux de faible usinabilité mécanique, comme les outils de mise en forme.
- Au XIX^e siècle, apparaît le filage à chaud des alliages cuivreux rendu possible par la réalisation de presses hydrauliques de fortes capacités. C'est au Français Séjournet que revient le mérite de l'invention, vers 1945, de la lubrification au verre qui rend possible le filage à chaud des aciers et d'autres alliages de haute dureté (alliages de titane...).

Procédés primitifs	Date d'émergence	Formes modernes
Forgeage libre du produit chaud	5000 avant J.-C.	Matriçage, estampage entre matrices sur pilon, presses mécaniques, hydrauliques Forge à froid des aciers Forge à tiède, Forgeage sans bavure
Fonderie	5000 avant J.-C.	Fonderie sous pression En moules perdus ou permanents Coulée centrifuge de tubes Coulée continue de brames, blooms, billettes
Formage des métaux en feuille par martelage, repoussage	5000 avant J.-C.	Opérations d'emboutissage Cisailage, Cintrage, Profilage Chaudronnerie et travail des tôles fortes Fluotournage, Repassage des produits tubulaires, Hydroformage
Étirage de fils	premiers siècles	Tréfilage multi passeÉtirage de profilés
Usinage par burin, bédane, foret, lime, scie	premiers siècles	Coupe par tournage, fraisage, perçage, brochage, taraudage, sciage Usinages par abrasion : meulage, rectification, polissage, rodage, jet d'eau abrasif, ultra-sons
Gravure par eau forte	XV ^e siècle	Usinages physico-chimique : par électroérosion, faisceaux laser ou d'électrons, par jet d'eau, oxycoupage, chalumeau plasma, électrochimique, chimique
Laminage	XVI ^e siècle	Laminages sur train tandem, cage réversible, cage universelle, cage Sendzimir, l Laminoirs de tubes à pas pélerin, Laminoirs Manesmann perceurs...
Filage à froid de Pb, métaux mous	XIX ^e siècle	Filage à chaud des alliages Al, Cu Filage à chaud (1200°C) au verre des aciers Extrusion (20 C) des aciers phosphatés savonnés

Tableau I.1 : Évolution et formes diverses des procédés de mise en forme des métaux et alliages métalliques

La plupart des objets métalliques d'utilisation courante ont subi plusieurs opérations de mise en forme à l'état massif ou/et à l'état de feuilles. Traditionnellement, la mise en forme d'une pièce métallique est suivie d'un traitement thermique permettant de conférer à la pièce la microstructure et les propriétés mécaniques requises par son utilisation, et, le plus souvent, d'un traitement de surface pour maîtriser ses propriétés

superficielles : rugosité (aspect esthétique, adhésion à un autre matériau), propriétés mécaniques (résistance à la fatigue), chimiques (résistance à la corrosion, adhésion à un autre matériau) et tribologiques (diminuer le frottement, augmenter la résistance à l'usure). Si la nature des opérations de mise en forme n'a pas fondamentalement changé durant les cinquante dernières années, leurs conditions de mise en œuvre ont très fortement évolué dans le sens d'une productivité de plus en plus élevée. Quatre grandes tendances se sont ainsi développées.

I.5. Substitution de procédés

Elle vise à remplacer diverses opérations d'usinage, peu économes en matière première et en énergie, par des opérations de mise en forme sans enlèvement de matière comme le forgeage à froid ou le frittage. Dans l'industrie automobile, par exemple, la forge à froid s'est développée au détriment de l'usinage. La coulée continue directe des demi-produits a permis d'améliorer la qualité métallurgique tout en supprimant les opérations de laminage à chaud sur lingots et en économisant de la matière (suppression des têtes et pieds de lingots). Pour les matériaux dont le coût matière est très élevé, de telles substitutions sont très attractives : ainsi le frittage permet de réduire notablement la perte de matière dans la réalisation d'éléments de turbomachines en alliages réfractaires de l'industrie aéronautique. Même pour des matériaux moins onéreux comme les aciers, le forgeage-frittage se révèle d'un grand intérêt économique pour fabriquer des pièces comme les bielles des moteurs à explosions. Par ailleurs, le forgeage à chaud se soucie régulièrement des progrès de la fonderie et de sa volonté de conquérir le marché de certaines pièces mécaniques comme les arbres à cames. Néanmoins, plutôt que de tenter la substitution systématique de procédés, il importe plutôt d'essayer de tirer parti, au mieux et de manière complémentaire, des performances des divers procédés de mise en forme, avec et sans enlèvement de matière, à l'état massif comme à l'état de feuilles, pour bâtir la gamme de fabrication la plus économique possible. Le concepteur a donc intérêt, sinon à disposer de la panoplie la plus large possible de procédés de mise en forme, du moins à bien connaître l'état

actuel de leurs possibilités techniques.

I.6. Suppression ou réduction des traitements de finition des pièces

Les praticiens de la mise en forme visent maintenant à produire directement et sans opérations supplémentaires la pièce avec toutes ses spécifications, tant dimensionnelles que mécaniques, à cœur comme en surface, tout en économisant au maximum l'énergie et la matière, notamment les éléments d'alliage rares et chers.

Des traitements thermomécaniques sont ainsi pratiqués en laminage, forgeage, filage et emboutissage à chaud. Moyennant un choix judicieux de la composition chimique de l'alliage mis en forme et des conditions thermiques durant, entre et après les opérations de formage, ces traitements permettent d'obtenir les structures et les propriétés adéquates pour l'utilisation. De tels traitements thermomécaniques ont souvent été mis au point en simulant expérimentalement la séquence des opérations à l'aide d'essais rhéologiques comme la torsion à chaud. Ainsi la baisse constante de la température de laminage à chaud des tôles d'acier et le bobinage à une vitesse adéquate permettent d'obtenir des tôles de structure bain tique, compromis intéressant entre dureté et fragilité. L'emboutissage à chaud de l'acier 22MnB5 permet d'obtenir par trempe après formage dans les outils refroidis d'obtenir une pièce de très haute résistance (1500 MPa). Par ailleurs, par le développement de procédures d'essais tribologiques, on peut maîtriser le régime de lubrification par optimisation du lubrifiant et de la nature et de l'état de surface des outils de mise en forme. On contrôle ainsi le frottement et l'état de surface du produit tout en augmentant la durée de vie des outils. Ainsi, des essais de bis poinçonnements répétés ont montré que l'utilisation d'aciers à cylindres présentant en surface des carbures durs, type carbure de vanadium, et le choix de bons additifs de lubrification permettent de former sur les outils un film de transfert fin. Ce film de transfert assure un bas frottement et permet dans le laminage à froid sur cage Sendzimir d'obtenir des tôles d'acier inoxydable au fini miroir.

I.7. Enchaînement continu des diverses opérations

Il se développe de manière irrésistible, avec élimination progressive des temps morts et des stockages intermédiaires, donnant naissance à une chaîne de production aussi continue que possible. Le caractère continu des diverses opérations a en effet un double avantage : réduction des coûts de stockage ; amélioration de la qualité du produit, toute rupture dans la chaîne de fabrication amenant l'apparition de défauts ou une baisse de

propriétés. On enfourne directement de plus en plus les demi-produits chauds en aciers élaborés par coulée continue dans les trains de laminage à chaud. On assiste au développement pour les tôles, d'installations réalisant sur une ligne continue les opérations de laminage à froid, de recuit, de déposition d'un revêtement...

I.8. Le recours aux logiciels de simulation numérique

La mise en forme des matériaux métalliques est devenue un secteur industriel de haute technicité et en progrès constant, avec une foule de problèmes dont la résolution nécessite le recours à des moyens très performants. Parmi ces outils, l'informatique occupe une place de choix. A côté d'applications classiques, type CAO, conduite de chaînes de fabrication, ou gestion de banques de données, les bureaux d'études utilisent de plus en plus les logiciels de simulation par des calculs par éléments finis des procédés. On sait en effet de mieux en mieux résoudre numériquement avec des équations décrivant les grandes déformations induites dans les procédés grâce notamment aux techniques de remaillage. Nous pouvons par exemple citer les principaux développements réalisés dans FORGE[®], un code commercial de simulation tridimensionnelle implicite par éléments finis des procédés :

- 1995 : Remaillage automatique (*automatic remeshing*) permettant la simulation de très grandes déformations.
- 1996 : Contrôle automatique de la qualité des éléments (*element quality control*) et remaillage adaptatif.
- 1997 : Développement du calcul parallèle (*parallel computing*) permettant de diminuer les temps de calcul.
- 2002 : Simulation des traitements thermiques dont la trempe (*heat treatments, quenching*).
- 2003 : Prise en compte de la déformation des outils (*deformable tools*).
- 2005 : Calculs thermomécaniques de la mise en forme couplés à l'évolution métallurgique (*coupling with metallurgy*).
- 2007 : Calcul du régime thermique des outils (*thermal regime in tools*), permettant de modéliser leur usure, et formage de multi-matériaux, (*multi body forming*).
- 2009 : "Optimisation automatique de procédés avec multi-critères (*automatic process optimization*).

- 2014 : Modélisation tridimensionnelle du chauffage par induction (*three-dimensional modeling of induction heating*)

. De tels progrès permettent d'envisager dans un assez proche avenir des outils logiciels permettant la réalisation d'une usine virtuelle de mise en forme capable, à l'aide des résultats d'expériences de métallurgie physique, d'essais rhéologiques et tribologiques, d'améliorer fortement les performances des chaînes de fabrication.

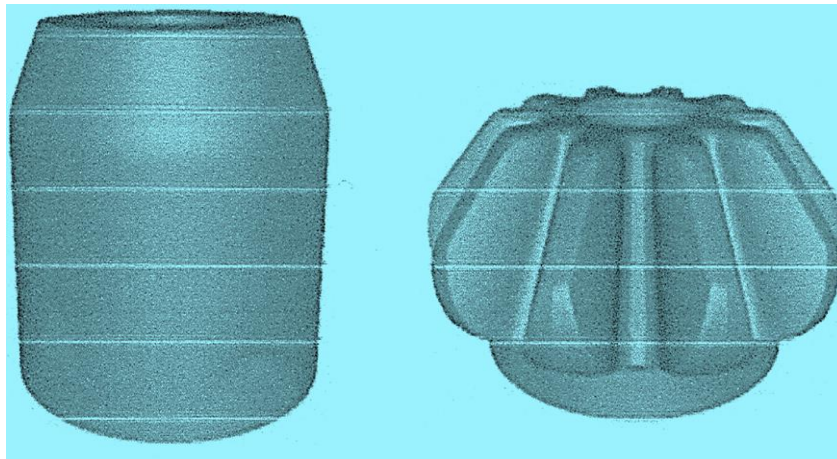


Figure I.4 : Opération de forgeage à tiède (600°C) d'engrenage en acier– L'optimisation multicritère de la forme géométrique de la préforme permet de réduire de 9,4 % la force de forgeage et de 9,8 % les risques de repli [CEMEF]

Actuellement, on conçoit systématiquement les opérations de forgeage à froid et à chaud et d'emboutissage par simulation numérique. On optimise les opérations de laminage par simulation numérique. L'informatique devient donc l'auxiliaire incontournable de l'ingénieur de mise en forme. La figure I.4 donne ainsi l'exemple d'une opération de forgeage à tiède (600°C) d'engrenages en acier. L'opération comporte deux passes de forgeage. L'optimisation par de tels calculs de la forme géométrique des outils (matrices) de la passe d'ébauchage permet de diminuer significativement la force de forgeage de la passe de finition et les risques de formation de replis.

I.9. Problématiques scientifiques

Les figures I.5 et I.6 présentent schématiquement les divers phénomènes induits par la mise en forme par déformation plastique et conditionnant la qualité du produit :

- Un écoulement de matière et de chaleur qui détermine les forces et énergies de mise en forme, la forme finale du produit, divers défauts internes ou superficiels (fissures, porosités, replis, peau d'orange...), l'évolution de la température T du métal, la structure métallurgique (fibrage, taille des grains, texture cristallographique) et les propriétés mécaniques du produit, ses contraintes résiduelles ...

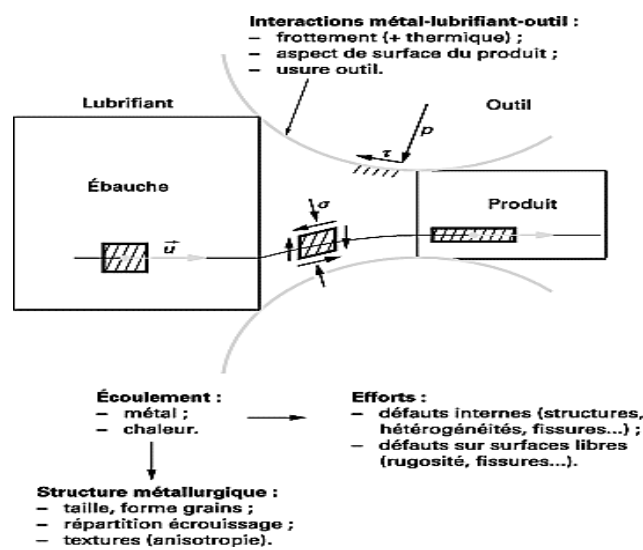


Figure I.5 : Problèmes scientifiques de la mise en forme par déformation plastique[T.I.]

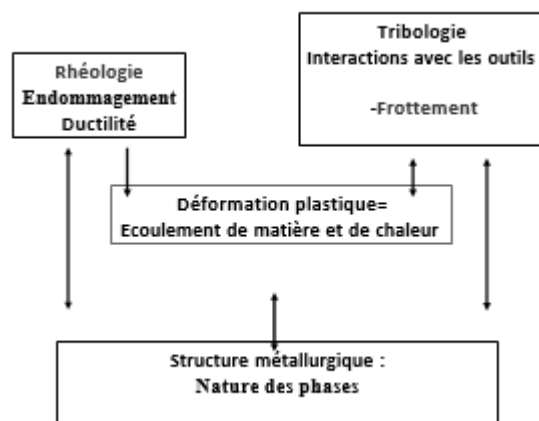


Figure I.6 : Les interactions thermomécaniques, métallurgiques et tribologiques dans un procédé de mise en forme

A decorative rectangular border with a repeating floral pattern of small flowers and leaves.

CHAPITRE II

LA MINAGE

II.1. Le laminage

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme le métal ou tout autre matériau sous forme pâteuse comme le papier ou les pâtes alimentaires. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres lisses ou cannelés, contrarotatifs (tournant en sens inverse l'un de l'autre) appelés « laminoir » ce mouvement de rotation produit engendre un effet de compression diminuant continuellement l'épaisseur initiale du matériau.

Il existe aussi des opérations de laminage particulières utilisant plus de deux rouleaux.

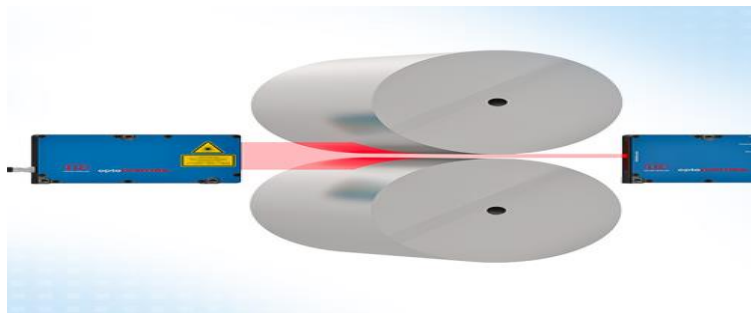


Figure II 1: Le laminage.

II.2. Le laminoir

Un laminoir est un outil industriel servant généralement à amincir des morceaux métalliques en réduisant leurs épaisseurs. Cet instrument permet aussi l'étalage, l'aplatissement et le découpage des pâtes alimentaires jusqu'à obtention de la forme et l'épaisseur souhaitée.

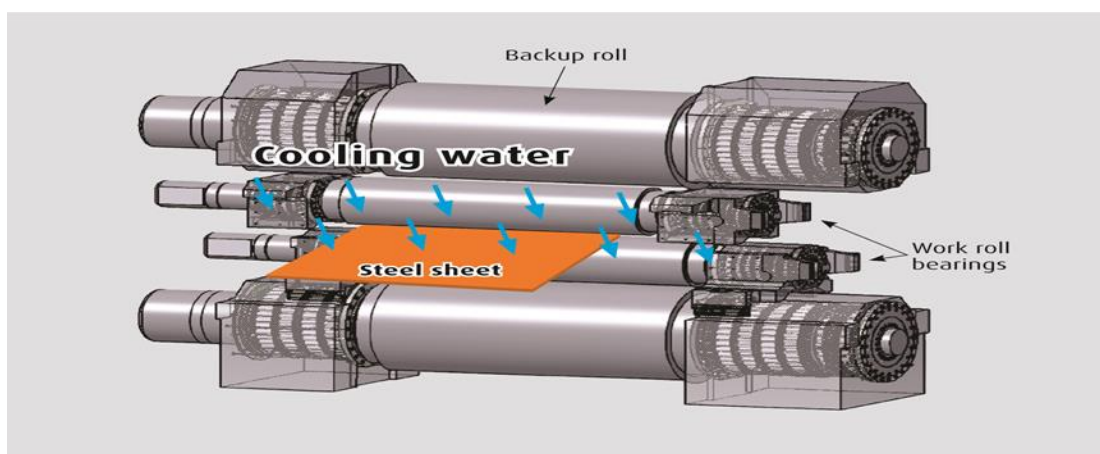


Figure II 2 : Principe de fonctionnement des cylindres de laminage

II.3. Les types de laminage

II.3.1. Le laminage à chaud

Pour les tôles fortes si l'épaisseur est supérieure à 3 mm et les tôles minces si l'épaisseur est inférieure à 3 mm Il s'impose pour deux raisons capitales :

La première est que la résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température, la seconde est d'ordre métallurgique.

La brame est acheminée à travers différentes cages successives équipées de cylindres de laminage, de façon à obtenir une large bande. À la sortie de la dernière cage, la bande est refroidie par un processus d'arrosage, puis enroulée sur une bobineuse de façon à former une bobine. La bobine est ensuite déroulée sur une ligne de déroulage, redressée, planée et coupée à la longueur souhaitée, pour obtenir des tôles. Cette technique s'applique couramment à des largeurs allant jusqu'à 2150 mm et des épaisseurs allant jusqu'à 25 mm (tout dépend notamment de la capacité du laminoir à bandes, de la ligne de déroulage, de la qualité demandée, ...). La tôle laminée à chaud non décapée est souvent qualifiée de tôle "noire".

Les bobines laminées à chaud peuvent être décapées jusqu'à une épaisseur et une largeur données. Le décapage (traitement chimique) élimine la calamine et les impuretés de la surface du produit. Pour éviter la corrosion de la surface traitée, une couche protectrice est appliquée (généralement un mince film d'huile). La norme EN 10051 reprend les tolérances sur les dimensions et la forme des bobines et des tôles à chaud décapées ou noires.



Figure II 3 : Laminage à chaud.

II.3.2 Le laminage à froid

Le laminage à froid des tôles ne se réalise qu'avec des tôles minces ayant une faible épaisseur inférieure à 3 mm

La bobine laminée à chaud et décapée peut être travaillée davantage dans un laminoir à froid. Ce laminoir se compose d'une série de laminoirs en tandem à travers lesquels la bande laminée à chaud et décapée passe et subit une réduction d'épaisseur. La bande de ré enroule à la sortie avec une épaisseur de 0,3 mm à 2,99 mm selon le résultat souhaité et programmé. La norme EN 10131 donne les tolérances sur les dimensions et la forme de la tôle laminée à froid. Cette bande laminée à froid peut ensuite être revêtue d'une couche de protection.

Le laminage à froid est généralement réalisé sur des laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, il s'agit d'un train de laminage (Voir la Figure II 4).

Deux bobineuses sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction de la bande.

Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage.

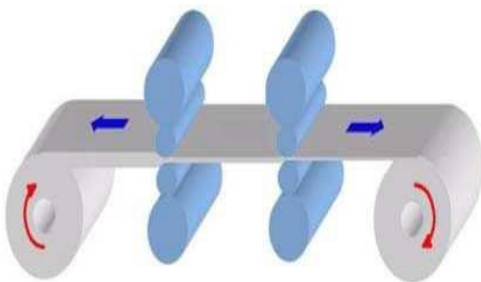


Figure II 4 : Train de laminage.



Figure II 5 : Laminage à froid.

II.3.3. Laminage quarto

Dans le laminoir quarto, la brame est laminée dans deux cages quarto (constituée de quatre cylindres), une dégrossisseuse et une finasseuse, jusqu'à obtenir l'épaisseur voulue la plaque ainsi obtenue est refroidie et aplanie. Cette technique permet de laminier des plaques plus larges et/ou plus épaisses que dans un laminoir à chaud de train à bandes, selon la qualité demandée, les propriétés mécaniques de la tôle quarto sont souvent améliorées après le laminage par des traitements thermiques comme la normalisation. La norme EN 10029 précise les tolérances sur les dimensions et la forme de la tôle quarto.

Les cages des laminoirs sont généralement quarto, composées de deux cylindres de travail de faible diamètre (de l'ordre de 10 cm), assurant le laminage, et de deux d'appuis de diamètre plus grand, comme schématisé dans la (figure II 6) différents actionneurs de la cage « vis de serrage, vérins,... etc. », permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise.

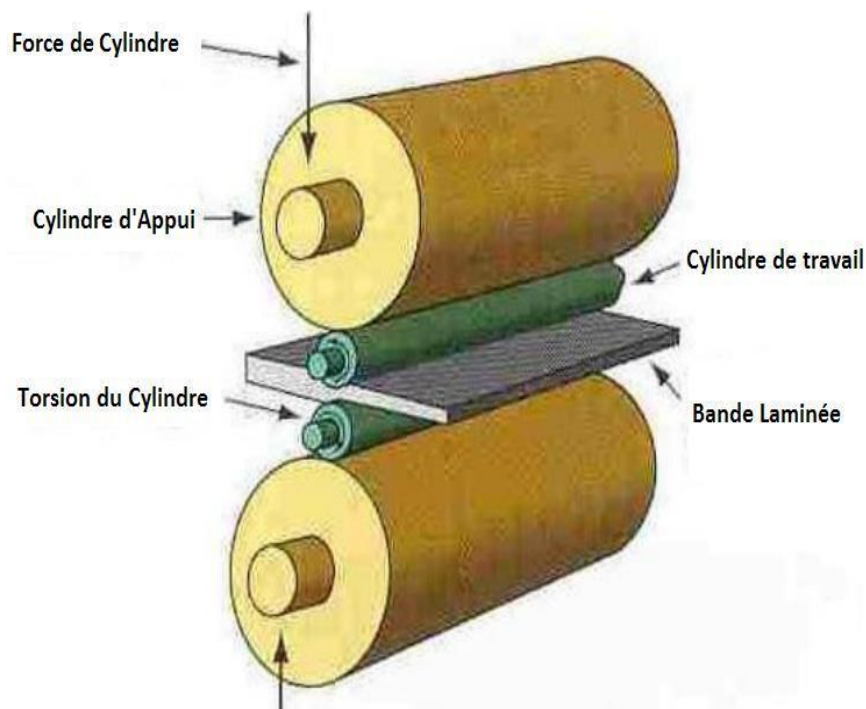


Figure II 6 : Schéma d'une cage quarto de laminage.

A decorative rectangular border with a repeating floral pattern of small flowers and leaves.

CHAPITRE III

EMBOUTISSAGE

III.1. Introduction

L'emboutissage est l'un des procédés de formage par déformation plastique à chaud ou à froid d'une feuille de métal initialement plane, appelée "flan". Il permet de fabriquer à partir des pièces de forme complexe non développables en minimisant les pertes de matière

Les deux (02) types d'emboutissage sont :

- **Emboutissage à froid** (pratiqué à la température ambiante) : c'est le procédé le plus employé pour la fabrication en grande série.
- **Emboutissage à chaud** : pour lequel la tôle est portée à la température de forgeage, se pratique quand :

Le métal ou l'alliage ne peut pas se conformer à froid ;

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.

Une telle transformation peut être produite soit en une seule étape, soit dans une séquence d'opérations, chacune modifiant la forme mais partiellement. Il est largement employé dans plusieurs domaines industriels : l'automobile, l'aéronautique, l'électroménager, ou les appareillages électriques...etc.

L'obtention de la pièce emboutie se fait par l'entraînement de la tôle sous l'action d'un poinçon qui forme celle-ci à son empreinte en fond de matrice. La figure suivante montre trois séquences de réalisation d'un embouti à partir d'un flan prédécoupé dans une tôle :

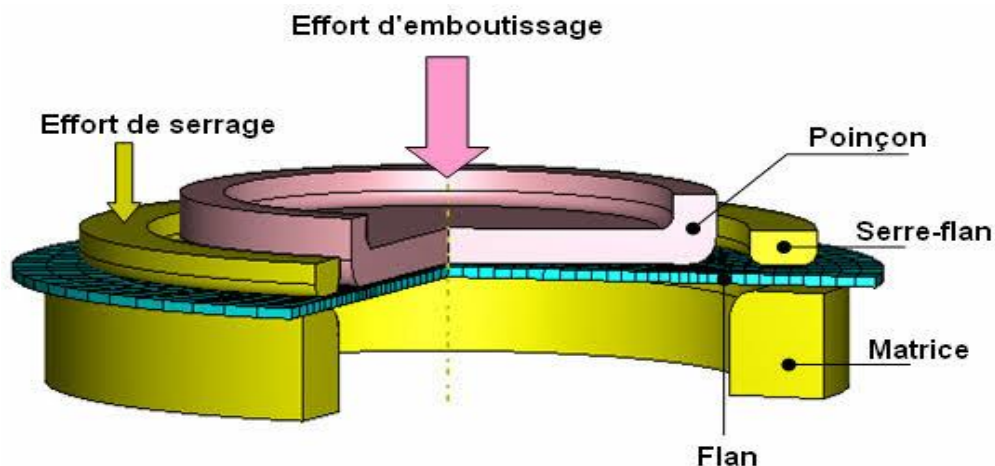


Figure III 1 : procédés de l'emboutissage

L'emboutissage est réalisé lorsque la tôle n'est pas bloquée en périphérie de la cavité de la matrice. Dans le cas contraire, la tôle ne peut pénétrer dans la matrice qu'en s'étirant et en s'amincissant, ce qui limite la profondeur du bosselage réalisable sans déchirure de la tôle. Cette situation propre aux opérations de formage se produit lorsque la tôle est retenue en périphérie soit par l'outillage ou par un rebord de tôle trop grand relativement à la partie que l'on veut déformer.

III.2. Définition

L'emboutissage est le procédé permettant d'obtenir des pièces de formes simples non développables à partir d'un flan découpé dans une tôle. Cette opération est effectuée sur des presses. La forme est déterminée par le poinçon et la matrice.

III.3. Principe de l'opération

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

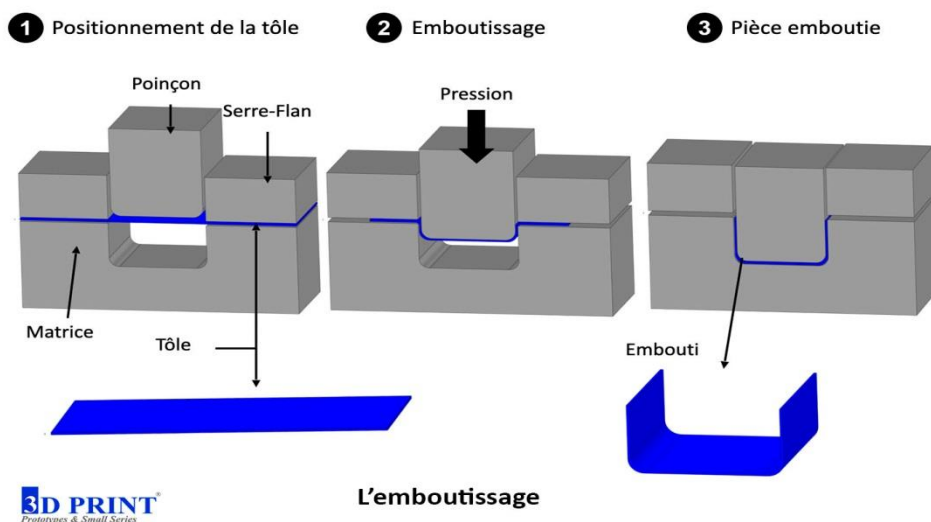


Figure III 2 : Schématisation de l'opération d'emboutissage

Au début, le matériau doit surmonter sa propre limite élastique, succombant à la déformation plastique juste après. Le flan étant plaqué, avec une certaine force contre la matrice, par le serre flan, un poinçon cylindrique P se déplace dans le sens de flèche F à l'aide d'une presse pour pénétrer dans la matrice M. Nous pouvons présenter le procédé d'emboutissage comme suit (Figure 3 et 2) :

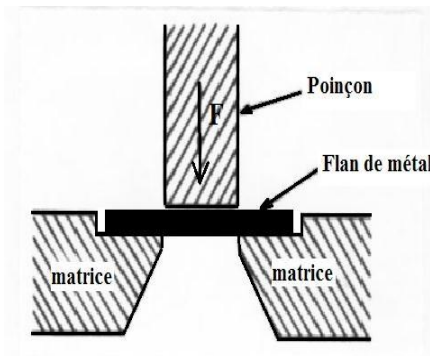


Figure III 3: Procédé d'emboutissage.

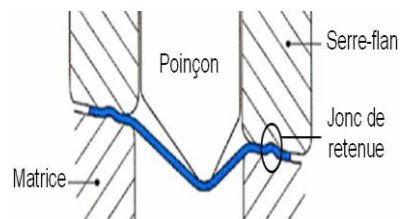


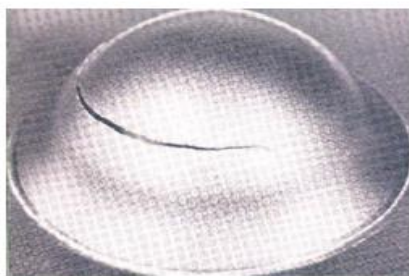
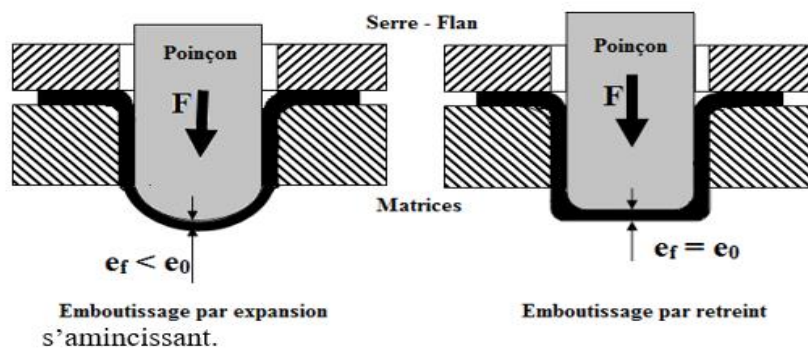
Figure III 4: Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre flan.

III.4. Mode d'emboutissage

L'emboutissage impose à la tôle différents modes de déformation dont le but est l'obtention d'une surface creuse. Le type d'outillage conditionne les deux cas limites de déformation :

- Mode en retreint (essai SWIFT ou LDR) : lorsque le flan métallique glisse librement, il n'y a pas d'amincissement du métal par emboutissage (figure III -4), c'est-à-dire que le métal est amené à glisser entre la matrice et le serre-flan de manière à réaliser la partie droite ou jupe de l'embouti.

- Mode en expansion (essai ERICHSEN) : Si la pièce a une forme complexe mais de faible profondeur on peut bloquer le flanc entre serre flan et matrice, lorsque le flan est freiné, la paroi s'amincit en même temps qu'elle s'allonge (figure III - 4), La tôle ne se déforme alors que sur le poinçon en s'allongeant dans une ou plusieurs directions et en s'amincissant.



Emboutissage en expansion



emboutissage en retrait

Figure III 5 : Principaux types de déformation par emboutissage

L'art de l'emboutissage consiste à réaliser le meilleur compromis entre ces deux modes de déformation et à optimiser ainsi l'écoulement du métal entre le poinçon, la matrice et le serre- flan. Dans la plupart des cas, l'emboutissage associé à la fois des composantes d'expansion et de retrait c'est ce qu'on appelle emboutissage mixte.

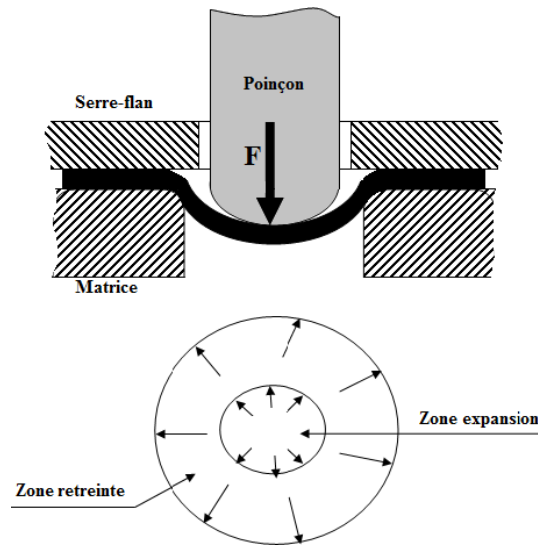


Figure III 6 : Emboutissage mixte

- Dans l'emboutissage, les limites de la déformation admissible est fixée par la limite d'étirage des flans. Le rapport d'emboutissage LDR (limite Drawings ratio) est utilisé pour :
- **déterminer** combien les opérations d'emboutissage sont nécessaires pour produire une pièce sans défaut
- **juger** de la capacité d'allongement des matériaux pour emboutissage profond ;
- **calculer** la force d'emboutissage.

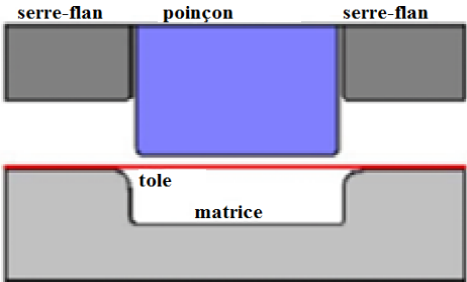
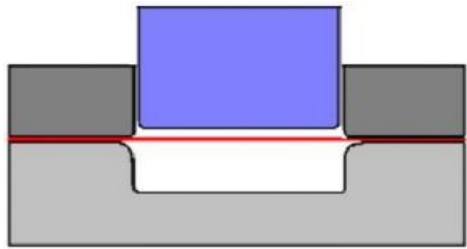
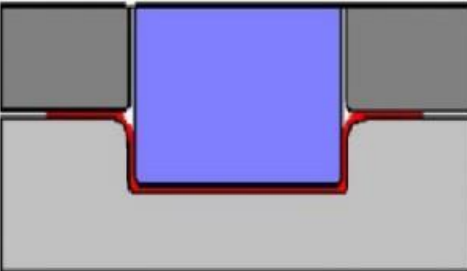


Figure III 7 : Étapes de réalisation d'une cannette

III.5. Procédés d'emboutissage

Le principe est basé sur la déformation plastique du matériau.

L'emboutissage passe par les phases suivantes :

<p>Phase 1</p>	<p>Poinçon et serre flan sont relevés. La tôle, préalablement graissée, est posée sur la matrice (voir la Figure 1).</p>	 <p>Figure 1 : phase 1 de l'emboutissage.</p>
<p>Phase 2</p>	<p>Le serre-flan est descendu et vient appliquer une pression bien déterminée, afin de maintenir le tout en lui permettant de fluer (voir la Figure 2).</p>	 <p>Figure 2 : Phase 2 de l'emboutissage.</p>
<p>Phase 3</p>	<p>Le poinçon descend et déforme la tôle de façon plastique, en l'appliquant contre le fond de la matrice (voir la Figure 3). La tôle étant maintenue avec glissement possible entre le serre-flan et la matrice, le poinçon est abaissé et vient plaquer la tôle, en la déformant, contre le fond de la matrice (voir la Figure 3).</p>	 <p>Figure 3 : Phase 3 de l'emboutissage.</p>

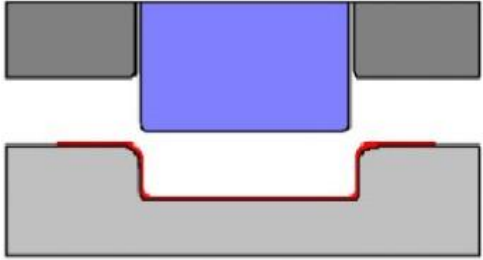
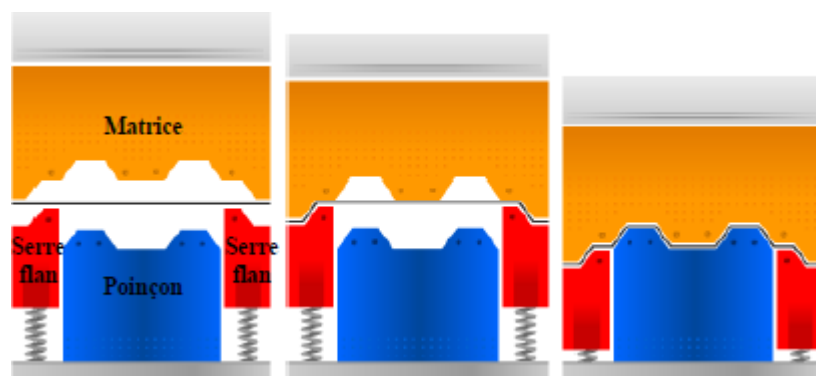
<p>Phase 4</p>	<p>Le poinçon et le serre-flan se relèvent : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée) (voir la Figure 4). La pièce formée reste au fond de la matrice. Il reste jusqu'à l'éjection et son détournage (voir la Figure 4).</p>	 <p>Figure 4 : Phase 4 de l'emboutissage.</p>
<p>Phase 5</p>	<p>On procède au détournage de la pièce, c-à-d à l'élimination des parties devenues inutiles. (Essentiellement les parties saisies par le serre-flan).</p>	

Tableau III 1: L'emboutissage passe par les phases

III.6. Emboutissage sans serre flan simple effet



Outil ouvert Descente de la matrice Descente de la matrice (jusqu'au serre flan) (et du serre flan)

Figure III 8 : Emboutissage sans serre flan simple effet

Lors de cet emboutissage, il y a formation de plis. Ces derniers limitent la réduction du diamètre possible à 20% environ, ce qui donne des emboutis dont la hauteur est approximativement égale à 15% du diamètre.

III.7. Emboutissage avec serre flan ou double effet

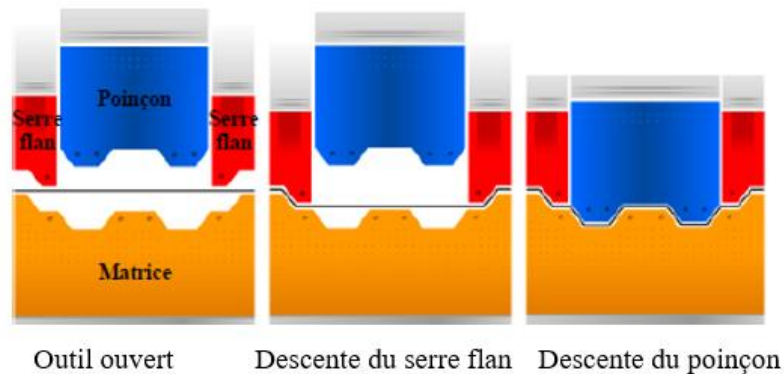


Figure III 9 : Emboutissage avec serre flan ou double effet

L'emboutissage avec serre-flan est utilisé pour les emboutis de toute hauteur.

III.8. Détermination du flan primitif

La détermination des dimensions du flan primitif a pour base l'égalité des surfaces de la pièce terminée et du flan primitif mais elles ne peuvent se déterminer avec précision qu'à la suite d'essais avec les outils d'emboutissage réalisés.

L'outil de découpage du flan primitif n'est exécuté qu'après les essais cités dans la partiethéorique.

III.8.1 Arrondi sur la matrice

Ce paramètre a une très grande importance autant pour la qualité de l'embouti que pour la répartition des forces. Une règle générale est de respecter, au minimum, un rayon de matrice r_m est : $5e \leq r_m \leq 10e$. Une formule simple due à Kackzmarek, permet de prévoir le rayon de matrice dans le cas d'un embouti cylindrique de révolution. Le rayon efficace sur la matrice est estimé par la relation suivante :

$$R_{mat} = k \times \sqrt{(D - d) \times e} \quad (1)$$

Avec :

- R_{mat} : rayon de matrice
- e : épaisseur du métal
- D : diamètre du flan
- d : diamètre du poinçon
- $k = 0.8$ pour un acier doux, et $k = 0.9$ pour l'aluminium.

On observera pour $r = 0$ un déchirement du flan et pour $r = (D - d) / 2$ la formation de plis.

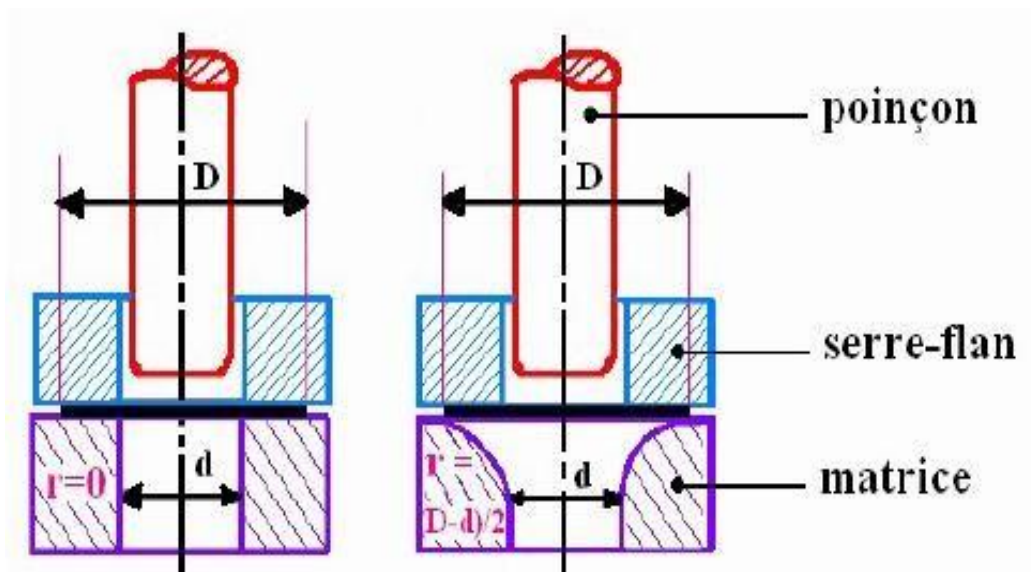


Figure III 10 : Variation de l'arrondi sur la matrice

III.8.2. Arrondi sur le poinçon

La partie de la tôle qui se trouve en contact avec la surface inférieure du poinçon subit l'action des forces de frottements qui empêchent la matière de bouger. L'effort du poinçon se transmet aux parois de l'embouti. Le poinçon doit contenir un arrondi pour ne pas percer le flan. Généralement, on prend le rayon du poinçon inférieur à celui de la matrice.

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 [1]. Dans le cas où la pièce exigerait un faible rayon, il faut prévoir une opération supplémentaire de conformation le rayon (R_p) est limité entre $5e$ et $10e$.

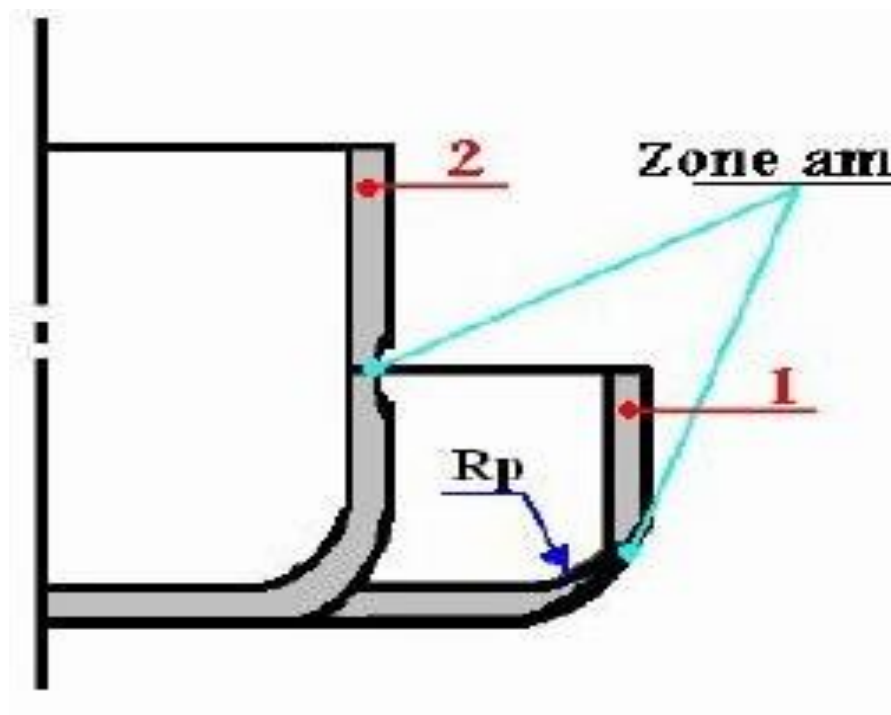


Figure III 11 : le rayon sur le poinçon

III.8.3. Rayon du flan

La formule suivante permet de déterminer très rapidement le rayon R du flan permettant d'obtenir, avec un acier doux, une pièce de hauteur h en tenant compte du rayon de coin r et du métal restant dans la collerette D :

$$R = \left(\frac{h+D}{2} \right) + r$$

Le schéma III 8 explicite les paramètres considérés :

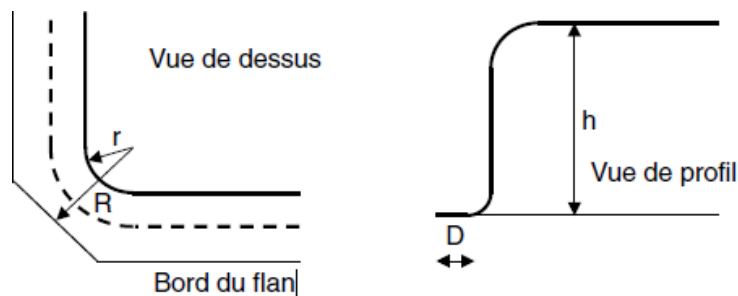


Figure III 12 : Paramètres

III.8.4. Jeu entre matrice et poinçon

Le jeu radial entre poinçon et matrice doit être plus grand que l'épaisseur nominale du métal embouti, qui sert à diminuer l'effort de poinçonnage et l'écrouissage de la zone poinçonnée et pour tenir compte des tolérances sur l'épaisseur des métaux en feuilles.

Il faut choisir un jeu convenable entre la matrice et le poinçon $j = D - d$.

- $j = 0.1 e$ pour l'aluminium
- $j = 0.07 e$ pour l'acier dur
- $j = 0.06 e$ pour l'acier mi - dur
- $j = 0.05 e$ pour l'acier doux, laiton et cuivre

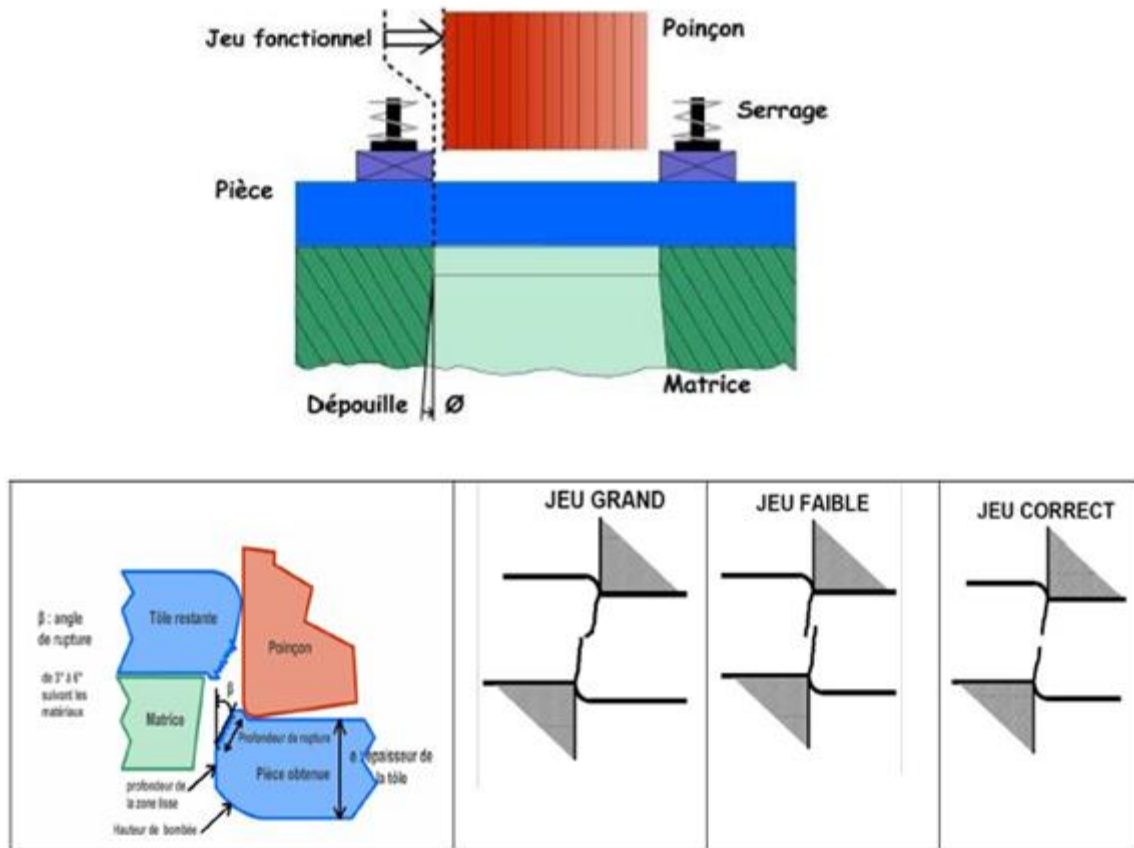


Figure III 13 : Jeu entre matrice et poinçon

Remarque

Pour parler de métaux en feuille il faut que ces deux conditions soient remplies :

$e \leq 10 \text{ mm}$ et $e \leq \frac{L}{10}$ avec : e l'épaisseur de la tôle et L la plus grande longueur en mm

10

- Du fait de la présence du jeu, l'ajoure dans la bande aura une forme conique, le jeu est pris sur la matrice si l'on désire obtenir un ajoure précis, sur le poinçon si le flan doit être précis.

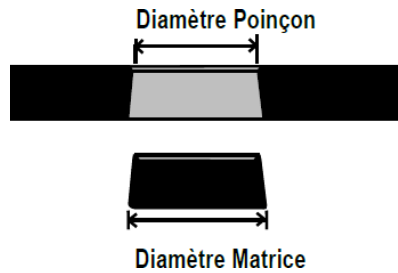


Figure III 14 : jeu de la forme conique

III.9. 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 suivante).

$$F_{BH} = P \times S_{BH}$$

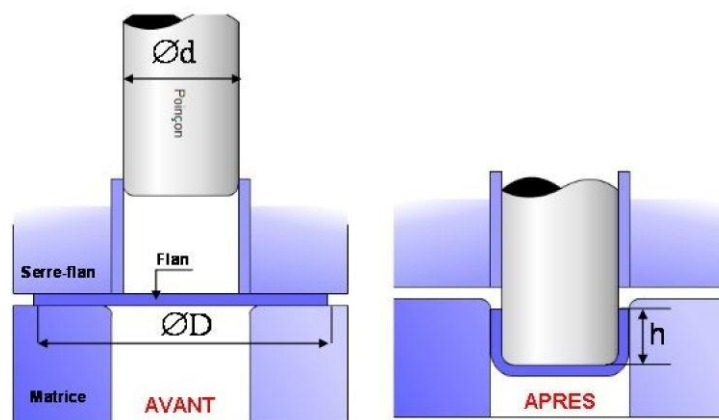


Figure III 15 : Détermination du diamètre initial du flan

III.9.1 Détermination des forces d'emboutissage

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).

III.10. Emboutissage cylindrique

L'effort nécessaire pour emboutir des pièces cylindriques dépend des diamètres de l'embouti et du flan, de l'épaisseur, du type de matériau, de la pression du serre-flan, de la vitesse d'emboutissage, du rayon entrée matrice, du jeu entre poinçon-matrice et de la lubrification. Sa valeur maximale correspond à la charge de rupture par traction du métal, de la section motrice de l'embouti.

En pratique, on utilise la formule suivante :

$$F_e = \pi \times d \times e \times R_c \times K \quad (2)$$

Avec :

- F_e : effort d'emboutissage (en daN) ;
- d : diamètre du poinçon (en mm) ;
- D : diamètre du flan (en mm) ;
- e : épaisseur de la tôle (en mm) ;
- R_c : résistance de la tôle à la traction (en daN/mm²) ;
- K : coefficient en fonction de d/D .

d/D	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
K	1	0.86	0.72	0.6	0.5	0.4

Tableau III 2: le coefficient K en fonction de d/D

III.11. Emboutissage rectangulaire

Dans le cas de l'emboutissage rectangulaire, on utilise la formule :

$$F_e = e \times (2 \times K_A \times \pi \times r + K_B \times L) \quad (3)$$

Avec :

- F_e : effort d'emboutissage ;
- e : épaisseur de la tôle ;
- R_m : résistance de la tôle à la traction ;
- $K_A = 0,5$ pour les emboutis peu profonds ou $K_A = 2$ pour les emboutis dont $h=5$ à $6r$;
- $K_B = 0,2$ pour un jeu important et pas de serre-flan ; $K_B = 0,3$ à $0,5$ si écoulement facile et faible serre-flan ; $K_B = 1$ si fortes pressions serre-flan,
- r : rayon de la matrice ;
- $L = 2(a + b)$.

On pratique pour les pièces cylindriques, l'effort est déterminé d'après le tableau suivant :

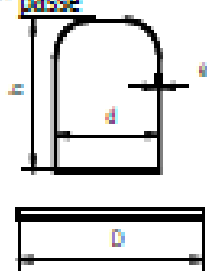
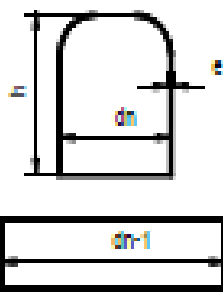
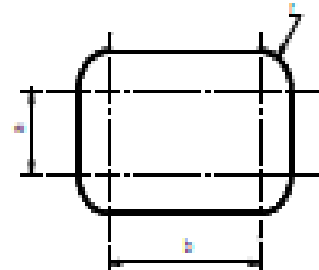
Opération	Effort (N)	Energie (J)	Observations																					
<p><i>Pièce cylindrique</i></p> <p>1-1^{ère} passe</p> 	$F_p = K \pi d e R_r$	$W_p = \frac{K_p h F_p}{1000}$	<table border="1"> <tr> <td>d/D</td> <td>0.55</td> <td>0.6</td> <td>0.65</td> <td>0.7</td> <td>0.75</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>1</td> <td>0.86</td> <td>0.72</td> <td>0.6</td> <td>0.5</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.8</td> <td>0.77</td> <td>0.74</td> <td>0.7</td> <td>0.67</td> <td>0.64</td> </tr> </table>	d/D	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	K	1	0.86	0.72	0.6	0.5	0.4		0.8	0.77	0.74	0.7	0.67	0.64
d/D	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8																		
K	1	0.86	0.72	0.6	0.5	0.4																		
	0.8	0.77	0.74	0.7	0.67	0.64																		
<p>2-n-ième passe</p> 	$F_{pn} = 0.5 F_{pn-1} + Q \pi d_n e R_r$	$W_p = \frac{K_p h F_p}{1000}$	<table border="1"> <tr> <td>dn/dn-1</td> <td>0.7</td> <td>0.75</td> <td>0.8</td> <td>0.85</td> </tr> <tr> <td>Q</td> <td>0.8</td> <td>0.6</td> <td>0.5</td> <td>0.35</td> </tr> </table>	dn/dn-1	0.7	0.75	0.8	0.85	Q	0.8	0.6	0.5	0.35											
dn/dn-1	0.7	0.75	0.8	0.85																				
Q	0.8	0.6	0.5	0.35																				
<p><i>Pièce quadrangulaire</i></p>  <p><i>h = hauteur</i> <i>L = 2(a+b)</i></p>	$F_p = e R_r (2K_A \pi r + K_Q L)$	$W_p = \frac{0.7 h F_p}{1000}$	<p>$K_A = 0.5$ pour les emboutis peu profonds $= 2$ pour les emboutis dont $h=5$ à $6r$.</p> <p>$K_Q = 0.2$ pour un jeu important et pas de SF $= 0.3$ à 0.5 si écoulement facile et faible SF. $= 1$ si fortes pressions SF.</p>																					
<p><i>Pièce quelconque</i></p>	$F_p = p e R_r$	$W_p = \frac{h F_p}{1000}$																						

Tableau III 3 : Effort de poinçon

III.12. Détermination des forces de serrage du serre-flan

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.

La présence du serre-flan ne s'impose que si $d < 0.95 D$ ou $e < 0.02 (D - d)$.

III.12.1 En cylindrique

Pour un embouti cylindrique :

$$F_s = \pi(D^2 - d^2) \times P \quad (4)$$

4

Avec :

- F_s : effort d'emboutissage
- D : diamètre du flan ;
- d : diamètre du poinçon d'emboutissage ;
- P : pression spécifique sur le serre-flan.

Matière (flan)	P (daN/mm ²)
Acier doux	0,25
Tôle étamée	0,30
Cuivre	0,20
Laiton	0,20
Acier inoxydable	0,20
Aluminium	0,12
Duralumin	0,16

Tableau III 04 : Matériaux du flan et leurs pressions spécifiques

L'effort sur le serre-flan est ajouté à l'effort d'emboutissage lors d'emboutissage sur une presse à simple effet.

III.12.2 En rectangulaire

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

$$F_{BH} = p \times S_{BH} \quad (5)$$

Où p est la pression de serrage du serre-flan et SBH la surface du serre-flan.

III.13. Vitesse d'emboutissage

Elle se définit comme la vitesse du poinçon au moment de l'attaque de la tôle. Les transformations que subit le métal à froid entraînent un écrouissage de celui-ci dépendant de

1. Une vitesse trop faible, tend à générer un écrouissage trop important sur le métal, le rendant moins malléable.
2. Une grande vitesse tend à empêcher la propagation de la force du poinçon jusqu'à un 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.

Matériau	Vitesses mm/s
L'acier	200
Le zinc	200
L'aluminium	500
Les aciers doux	280
Le laiton	750

Tableau III 05: les vitesses optimales des matériaux

III.14. Emboutissage cylindrique profond

L'emboutissage profond consiste à fabriquer par formage généralement à froid une pièce creuse profonde (embout) à partir d'une feuille ou d'une plaque préalablement découpée (flan), et ce par action d'un poinçon et d'une matrice, et d'un serre-flan, sans réduction sensible de l'épaisseur. Le procédé est capable de fabriquer des pièces de formes circulaires (telles que des casseroles de cuisson), de formes carrées ou rectangulaires ainsi que d'autres formes complexes.

Les principaux facteurs déterminants dans l'opération d'emboutissage sont le diamètre du flan et du poinçon,

les rayons des bords du poinçon et de la matrice, le jeu entre le poinçon et la matrice, l'épaisseur du flan, la lubrification et la pression du serre.

III.15. La courbe limite de formage

La courbe qui forme la frontière inférieure du secteur C'est la courbe limite de formage [Arwidson 05]. La courbe décrit le niveau de la contrainte jusqu'à laquelle le matériau réel peut résister à l'échec, le fendage ou le ridage se produit. Après un principe de base l'expérience à assurer que le composant ne cassera pas si le niveau de contrainte ne devrait pas excéder 80% du niveau de la courbe limite de formage [Marciniak 02]. Les différents secteurs dans le diagramme 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.

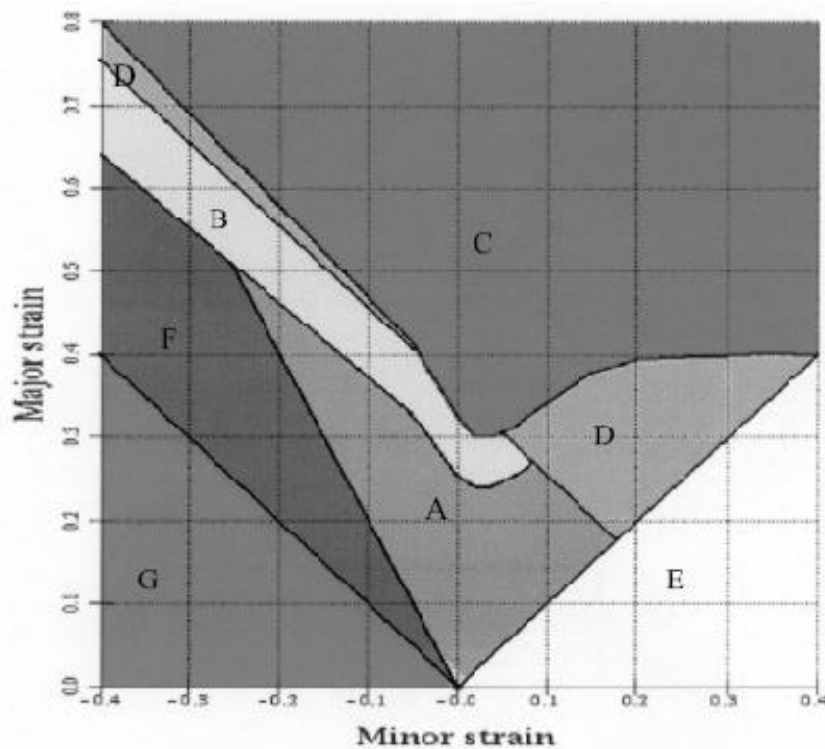


Figure III 16 : Courbe limite de formage pour différents domaines [Arwidson 05].

III.16. Etude des contraintes et déformation dans l'emboutissage

L'étude du procédé d'emboutissage passe par l'analyse des déformations plastiques et des états de contraintes rencontrés en emboutissage.

Au cours de l'opération de la mise en forme chaque portion du flan subit des déformations imposées par la forme des outils.

Ces déformations correspondent à un état de contrainte spécifique. L'état mécanique de chaque élément est défini par les déformations principales ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) et par les contraintes principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) (Figure III 17).

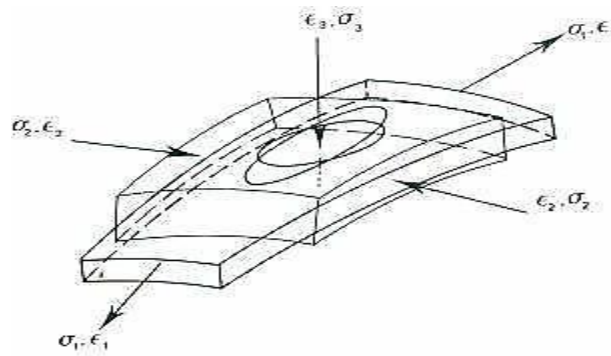


Figure III 17 : Etats de contrainte et de déformation d'un élément fini de tôle Mince.

[O.Markova 06]

Tous les modes de déformations en emboutissage et les états de contraintes sont représentés respectivement dans les diagrammes de la Figure (Figure III 19) et de la Figure (Figure III 20) et également résumés dans le Tableau III .1.

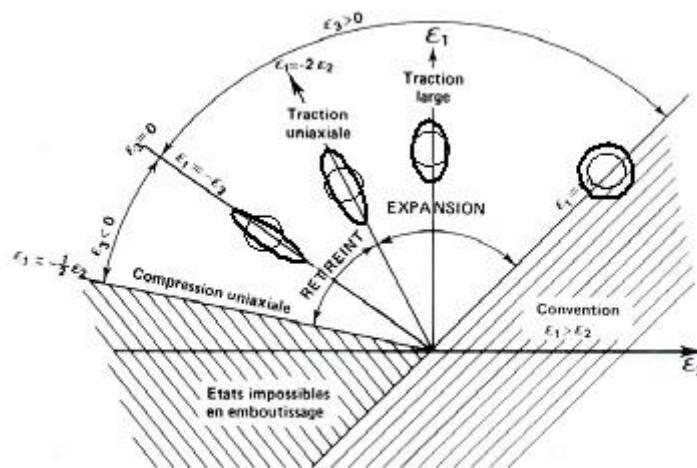


Figure III 18 : Diagramme des états de déformations plans (modes de déformation) rencontrés en emboutissage. . [O.Markova 06]

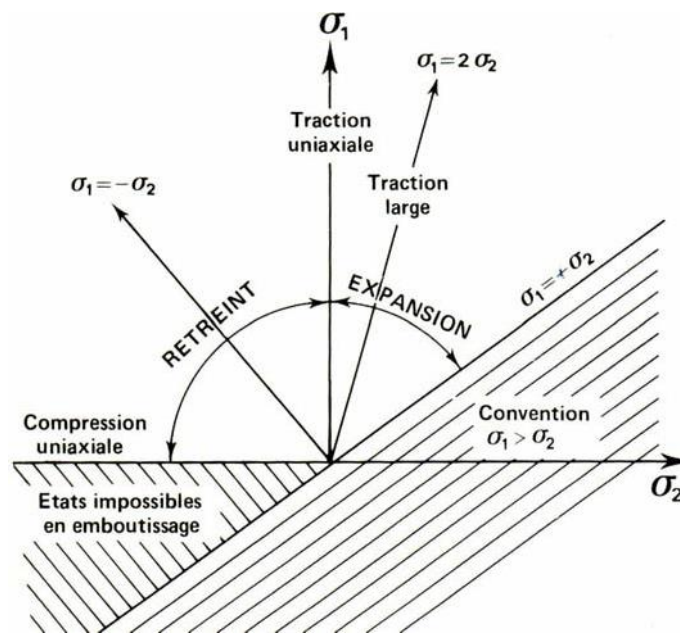


Figure III 19 : Diagramme des états de contraintes plans rencontrés en emboutissage. .

[O.Markova 06]

L'expansion bi axiale correspond à ce qu'il se passe au nez du poinçon. Cette expansion est d'autant plus importante que le métal est bloqué sous le serre-flan. La traction correspond généralement à ce qu'il se passe dans les parois verticales de l'embouti. La traction plane correspond à ce qu'il se passe sur un embouti à la transition entre la déformation sur le nez du poinçon et celle dans la paroi verticale de la pièce.

La traction uni axiale est la trajectoire limite entre les zones sollicitées en traction large et celles sollicitées en rétreint. Le cisaillement est un trajet de formage où toute déformation en traction est compensée par une déformation en compression sans que l'épaisseur diminue ou augmente.

Ce type de trajet peut se trouver dans la zone sous le serre- flan lorsque l'écoulement est homogène (embouti axisymétrique). Le domaine de rétreint se situe au-delà de la droite de cisaillement. Cette déformation correspond généralement aux zones sous le serre- flan quand la tôle s'épaissit. . [O.Markova 06]

Mode	Déformations	Contraintes
Expansion biaxiale	$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 > 0 \quad \varepsilon_3 < 0$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 > 0 \quad \sigma_3 = 0$
Expansion symétrique	$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -\varepsilon_3 \begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\varepsilon_3 / 2 \\ \varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq -\varepsilon_3 / 2 \end{cases}$	$\sigma_1 = \sigma_2$ $\sigma_1 \neq \sigma_2$
Déformation plane	$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 = 0 \quad \varepsilon_3 < 0$ $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 > 0 \quad \sigma_3 = 0$ $\sigma_2 = \sigma_1 / 2$
Traction uniaxiale	$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 < 0 \quad \varepsilon_3 < 0$ $\varepsilon_2 + \varepsilon_3 = -\varepsilon_1 \begin{cases} \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_1 / 2 & - \text{Isotropie} \\ \varepsilon_2 = r\varepsilon_3 = -r\varepsilon_1 / (1+r) & - \text{Anisotropie} \end{cases}$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 = 0 \quad \sigma_3 = 0$
Cisaillement pur	$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 < 0 \quad \varepsilon_3 = 0$ $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 < 0 \quad \sigma_3 = 0$ $\sigma_1 = -\sigma_2$
Rétréint	$\varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_2 < 0 \quad \varepsilon_3 > 0$	$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_2 < 0 \quad \sigma_3 = 0$
Compression uniaxiale	$\varepsilon_3 + \varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \begin{cases} \varepsilon_1 \neq \varepsilon_3 \neq -\varepsilon_2 / 2 \\ \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_2 / 2 \end{cases}$	$\sigma_1 > \sigma_3$ $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$

Tableau III 06 : Modes de déformation d’emboutissage. . [O.Markova 06]

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.

Influence de la taille des grains

La limite d’élasticité d’un métal poly-cristallin est donnée par la relation de Hall-Petch [Hall, 1951] et [Petch, 1953]

(5)

$$\sigma_e = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

Où d est le diamètre moyen des grains, σ_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 tels que peau d'orange.

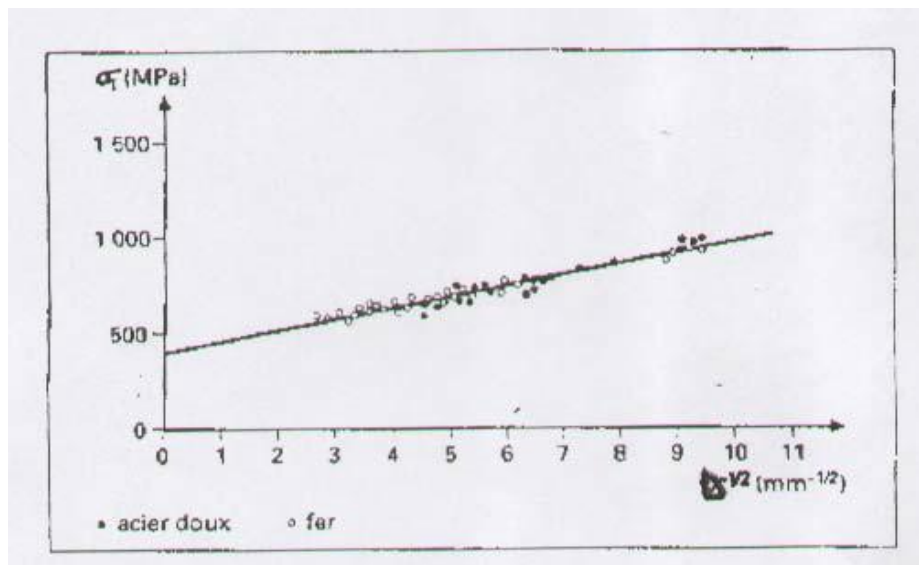


Figure 20 : Variations de la limite inférieure d'un acier doux en fonction de la taille du grain. [O.Markova 06]

De la texture Influence 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 III 21), par contre après la déformation, les grains s'étendent dans le sens des efforts appliqués en produisant une structure fibreuse.

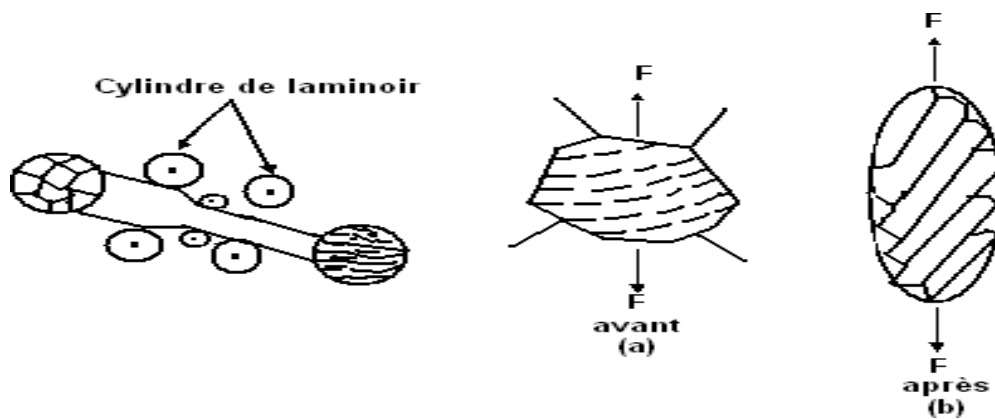


Figure III 21 : Texture de déformation. [Michel .Colomb]

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...). [Michel .Colomb]

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 le 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 circonférentiellement ; 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 de la 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).

C'est alors plutôt le coefficient d'érouissage qui importe car la répartition des déformations, particulièrement dans la zone de rupture sur

le nez de poinçon. Si l'on considère les déformations, un coefficient r élevé a aussi pour effet d'incliner les trajectoires de déformations vers la gauche ceci est favorable [Col 02-1].

III.17. 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 [Col 02-1], [Col 02-3].

A decorative rectangular border with a repeating floral pattern of small flowers and leaves.

CHAPITRE IV

PLIAGE

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré au procédé de pliage, qui est une transformation de forme à froid d'un matériau plat, avec ou sans lubrification, obtenue par dépassement de sa limite élastique. Cette opération se distingue de l'emboutissage par le fait que les contraintes latérales sont nulles. La dualité « expansion-rétreint », les deux modes de sollicitations qui entrent en jeu en emboutissage, n'est généralement pas rencontrée.

IV.2. Définition

Le pliage est une opération conformation à froid qui consiste à donner une forme en L ou en V à une tôle plane en changeant la direction de ses fibres de façon brusque, une partie est comprimée, et l'autre subit une tension suivant un angle.

Il existe plusieurs techniques pour plier une pièce :

- Pliage en l'air dans une presse-plieuse
- Pliage en frappe, pliage sur plieuse à sommier ou universelle...

IV.3. Principe du pliage

Le pliage est une déformation obtenue grâce à une force appliquée sur la longueur de la pièce. Celle-ci sera en appui sur 2 lignes d'appuis et s'apparente à la flexion. Il faudra dépasser la limite élastique pour obtenir l'angle voulu.

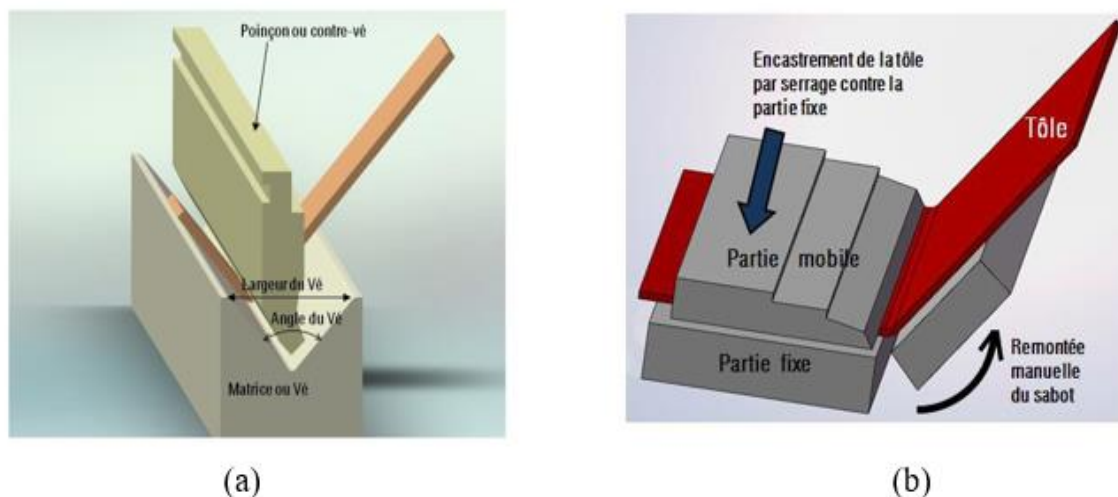


Figure IV 01 : Procédés de pliage : (a) pliage par rotation d'un outil pivotant, (b) pliage sur presse plieuse.

IV.4. Machines de pliage

IV.4.1. Plieuse universelle manuelle

Cette machine est utilisée pour les petites séries, elle permet des pliages assez complexes pour des tôles de dimension importantes, avec une qualité et précision moyenne.



Figure IV 02: Plieuse à tablier manuelle

IV.4.2. Plieuse presse universelle

La presse-plieuse est une machine qui applique les lois de la flexion pour plier des tôles. Les tôles sont placées sur une matrice(ou vé),

Appuyée contre des butées réglées auparavant. En actionnant une pédale, l'opérateur fait descendre le poinçon (ou contre- vé) et va grâce à une force, plier la tôle jusqu'à un degré choisi. Les réglages s'effectuent en fonction de l'épaisseur, du matériau, des longueurs à plier et des outils choisis. Les limites des presse-plieuses sont surtout la longueur de pliage et la force de pliage.



Figure IV 03 : Plieuse presse universelle

IV.5. Différents techniques de pliage

IV.5.1. Pliage en frappe

Le poinçon entraîne les deux branches libres du pli jusqu'au contact des faces intérieures de la matrice, il en résulte un écrouissage de la zone pliée et l'angle obtenu est sensiblement égale à celui du vé.

Cette technique permet d'obtenir des pièces précises, mais elle nécessite des efforts de pliage importants (environ $30t/m/mm$ d'ép.). Il faut un outillage pour chaque angle et il est limité aux tôles jusqu'à 2 mm d'épaisseur. Le fait de matricer l'intérieur du pli permet d'obtenir des angles très précis ($\pm 0,5^\circ$).



Figure IV 04: pliage en frappe

IV.5.2. Pliage en l'air

Les branches libres du pli ne viennent pas au contact des faces intérieures du vé. La limitation de la descente du poinçon et l'écartement du vé, permettent d'obtenir les plis aux angles désirés. Ce mode de pliage est couramment utilisé car les forces appliquées sont environ 5 fois moins importantes que pour du pliage en frappe.

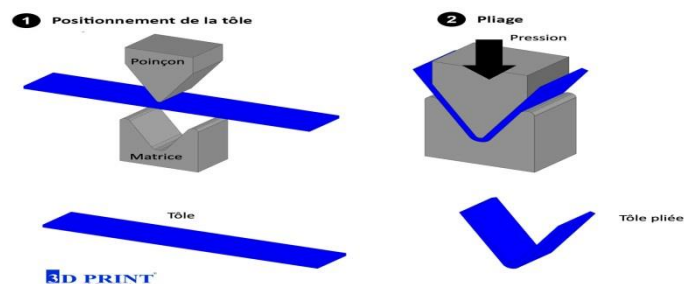


Figure IV 05: pliage en l'air

IV.5.3. Pliage sur élastomère

Ce procédé consiste à remplacer la matrice en métal par un coussin élastique en caoutchouc enchâssé dans un support métallique.

Le pliage à l'aide d'un outil élastique convient particulièrement à la mise en œuvre de tôles minces ayant reçues un traitement superficiel. Cette technique a l'avantage de ne jamais marquer la tôle, et nécessite des efforts très importants.

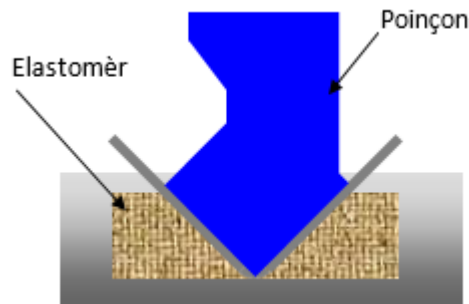


Figure IV 06: pliage sur élastomère

Les outils utilisés pour le pliage sont en acier traité, et ils sont classés en deux catégories :

- Outils simples : de formes très variées, ils sont les plus utilisés en tôlerie, chaudronnerie.
- Outils combinés : ils peuvent effectuer plusieurs opérations simultanées (plusieurs plis, des poinçonnages, découpages...). Ces outils sont très spécialisés et coûteux. Pliage en V

Outillage simple, le poinçon est fixé sous le coulisseau de presse, la matrice sur la table.

Un éjecteur facilite la récupération de la pièce et drageoir positionne le flan sur la matrice.

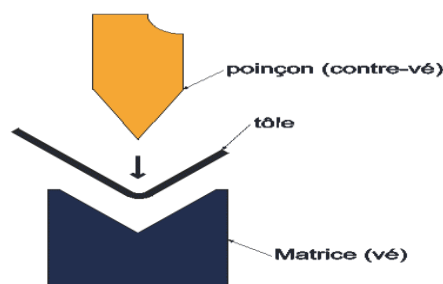


Figure IV 07 : pliage en V

IV.5.4. Pliage en équerre

La zone pliée produit un effet de chasse qui doit être compensé par une surface de réaction L'aile la plus courte qui celle qui doit être relevée

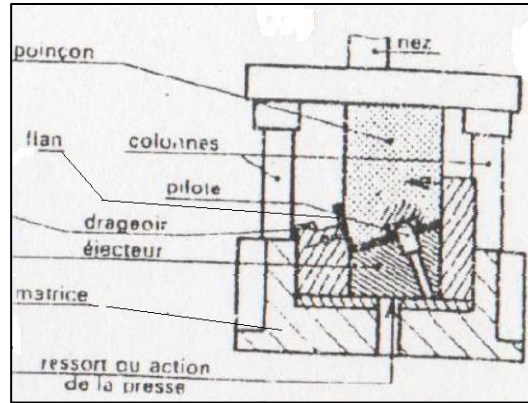


Figure IV 08 : pliage en équerre

IV.6. Pliage en U

- a) Pliage avec ailes extérieures (pièce 1): limité aux faibles hauteurs h, si h est importante la pièce est réalisée en deux passes (figure IV 9).
- b) Pliage avec ailes intérieures (pièce 2): réalisé en deux opérations (figure IV 9), ou en une opération (figure IV 9) avec un outil à cames mais longueur de pièce limitée.
- c) Pliage fermé (pièce 3) : l'ébauche est fait en deux opérations, frappée ensuite sur mandrin intérieur pour obtenir des cotes précises (figure ci-dessous).

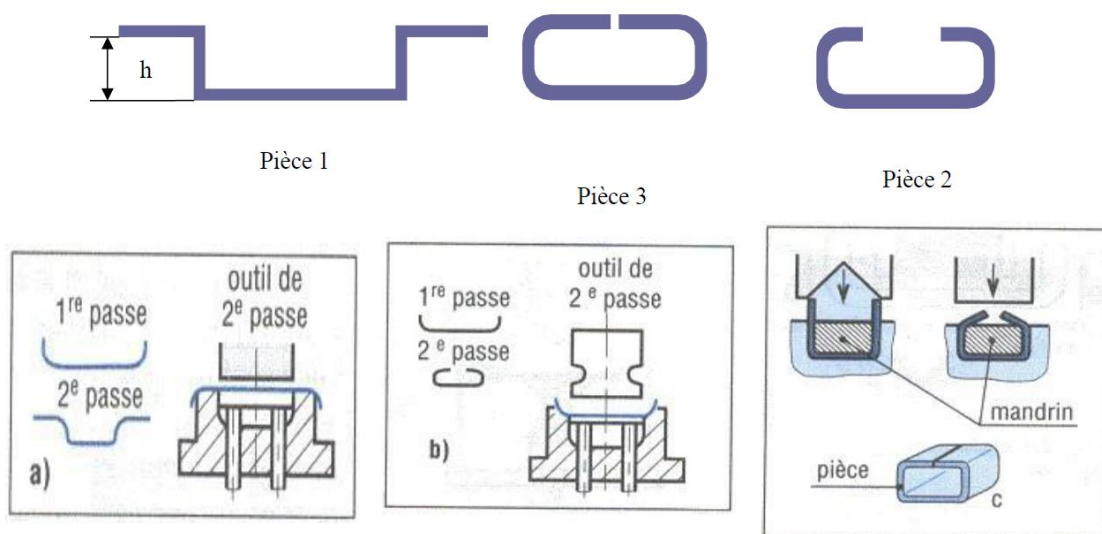


Figure IV 09: pliage avec ailes extérieur en deux passes (a), pliage avec ailes intérieur en deux passes(b) et pliage fermé (c)

En associant ces différentes méthodes, on peut produire des formes roulées ou bordées (figure ci-dessous).

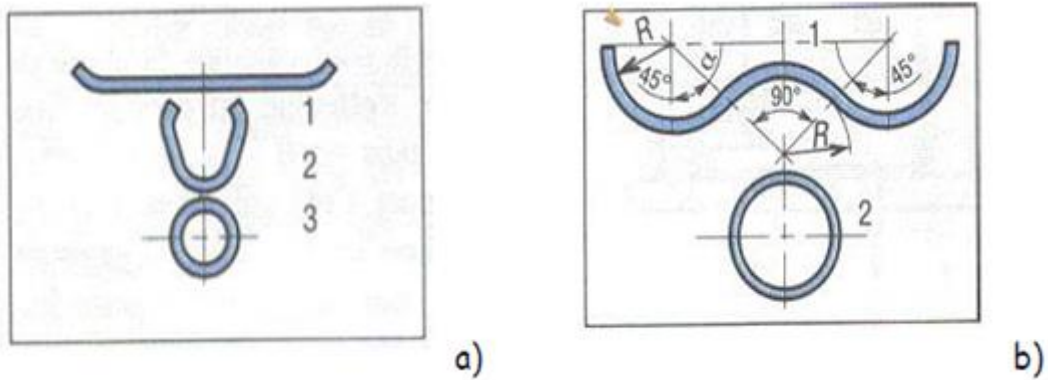


Figure IV 10 : a) trois opérations b) deux opérations

IV.7. Pliage en Z

L'outil utilisé est simple et peu coûteux mais fournissant des pièces peu précises. L'outil est présenté en fin de course. Les ressorts sont calculés pour qu'au cours de la descente, le pliage s'effectue en premier lieu en (a) sur l'arête de l'éjecteur, puis en (b) lorsque la serre flan vient en butée sur son support. Les parties flottantes sont rapportées en acier dur.

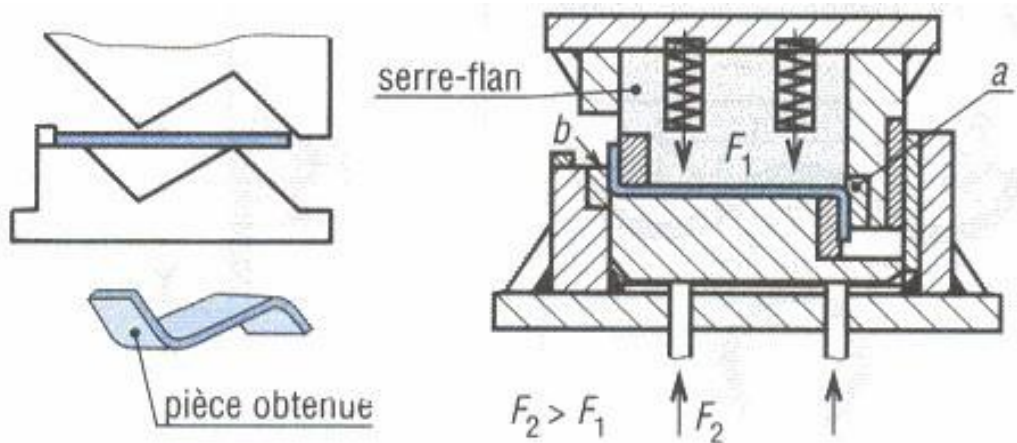


Figure IV 11 : Outil de liage en Z

IV.8. Le pliage en L

Le pliage en L ou en tombé de bord consiste à plier un flan en porte-à-faux à 90°maintenuentre la matrice et le serre-flan.

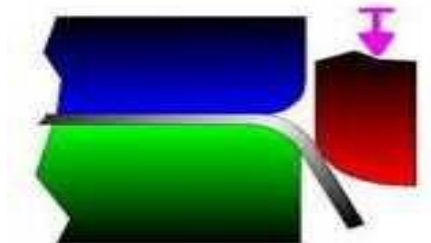


Figure IV12 : Pliage en L.

IV.9. Analyse de la déformation

Sous l’action du poinçon, la zone de déformation de la pièce est soumise à des contraintes de compression pour les fibres intérieures (en contact avec le poinçon) et à des contraintes de traction pour les fibres extérieures. Ces contraintes s’annulent sur la fibre non déformée dénommée la fibre neutre.

IV.10. Position de fibre neutre

Le maintien de l’équilibre des sections l’une qui augmente, l’autre qui diminue provoque un déplacement de la fibre neutre vers le rayon intérieur.

Le rayon de fibre est donné par la relation : $R_f = R_i + K \times e$ avec K :

Coefficient qui dépend de rapport $\frac{R_i}{e}$ donné par le tableau suivant :

R_i / e	> 0.65	> 1.00	>1.50	>2.40	>3.80
K	0.30	0.35	0.4	0.45	0.50

Tableau IV 01 : Tableau de coefficient de proportionnalité

IV.11. Allongement de la fibre extérieure

C’est allongement supporté par les fibres les plus tendues.

Il est définit par la relation :

$$A\% = \frac{(Ri + e)^2 - (Ri + e/2)^2}{Ri + e/2} \times 100$$

Exemple : $A\% = 14\%$ cette valeur est acceptable pour un acier doux mais insuffisant pour un acier dur.

IV.12. Rayon minimale de pliage

Le rayon minimal de pliage est le plus petit rayon pour lequel il n’y a pas apparition de fissures lors du pliage. Il dépend de:

- La nature et de l’état du métal (recuit, écroui)
- L’angle du pliage : Pour une épaisseur donnée le rayon de pliage croît avec l’angle de pliage.
- L’ épaisseur

Le rayon minimal peut être déterminé par le formule suivante :

$$\frac{R_{mini}}{e} = \left[\frac{A-4}{100-Z} \right] \times \left[\frac{1}{\left[\frac{A-4}{100-Z} \right] + 2} \right]$$

Avec :

- R_{mini} : Rayon minimal de pliage
- e : Epaisseur de la tôle
- $A\%$: Allongement après rupture
- $Z\%$: Coefficient de striction

Le tableau ci-dessous donne le rayon minimal de pliage en fonction de la matière et de l’épaisseur de la tôle.

9		Rayon (mm)					Matière	État	Épaisseur mm	Rayon mm	b
		Laiton		Acier							
Epaisseur mm	doux	dur	qualité embou-tissage (E - ES)	qualité courante (TC)		Alliages d'aluminium	AlCuMg (A-U 2 G)	doux	2	1 à 3 e	
								recuit	3	2.5 à 3 e	
1	0.2	0.3	0.5	0.6	AIMgSi (A-GS)		doux	1.2	0.8 à 1.2 e		
1.5	0.25	0.4	0.75	0.8			trempe	2.5	2 à 2.5 e		
2	0.3	0.6	1	1.2	AIMg (AG 06)		recuit	3.5	2.5 à 3.5 e		
2.5	0.4	0.8	1.25	1.5			doux	2	1 à 2 e		
3	0.5	1	1.5	1.8	mi-dur		3	2 à 3 e			
3.5	0.6	1.25	1.75	2.1	AIMn (A-MI)		doux	1.2	0.8 à 1.2 e		
4	0.7	1.5	2	2.6			dur	3	2 à 3 e		
4.5	0.8	1.75	2.25	3	Alliages de magnésium		plié à froid	10	4 à 10 e		
						plié à chaud	2	2 e			
c						Al	doux	1	0.3 à 1 e		
							dur	2	1 à 2 e		
c		Matière	T40 (recuit)	T50 (recuit)	T60 (recuit)	TA5E (recuit)	TU2 (recuit)	TA8DV (recuit)	TA6V (recuit)	TA6V6E2 (recuit)	TV13CA (trempe)
Rayons de pliage mini à 180°			1.5 e	2 e	2 e	4 e	2 e	4 e	4 e	3 e	3 e

Tableau IV 02 : Rayon minimal de pliage

IV.13. Avantages et Inconvénients

Avantages	Inconvénient
+Outillage simple + Pièces réalisées de formes complexes +Cintrage de tôles de forte épaisseur (faiblesplis régulièrement espacés).	- Longueur de pli limité à la longueur des machines - Elasticity residual difficilement contrôlable

IV.14. Développement du flan

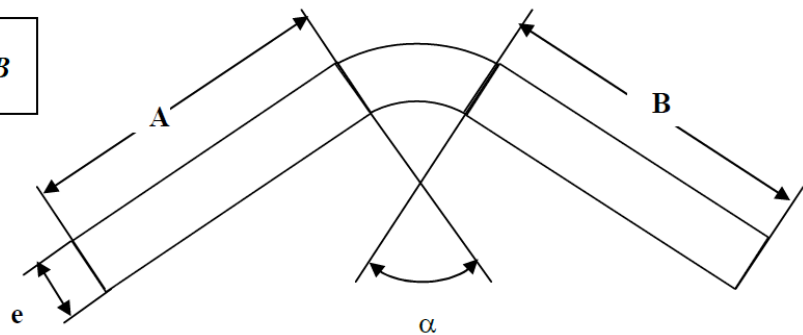
Connaissant la position de la fibre neutre on peut facilement calculer la longueur développée du flan par deux méthodes.

IV.15. Méthode des sections: (1ère Méthode)

Cette méthode consiste à décomposer la pièce en éléments simples permet de calculer rapidement, on fait la somme de tout le segment, la longueur développée de flan.

- Le développement du flan est donné par la longueur de la fibre neutre :

$$LD = A + \frac{2R_f \times \alpha}{360} + B$$



- Si on considère la pièce de la figure 13, la longueur de son flan est donnée par :

Figure IV 13: longueur de son flan

$$L_f = l_1 + 2 R_1 \frac{\alpha_1}{360} + l_2 + 2 R_2 \frac{\alpha_2}{360} + l_3$$

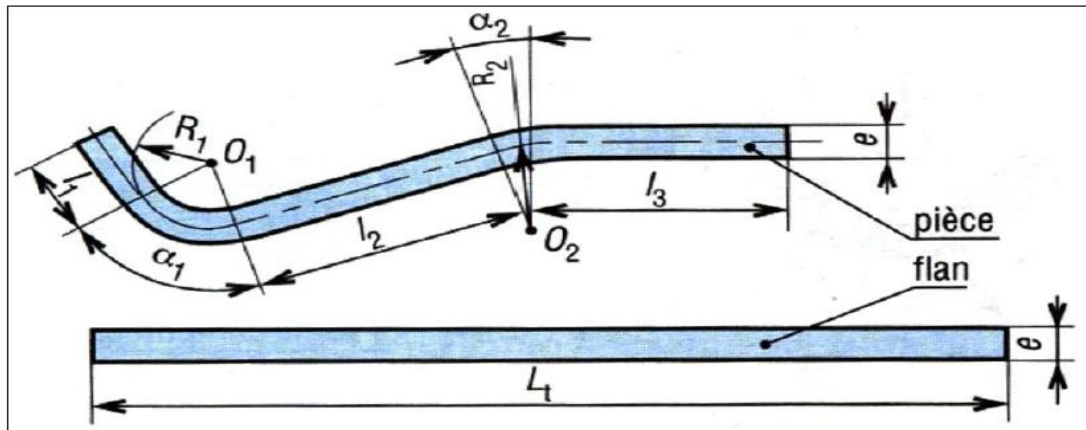


Figure IV 14: La développée avant pliage

IV.16. Calcul théorique: (2ième Méthode)

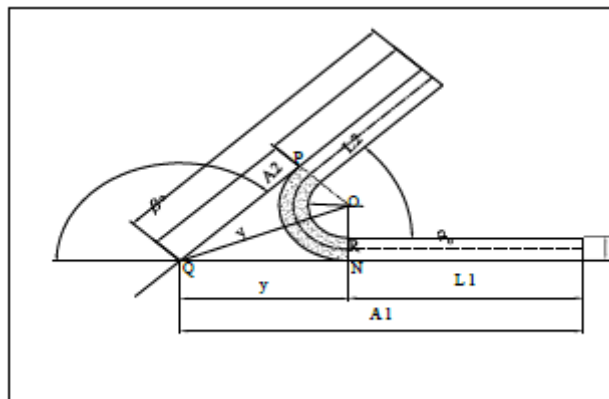


Figure IV 15: l'angle de pliage

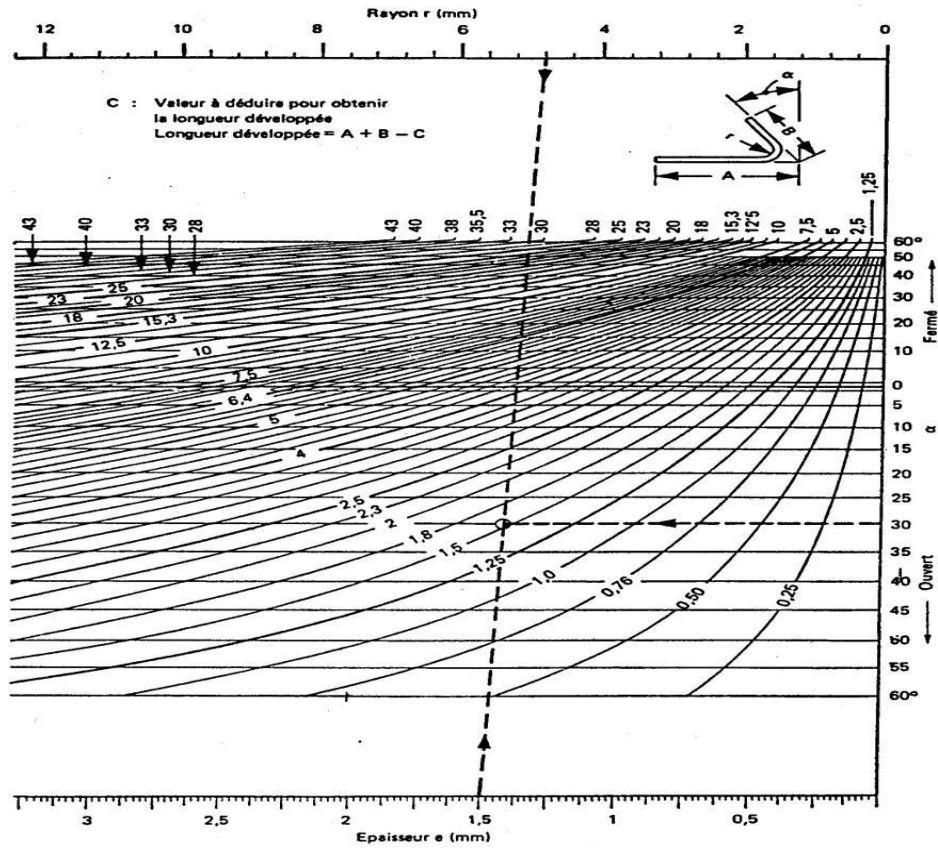
Quel que soit la valeur de l'angle de pliage la longueur développée est donnée par la formule suivante :

$$LD = A1 + A2 - C$$

Avec :
$$C = 2(R + e) \cot g \left(\frac{180 - \alpha}{2} \right) - \frac{\alpha}{180} (R + ke) \alpha$$

• Si la pièce contient (n) plis, on aura alors :
$$LD = \sum_{i=1}^{n+1} Ai - \sum_{i=1}^{i=n} Ci$$

• C peut être déterminé en utilisant l'abaque suivant :



Exemple d'utilisation

- **Données :**
Rayon de pliage : $r = 5 \text{ mm}$; angle de pliage : $\alpha = 30^\circ$ (ouvert) ; épaisseur de tôle : $e = 1,5 \text{ mm}$.
- **Résultat :**
La valeur de C est donnée par la courbe située à l'intersection de la droite qui joint les valeurs de r et de e et l'horizontale passant par α . Ici **C = 1,5 mm**

Extrait de l'ouvrage : *Die Design Handbook*, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, édité par Mc Graw-Hill Book Company, p. 2-15.

Figure IV 16 : Abaque de détermination de la valeur de C

IV.17. Les côtes machine (côte de mise en buté)

La cote machine C_m est la distance entre la butée et l'outil (axe de vé ou l'arête du contre Vé). C'est la côte de référence du pli de la pièce.

$$C_m = A_1 - C / 2 \quad \text{sachant que : } LD = A_1 + A_2 - C$$

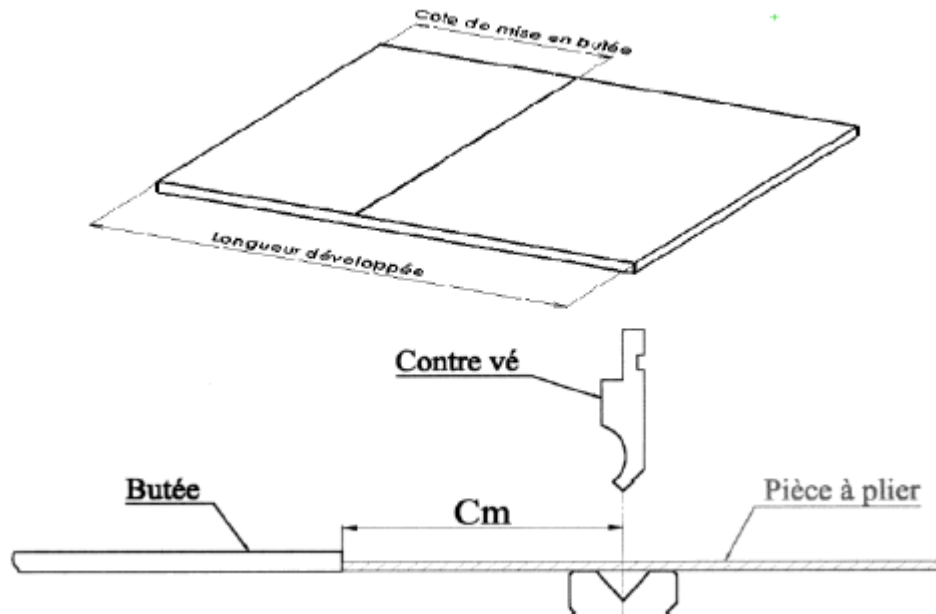


Figure IV 17 : Côte machine (côte de mise en butée)

IV.18. Rayon et Angle du poinçon à utiliser en pliage

Pendant l'opération de pliage et sous l'action du poinçon, la tôle est pliée d'un angle α_1 . Lorsque le poinçon se relève l'angle s'ouvre légèrement jusqu'à un angle α_2 différent de α_1 (figure 13). Ce phénomène, appelé retour élastique, est dû à un relâchement des contraintes élastiques. On appelle angle de retour élastique $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$.

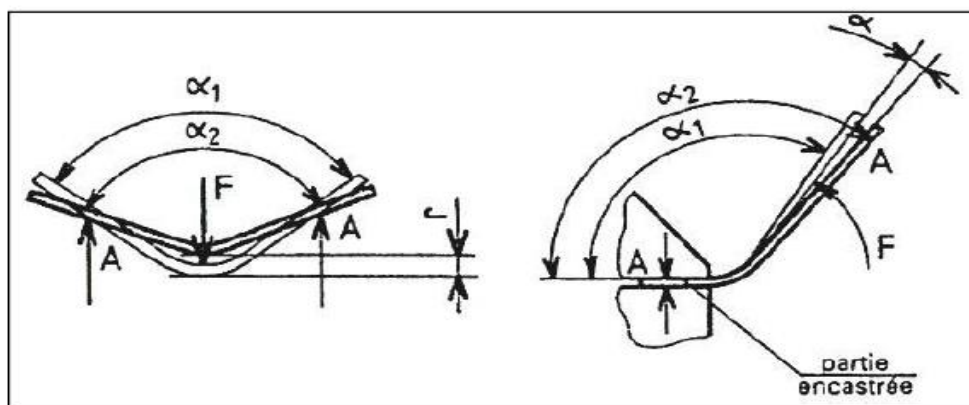


Figure IV 18 : Phénomène du retour élastique

IV.18.1. Rayon de poinçon

Pour obtenir des pièces à des cotes précises, il faut tenir compte du retour élastique au moment de la conception de l'outillage. D'où le rayon du poinçon à utiliser en pliage :

$$\frac{R_p}{e} = \frac{\frac{R}{e}}{1 + 3 \frac{R \cdot R_e}{E \cdot e}}$$

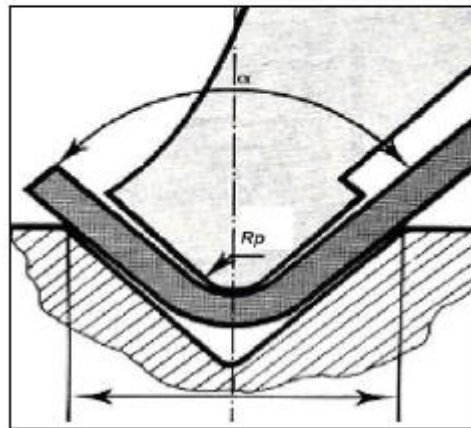


Figure 19 : pliage en V sur presse plieuse

Remarque : Cette formule est valable que pour les grands rayons de pliage $\left(\frac{R_{int}}{e} > 10\right)$

Avec

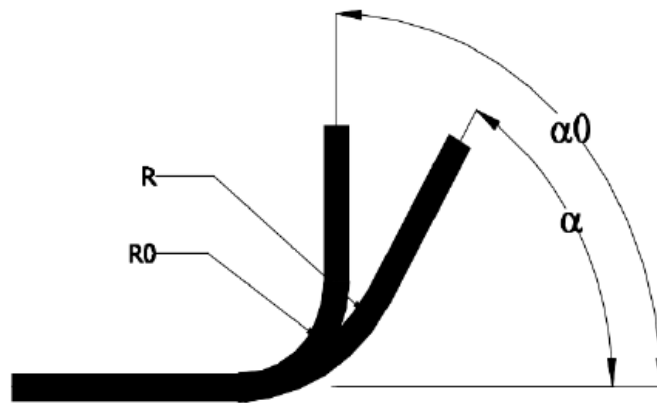
- E module d'élasticité de la tôle (N/mm²)
- e épaisseur de la tôle (mm)
- R_e limite élastique (N/mm²)
- R rayon de la pièce final (mm)
- R_p Rayon de l'outil de pliage (mm)

IV.18.2. Angle de poinçon

La fibre neutre de la tôle garde une longueur constante au cours du pliage et au cours du

retour élastique, on a : $R_0 \times R f_0 = R \times R f$ donc : $\frac{R_0}{R_0} = \frac{R f_0}{R f} = K$ avec α_0 angle de l'outil de

pliage, α angle à obtenir. La valeur de K dépend du rapport $\left(\frac{R_i}{e}\right)$ et du matériau à plier voir abaque.



$$\frac{R_i}{e} = ? \Rightarrow K$$

$$K = \frac{R_0 + \frac{e}{2}}{R + \frac{e}{2}} \Rightarrow R_0 = K \times \left(R + \frac{e}{2} \right) - \frac{e}{2}$$

$$K = \frac{\alpha}{\alpha_0} \Rightarrow \alpha_v = \frac{\alpha}{K}$$

Pour déterminer les paramètres de l'outil de pliage :

Remarque :

- Après formage, par élasticité résiduelle, le pli s'ouvre légèrement
 - En l' air : 2 à 3°
 - Avec frappe : 0,5 à 2°
- Position du pli : $\pm 0,1$ à $\pm 0,2$ mm pour $1 < e \leq 5$ mm

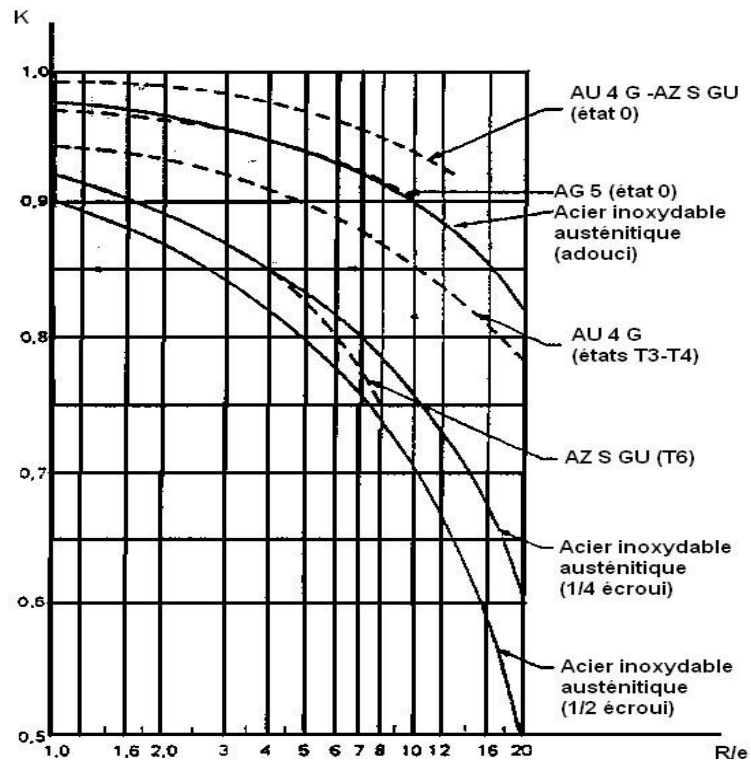


Figure IV 20 : Abaque du Coefficient de retour élastique

K		Aluminum	Acier doux	Laiton	Z2CN18-10
Ri/e	1	0.99	0.99	0.98	0.99
	2	0.99	0.99	0.97	0.97
	4	0.99	0.98	0.95	0.94
	10	0.99	0.95	0.92	0.90

Tableau IV 03 : Coefficient du Retour élastique

IV.19. Calcul de l'effort de pliage

La connaissance de l'effort à fournir dans le pliage est utile pour le choix de la presse, pour cela on utilise les formules expérimentales ou les abaques.

L'effort de pliage dépend de plusieurs facteurs englobant :

- Le matériau (la résistance, l'épaisseur)
- La forme de la pièce (en V, Z, U, ...)
- La façon d'exécution du pliage (pliage avec poinçon et matrice ou avec plaque pivotante).
- Le frottement entre le demi-produit et l'outillage.

- La vitesse de déformation

IV.20. Le pliage en V

IV.20.1. Pliage sans frappe

L'effort de pliage exercé par le poinçon est donné par la

formule suivante :
$$F_1 = K \frac{L e^2 R_m}{v}$$

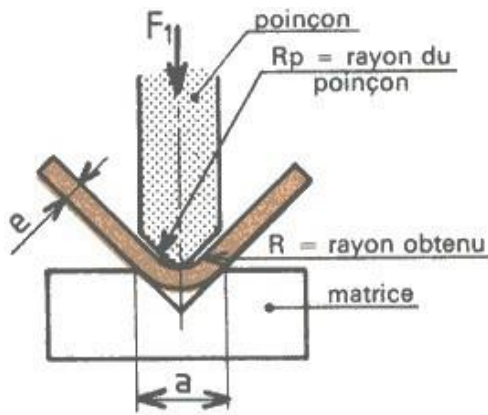


Figure IV 21 : Effort de pliage : F1

où Rm la résistance mécanique du métal à plier (N/mm2)

L : longueur pliée

e : épaisseur de la tôle (mm)

v : ouverture du V (mm)

K : un coefficient dépendant de V :

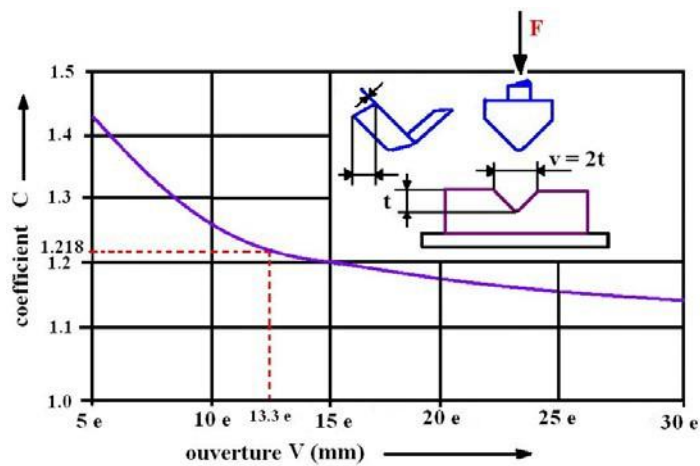


Figure IV 22 : Coefficient en fonction de V

IV.20.2. Pliage sans frappe

L'effort : $F2 = 2F1$

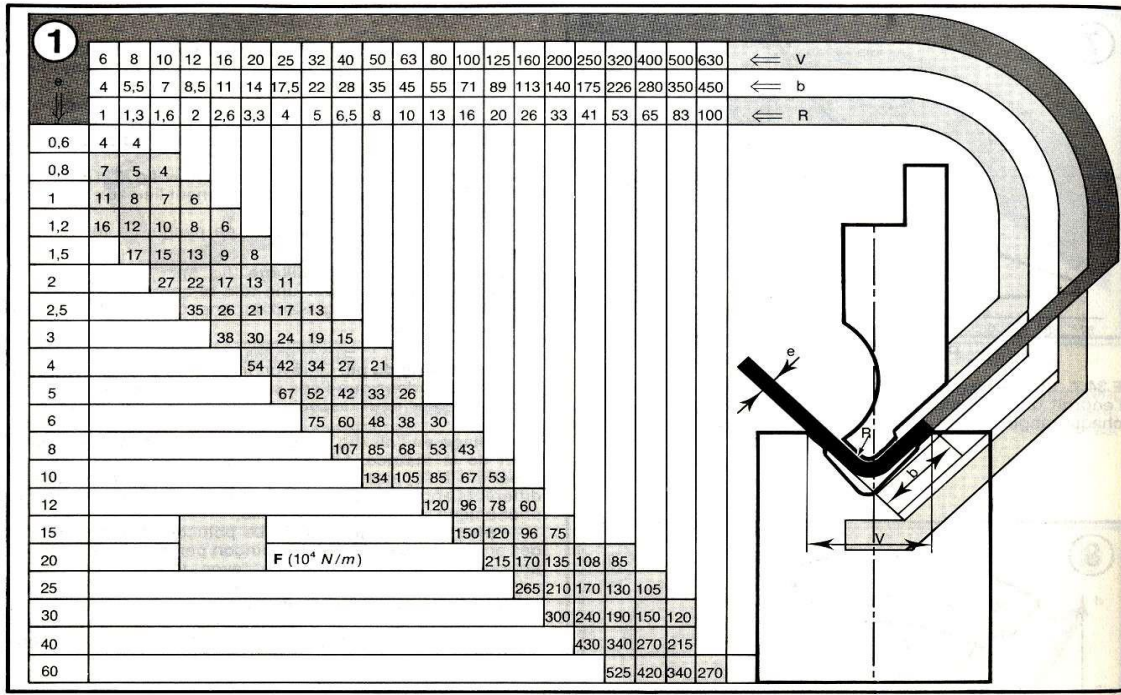


Figure IV 23 : Effort de pliage pour un acier de résistance 400 <Rm<450 N/mm2

Exemple : Pour $\begin{cases} e=2 \text{ mm} \\ v=10 \text{ mm} \\ L=2 \text{ m} \end{cases}$, l'effort est donné par $F = 2710^4 \cdot 2 = 5410^4 \text{ N}$

Cet abaque est établi pour un acier ($400 < R < 450 \text{ N/mm}^2$). Etant donné l'épaisseur e de la tôle à pliée et le rayon de pliage R, on détermine la force F qui sera multiplier par (10^4 N/m) par mètre de longueur pliée. Par ailleurs l'abaque indique la largeur minimale du bord b ainsi la largeur du V v ($6 < v < 8.e$).

IV.21. Pliage en U

IV.21.1. Sans frappe

Dans ce cas, l'effort est fortement tributaire du jeu entre poinçon et matrice. Si le jeu=épaisseurnominale de la tôle + tolérance maximale, l'effort peut être défini par la relation :

$$F3 = 2/3 \times L \times Rm \times e * (1 + \frac{e}{a})$$

Avec frappe

La relation

$$F 4 \square 2,5 \square F 3$$

Permet d’obtenir de bons résultats.

Quelques exemples de travaux réalisés sur presse plieuse

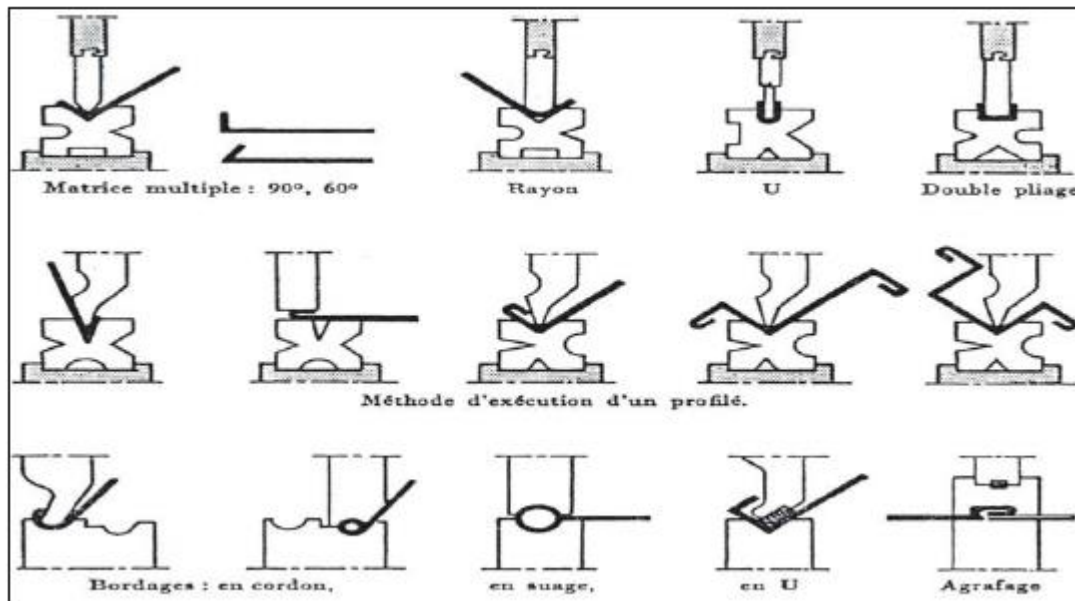


Figure IV 24 : Opérations réalisées sur une presse plieuse

IV.22. Le retour élastique

Le pliage est obtenu par déformation plastique de la tôle donc il y a forcément une déformation élastique qui l’accompagne parce que dans les processus de pliage, la valeur d’élasticité du matériel peut être dépassée mais les limites de force élastique ne peuvent pas et de là que le retour élastique on parle aussi de recouvrement élastique se produit après retrait du poinçon est inhérent à de nombreux procédés de mise en forme [5].

Il conduit à un écart géométrique entre la forme désirée et la pièce réelle obtenue après fabrication. Ce phénomène est d’autant plus marqué que la limite d’élasticité du matériau est plus élevée et son module d’élasticité plus faible.

Il se traduit généralement par une augmentation des rayons de courbure d’autant plus grande que ce rayon est grand, une ouverture des angles et un raccourcissement des fibres sous tension dans l’outil.

Après extraction des outils, la pièce ne garde pas la géométrie désirée : c’est le phénomène de retour élastique. Des hétérogénéités de contraintes apparaissent dans la

pièce (encore dans l’outil fermé) :

- dans l’épaisseur de la tôle après passage sur les rayons des outils ;
- entre des zones ayant subi des trajets de déformation différents sur la pièce.

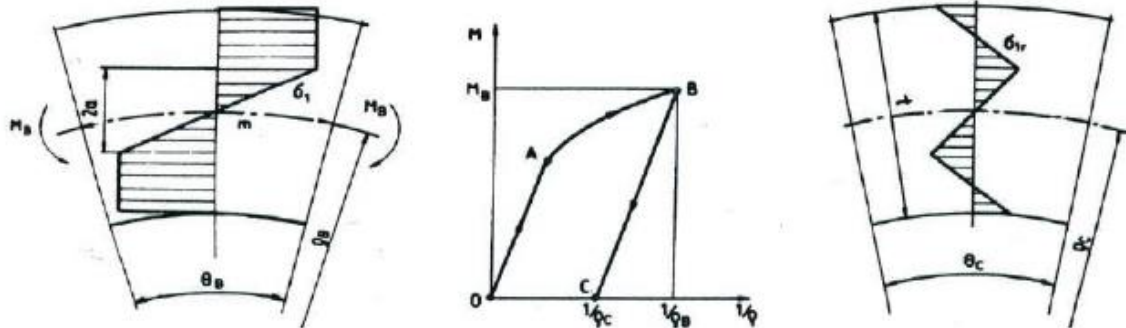


Figure IV 25 : Visualisation des contraintes dans l’épaisseur du matériau après flexion

(à gauche) et retour élastique (à droite)

Lors de l’arrêt de la charge, la tôle essaye de retourner à sa forme originale est coudée partiellement. Ces contraintes se redistribuent pour obtenir un nouvel équilibre dans la pièce. La pièce « s’ouvre ». Ainsi, pour paramétrer le retour élastique, les grandeurs représentatives sont soit des variations angulaires, soit des rayons de courbure.

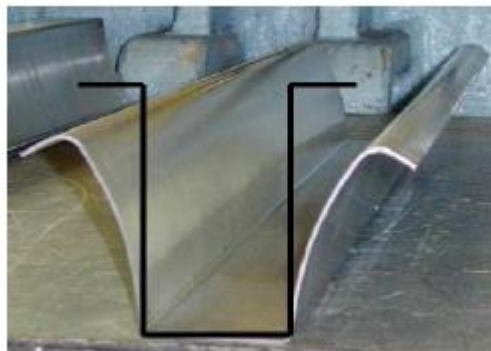


Figure IV 26 : Exemple d’ouverture d’une pièce en U après retour élastique

Afin d’obtenir une pièce de dimensions conformes aux attentes, il est donc important de prendre en considération ce phénomène. Dans le but de l’atténuer, 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.

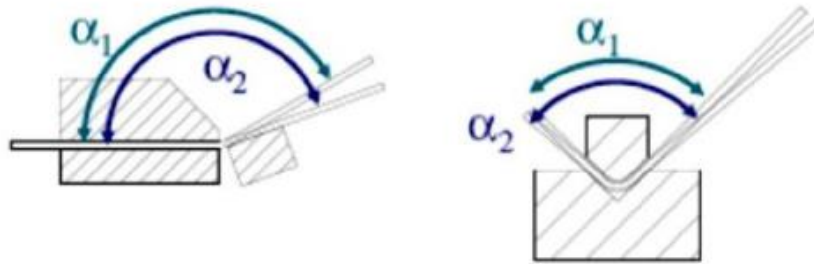


Figure IV 27 : Retour élastique lors du pliage.

IV.23. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude théorique sur le pliage en commençant

Dans un premier temps par une introduction et sa définition ce qui nous à mener à présenter les différents modes de cette technique de mise en forme des tôles et puis calculer les efforts nécessaires pour la réalisation de chaque type de pli avec le rayon de poinçon.

Ensuite nous avons cité aussi un phénomène qui pose un vrai inconvénient pas seulement sur ce procédé mais que nous trouvons aussi dans notre thème de l'emboutissage.

A decorative rectangular border with a repeating floral pattern of small flowers and leaves, framing the central text.

CHAPITRE V

LE CINTRAGE

V.1 Introduction

Les cintruses constituent un outil indispensable pour les entreprises spécialisées dans la fabrication des mobiliers ainsi que dans notre vie quotidienne.

Dans ce chapitre on présente un aperçu général sur les cintruses et le cintrage

V.2 Définition

Le cintrage est un façonnage des profilés sans enlèvement de copeaux, à l'aide ou sans l'aide de chaleur, sur des machines spéciales appelées cintruses dans lequel une partie de la matière d'œuvre est définitivement portée, tout en conservant autant que possible sa section, de sa position originelle dans un autre sens.

V.3 Procédé de travail

Dans le cintrage, une partie plus ou moins large de la matière est portée dans une autre direction par l'intervention d'une force manuelle ou mécanique (force de flexion) appliquées sur un point déterminé (pliage) ou appliquée continuellement sur plusieurs points tout près, l'un de l'autre, (cintrer et torsader).

V.4 Cintrage des tôles

Cintrer une tôle c'est lui donner, partiellement ou totalement une forme cylindrique ou conique.

V.5 Principe

Le cintrage des tôles s'obtient par un effort de flexion provoqué :

- Par pression (à la main ou à la machine)
- Par chocs (au marteau ou au maillet)

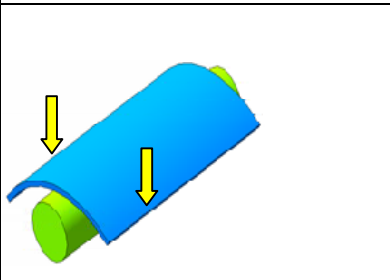
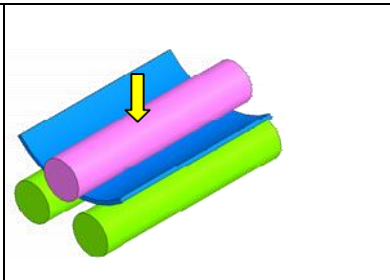
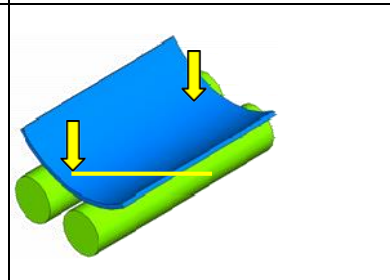
Par pression		Par chocs
		

Tableau V 01 : Principe de cintrage

Cintrer une tôle c'est lui donner, partiellement ou totalement une forme cylindrique ou conique. Le cintrage peut être :

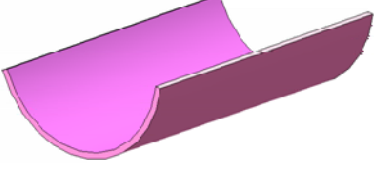
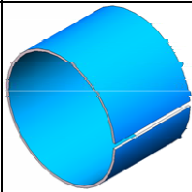
Ouvert (cintrage)	Fermé (roulage)
	

Tableau V 02 : Cintrage forme cylindrique ou conique

V.6 Longueur développée

Lors du cintrage les fibres qui sont à l'extérieur s'allongent, alors que celles qui sont à l'intérieur sont comprimées et se raccourcissent ; il existe une ligne qui reste constante lors du cintrage et qui délimite ces deux zones, LA FIBRE NEUTRE, elle subit ni allongement ni compression. Le calcul de la longueur développée se fera suivant la fibre neutre (FN).

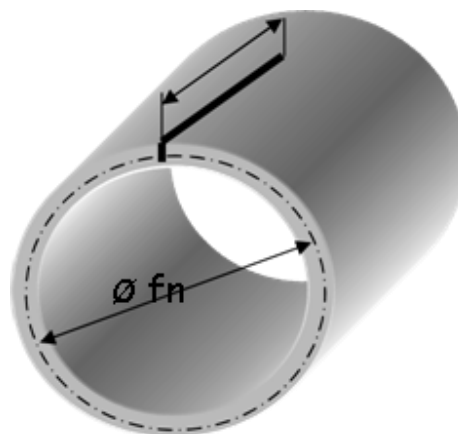
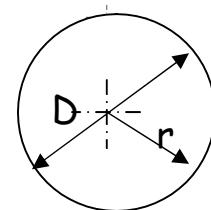


Figure V 01: principe

$$L_D = \text{Périmètre} = \pi \times D = (\pi \times 2 \times r)$$



V.7 Machines à cintrer les tôles

Elles sont fréquemment désignées sous le nom de "rouleuses" ; les organes de cintrage sont constitués par des rouleaux traités en acier dur, d'une grande résistance à la flexion

V.8 Different types de machines

Cintreuse type « Planeur »

La disposition des rouleaux entraîneurs permet le dégauchissage des tôles minces et

moyennes où leur désignation : Type PLANEUR

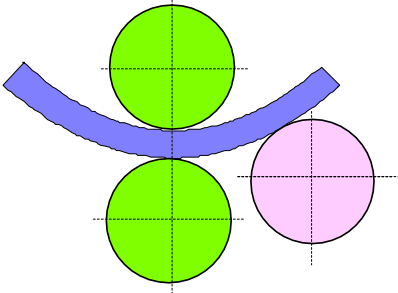
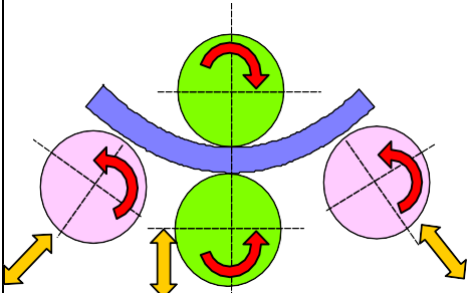

	Machine à trios rouleaux :	Machine à quarter rouleaux :
	Les 2 rouleaux entraîneurs sont situés dans un plan vertical, le rouleau cintreur se déplace obliquement.	Cette machine comporte deux rouleaux cintreurs C1 et C2, qui permettent l'amorçage sans retourner la tôle.
Principe		
Exemple et observations		Ce type de machine est conçu pour le cintrage des tôles moyennes et épaisses. Ce dispositif est très avantageux pour le cintrage de pièces lourdes et encombrantes. Amélioration de la machine à 3rouleaux ; un rouleau cintreur supplémentaire évite le retournement de la tôle lors du LE CROQUAGE

Tableau V 03 : Les machines de cintrage

LE CROQUAGE

Le principal avantage de ces machines est d'effectuer elles-mêmes le LE CROQUAGE des extrémités mais dans un sens seulement pour la machine à 3 rouleaux; il faut donc retourner la tôle pour amorcer les deux. La machine à 4 rouleaux supprime cet inconvénient.

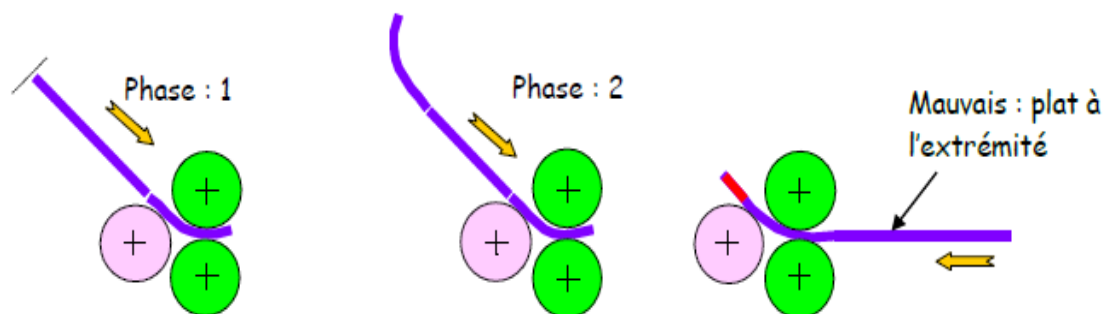


Figure V 02 : Principe de LE CROQUAGE

Pour obtenir un cintrage total avec ce type de machine, il est donc nécessaire de « croquer » les extrémités. D'une façon générale, le cintrage s'exécute en plusieurs passes en serrant de plus en plus le rouleau cintreur. Les génératrices du cylindre sont parallèles aux rouleaux.

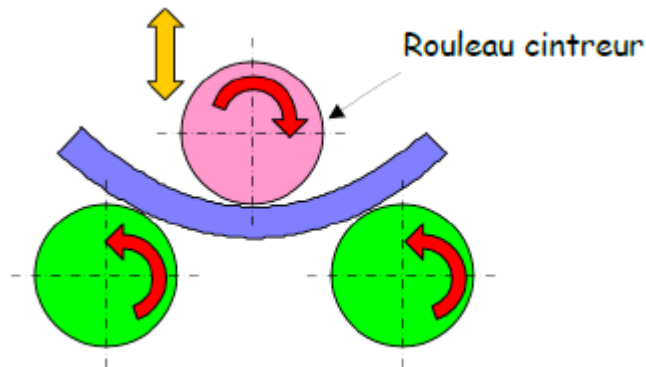


Figure V 03 : Cintrage total

Cintreuse type « Pyramidal » Figure V 03 : Cintrage total L'action du rouleau cintreur ne se fait pas sentir dès l'extrémité de la tôle, laissant subsister ainsi un plat à chaque extrémité.

D'une façon générale, le cintrage s'exécute en plusieurs passes en serrant de plus en plus le rouleau cintreur. Les génératrices du cylindre sont parallèles aux rouleaux. les sont d'abord croquées et reprises ensuite pour le cintrage.

LE CROQUAGE

<p>Sur tôles minces</p>	<p>Se fait avec un maillet sur un des rouleaux en frappant régulièrement suivant les génératrices ; (commencer par le bord)</p>	
<p>Sur tôles moyennes</p>	<p>Il se fait avec la panne du marteau à garnir, en avançant progressivement suivant les génératrices.</p>	

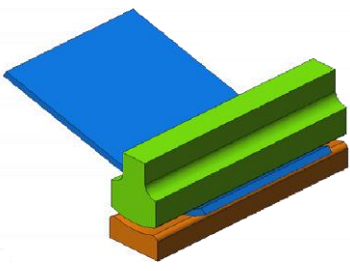
<p>Sur tôles épaisses</p>	<p>Il s'exécute à la presse entre une matrice et une panne de rayon approprié au cintrage à obtenir. Le croquage peut également être effectué sur presse plieuse avec outillage standard par plis successifs</p>	
---------------------------	--	---

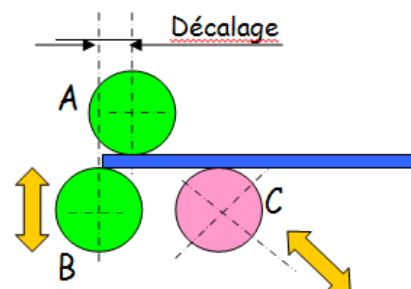
Tableau V 04 : LE CROQUAGE pour différentes épaisseur de pièce

Cintreuse à 3 rouleaux asymétrique

Cette machine est une amélioration de la machine à trois rouleaux type planeur ; elle est caractérisée par un léger décalage du rouleau inférieur par rapport au rouleau supérieur.

La tôle, encastrée entre les deux rouleaux croqueurs A et B, est maintenue en position sans exiger un serrage aussi énergique que celui demandé par le type planeur à trois ou quatre rouleaux. Cet avantage permet d'assurer une capacité de croquage égale à la capacité de cintrage.

A : Fixe en translation
 A et B : Croqueur entraîneur mécanique
 C : Cintreur ou fou



CROQUAGE :

Semblable à celui exécuté sur machine type planeur. On peut procéder à un seul craquage, puis sortir la tôle et la présenter en engageant l'extrémité amorcée.

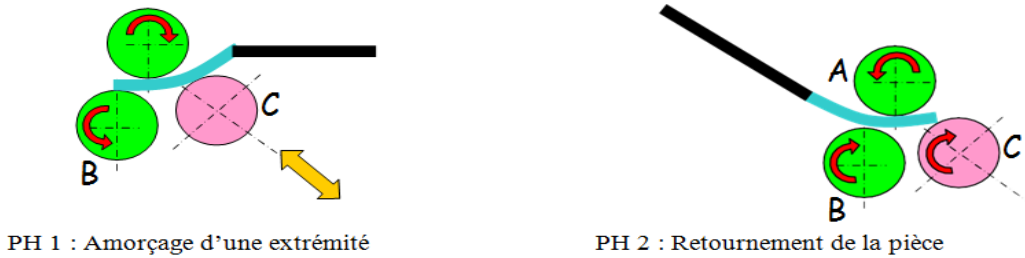


Figure V 04 : Cintrage total L'action du rouleau cintreur

Dans les travaux de série, toutes les tôles sont d'abord croquées et reprises ensuite

V.9 Cintrage a la presse

Pour le cintrage.

Il est obtenu par réglage de la course du coulisseau D'une profondeur convenable dans la matrice (Point Mort bas PMB).

On peut aussi garnir l'empreinte de la matrice d'un certain nombre de cales de façon à repérer la profondeur de descente du poinçon

Les tôles épaisses peuvent se cintrer à la presse hydraulique soit horizontale, soit verticale. Elles peuvent se cintrer Également à la presse-plieruse.

A l'inverse des rouleaux qui agissent par pression continue, Les presses travaillent par pressions successives.

On utilise généralement une empreinte en V ou en U reposant sur la table de la presse, et une panne arrondie montée sur le porte-poinçon. Pour obtenir un meilleur résultat, on soude sur la panne une tôle épaisse cintrée à un rayon légèrement inférieur au rayon de la pièce

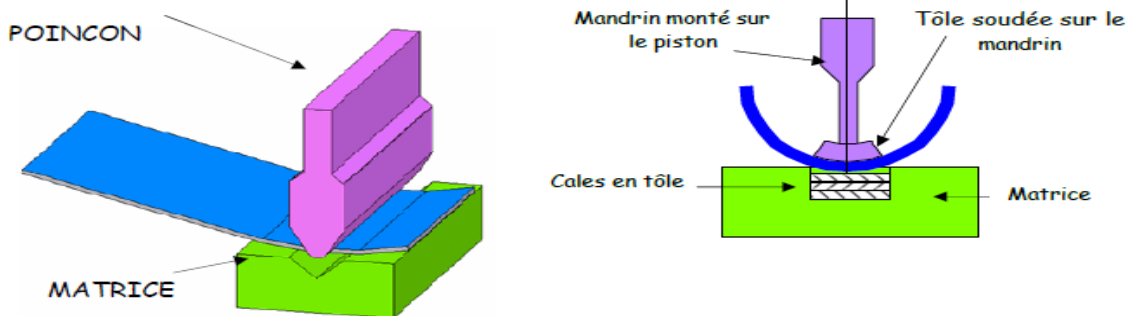
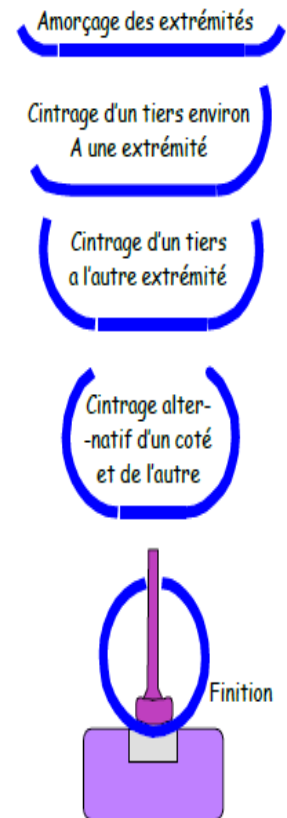


Figure V 05 : Principe de cintrage à la presse

V.10 Cintrage d'un tronc de cône

V.10.1 Le Craquage

Il faut exécuter le craquage des extrémités puis la mise au gabarit ; deux gabarits de vérification sont utilisés : un pour la grande base, l'autre pour la petite. Il faut également s'assurer de la rectitude des deux génératrices extrêmes.

V.10.2 Le Cintrage

- **TÔLES MINCES** : Le cône se façonne facilement à la main sur une bigorne conique ; le terminer en rectifiant les deux extrémités au maillet.
- **TÔLES MOYENNES ET EPAISSES** : Les troncs de cônes sont formés soit avec unecintreuse, soit à la presse par plis successifs.

V10.3 Machines utilisées

Cintreuse type pyramidal à trois rouleaux, donnant le meilleur résultat ; on emploie également la cintreuse type planeur en plaçant une butée côté petit diamètre pour permettre une rotation de la tôle ; les génératrices du cône doivent rester parallèle à l'axes des rouleaux.

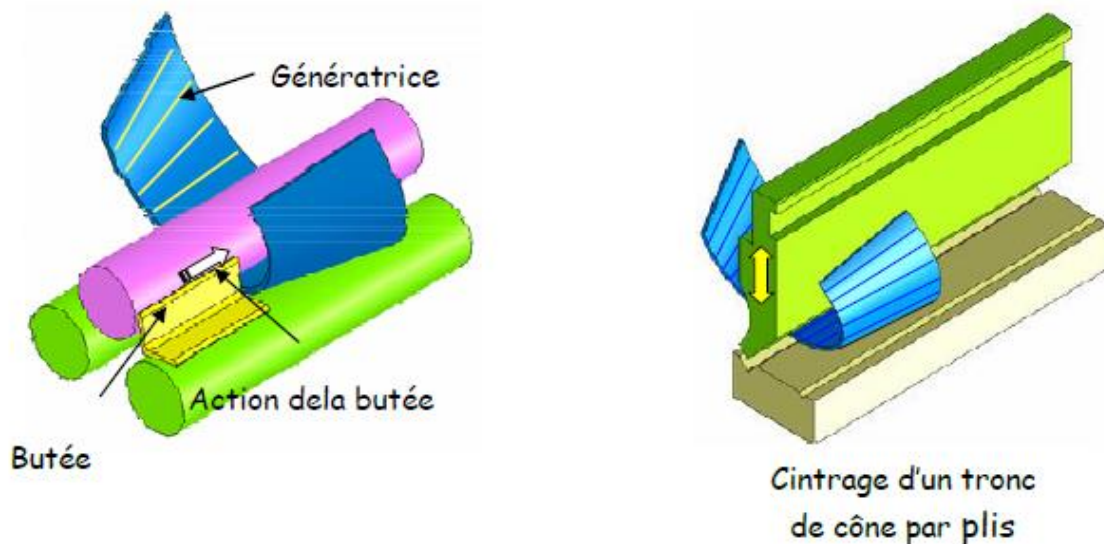


Figure V 06 : Machines utiles

A decorative rectangular border with a repeating floral and geometric pattern in black and white, framing the central text.

CHAPITRE VI

FILAGE

VI.1. Définition

Le filage consiste à placer du métal solide chauffé à la température dite de filage dans un outillage appelé généralement conteneur et de la faire ressortir par un orifice (d'une filière, en général) plus petit en exerçant une poussée. À partir d'un certain effort, il y a écoulement plastique à travers la filière. Cette dernière peut avoir des formes variées.

L'intérêt de la méthode est la relative simplicité, le coût relativement modéré des outillages. Elle permet d'obtenir avec un nombre limité d'opérations des déformations très importantes. La mise en œuvre est relativement faible. En revanche, le nombre de formes est par essence relativement limité.

Il est possible de filer un grand nombre de métaux : alliages d'aluminium, aciers, alliages de cuivre, alliages de magnésium, etc.

VI.2. Quantification de la déformation

La sévérité de filage est déterminée par le coefficient de déformation ou le rapport de filage.

VI.3. Coefficient de déformation

Plus le coefficient est élevé, plus la sévérité de déformation est élevée.

- longueur du produit filé
- longueur de la billette.

La billette est le métal de départ qui généralement est un cylindre.

VI.4. Rapport de filage

Le rapport de filage est également une évaluation de la sévérité de filage.

Il est plus usité que le coefficient de déformation.

- section de la billette
- section du produit filé.

VI.5. Force de filage

La force de filage permet de connaître la force nécessaire pour une déformation donnée et permettra de connaître en pratique la presse qu'il faudra utiliser.

- (daN) : force à appliquer sur le poinçon
- (mm) : rayon du conteneur
- (daN/mm²) : résistance à la déformation de la matière à la température de déformation (appelé également contrainte d'écoulement)
- : rapport entre la section de la billette et la section du produit fini à la température de déformation (appelé rapport de filage)
- (mm) : longueur de la billette
- : coefficient de frottement entre la billette et la paroi du conteneur.

En pratique, si la lubrification est bonne, on considère $f=0$ et la formule devient :

VI.6. Les différents types de filage**VI.6.1. Le filage direct**

La billette (cylindre plein de métal) de métal préalablement chauffée est placée dans le conteneur. Un poinçon exerce une poussée. Le métal est d'abord plaqué contre la filière et file à travers elle en prenant sa forme définitive.

C'est le procédé de filage le plus simple. Il présente des inconvénients principalement à cause du frottement du métal sur la surface interne du conteneur. Ce frottement pouvant avoir des conséquences sur les outillages eux-mêmes mais également sur la structure du métal. La maîtrise de la lubrification modère cet inconvénient.

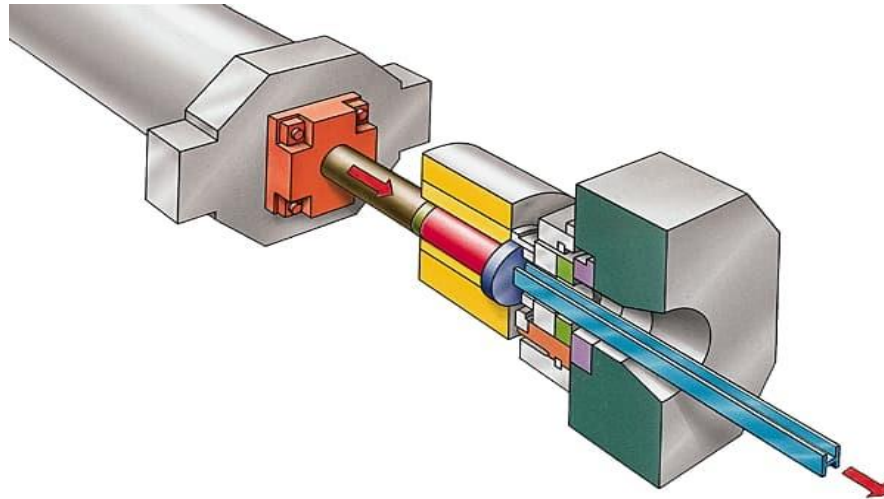


Figure VI 01 : schéma du filage direct

VI.6.2. Le filage inverse

Dans le cas du filage inverse, la filière est placée à l'extrémité d'un poinçon. La billette chauffée est placée dans le conteneur. On plaque une tête sur le conteneur. C'est donc l'ensemble, billette, conteneur et tête qui avance vers la filière. Le métal file à l'intérieur du poinçon.

Le gros avantage de la méthode réside dans la suppression des frottements entre la billette et le conteneur. L'effort de filage est minoré ce qui permet l'utilisation de presses de moins forte puissance. L'absence de frottement supprime une partie des échauffements ce qui permet une meilleure maîtrise de la structure métallique et limite le risque de défauts de surface. Dans le cas de l'aluminium, on peut supprimer presque complètement la zone corticale à gros grains. Il est plus facile de maîtriser les tolérances géométriques.

L'inconvénient provient du poinçon qui compte tenu de sa forme creuse est plus fragile et travaille au flambage. De plus le montage des outillages est plus complexe et nécessite des alignements plus rigoureux que la méthode en direct. De plus, le nombre de formes possibles est plus limité que le filage direct.

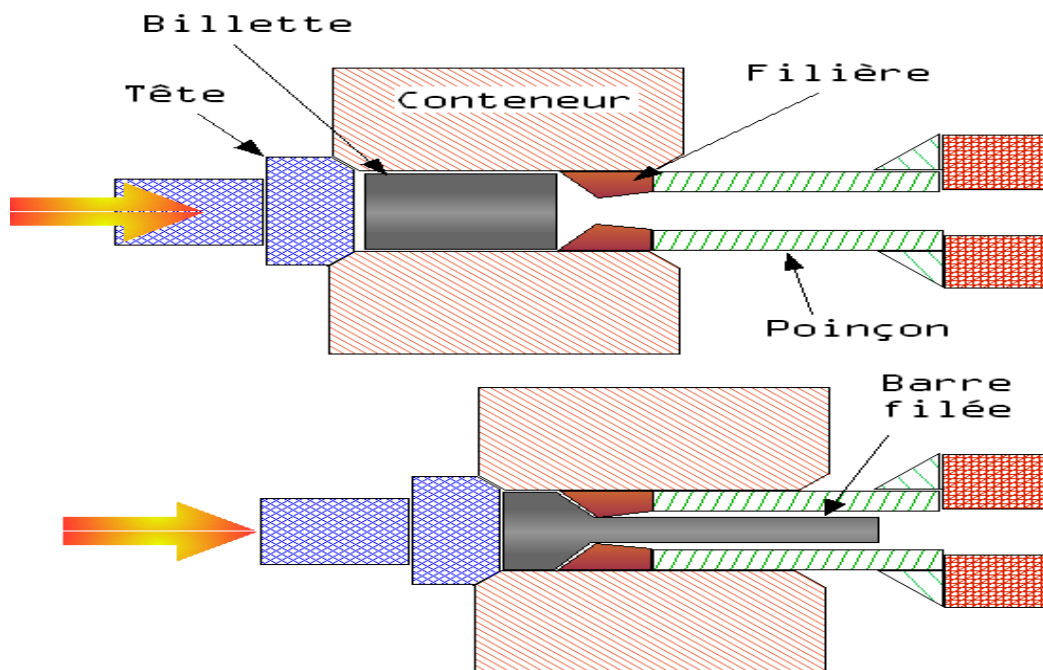


Figure VI 02 : schéma le filage inverse

VI.6.3. Le filage inverse en conteneur

Il s'agit là d'une méthode beaucoup moins utilisée que les deux précédentes. L'objectif est différent puisque le produit obtenu est un tube avec un fond (appelé étui). Les longueurs de filage sont forcément plus courtes. Cette méthode est utilisée pour la fabrication de composants d'armement (douille d'obus, ogive), de bouteilles à gaz en acier ou en alliage d'aluminium. Les formes sont limitées.

La billette chauffée ou froide et lubrifiée est placée dans une matrice fermée à une extrémité par un tasseau. Un poinçon vient pousser sur la billette qui file le long du poinçon en formant un étui. Il est éjecté grâce à une poussée sur le tasseau.

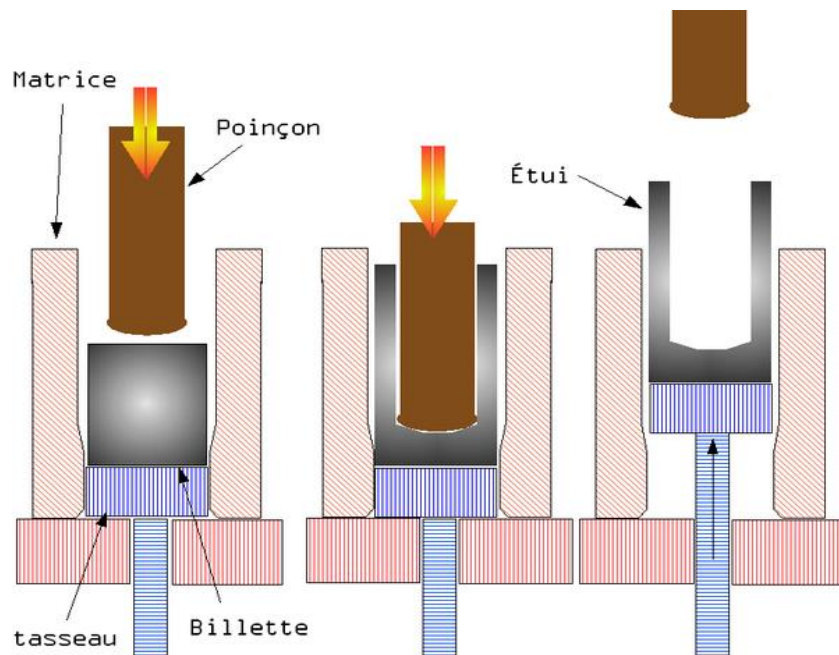


Figure VI 03 : schéma Le filage inverse en conteneur

VI.6.4. Le filage sur aiguille

Le filage sur aiguille permet de filer des tubes. Le matériau de départ est une billette évidée. Elle peut être évidée par perçage, usinage ou forgeage.

Le poinçon est équipé d'une aiguille qui est emmanchée sur la billette creuse. En poussant dans la filière, le métal est contenu entre la filière et l'aiguille. On obtient un tube monobloc sans soudure.

Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe.

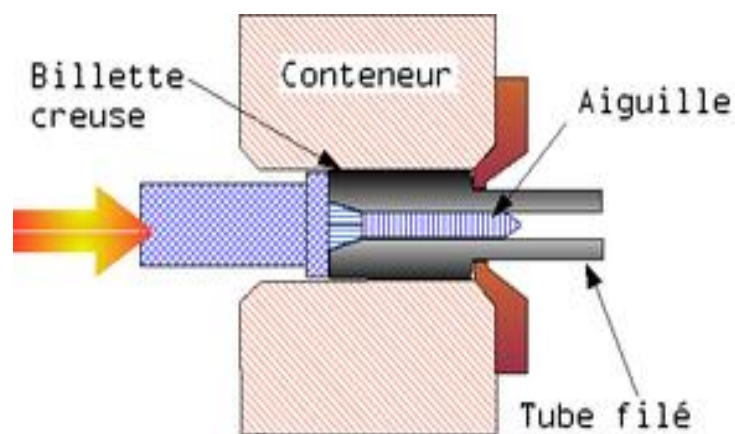


Figure VI 04 : Schéma du filage sur aiguille permettant d'obtenir un tube sans soudure

VI.7. Lubrification

VI.7.1. Filage de l'acier

La difficulté du filage de l'acier réside dans la température du métal de départ. Pour obtenir des contraintes d'écoulement suffisamment faibles, il faut chauffer le métal entre 1 000 °C et 1 250 °C.

La lubrification au graphite n'est pas possible, le film de graphite se rompra à cause de la température. De plus, l'apport de carbone du graphite peut modifier en surface la composition en carbone ce qui changera certaines caractéristiques.

La lubrification utilisée est une lubrification vitreuse par apport de verre sous forme de poudre ou de tissu. Ce type de lubrification peut être utilisable pour d'autres matériaux : alliages de titane, de zirconium ou de tungstène

VI.7.2. Filage des alliages d'aluminium



Figure VI 05 : Défaut d'invagination en bout de barra

Pour les alliages d'aluminium, il existe deux types de filage direct : le filage sans lubrifiant (dit également chemisé) et le filage lubrifié.

Dans le cas du filage sans lubrification, il y a création d'un dépôt d'aluminium sur l'intérieur du conteneur : la chemise. Cette méthode permet d'utiliser des billettes brutes de fonderie sans écroutage (usinage de la surface) en éliminant les imperfections de surface.

Le procédé est simple et permet d'obtenir de beaux états de surface. En revanche, il est nécessaire d'utiliser des presses plus puissantes en comparaison avec le filage lubrifié ou inverse.

La surface externe étant freinée, le centre de la billette file plus vite que la périphérie.

Il y a risque d'hétérogénéité structurale et formation en fin de filage d'un défaut appelé invagination.

Le centre de la face arrière de la billette est aspiré.

À l'inverse, le filage direct lubrifié demande des presses moins puissantes et donne une meilleure structure interne au métal. Mais les produits obtenus ont un moins bel état de surface.

A decorative rectangular border with a repeating floral and geometric pattern in black and white, framing the central text.

CHAPITRE VII

DECOUPAGE

VII.1. INTRODUCTION

Au fil des années le découpage est devenu une technique très employée, particulièrement dans la production de pièces. Cette activité, conduisant à des cahiers des charges toujours plus contraignants, est confrontée à une miniaturisation toujours plus importante des chutes. Compte tenu de ces éléments, la maîtrise de la qualité des produits, l'augmentation de la productivité et la réduction des coûts sont indispensables au développement mais aussi à la survie des entreprises concernées. Dans la mise en forme par découpage mécanique, contrairement à l'emboutissage et au pliage par exemple qui ont pour but de déformer plastiquement la tôle, le découpage sollicite celle-ci jusqu'à la rupture finale. Durant l'opération, le matériau soumis à des phénomènes d'endommagement et de propagation de fissures et il subit des sollicitations complexes dont la modélisation est souvent non linéaire et, avant rupture finale.

VII.2. Définition

Le découpage comme dans d'autres procédés de mise en forme consiste à enlever de la matière par un cisaillement normal (éventuellement non perpendiculaire) au plan de la tôle.

Ce type de procédé est de loin le plus pratiqué dans le domaine industriel, ce dernier est une opération de transformation à froid des métaux qui permet d'obtenir les produits aux contours fermés et ouverts. Son but est de séparer partiellement ou complètement des zones de la tôle de façon à obtenir la forme voulue et/ou de les préparer pour d'autres opérations comme le pliage ou l'emboutissage.

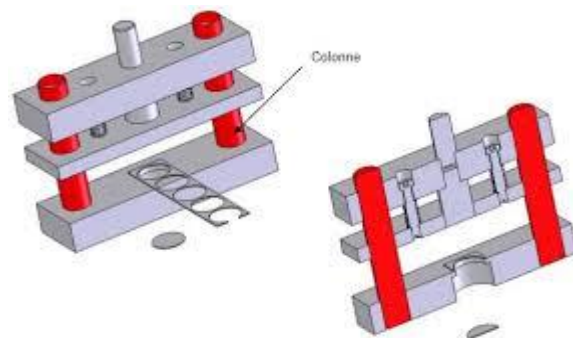


Figure VII 1: Découpage des tôles à la presse.

VII.3. Principe de découpage

Deux lames en acier dur avec des angles et un jeu bien défini, couissent dans un même plan, permettent de cisailer la tôle sur sa profondeur en deux parties (Figure VII.2).

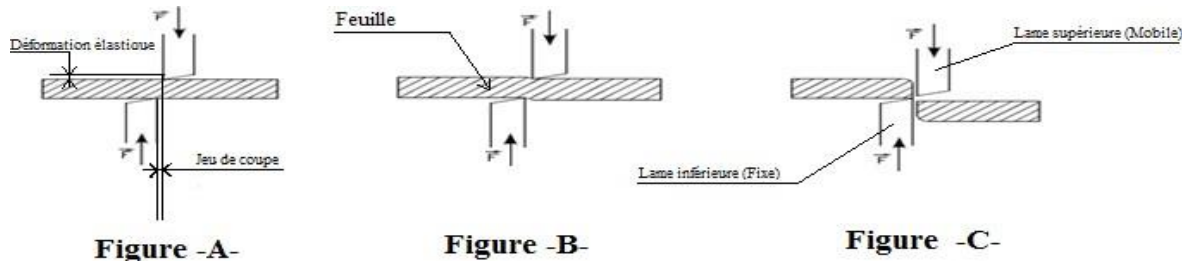


Figure VII 2 : Principe du découpage

A : Effort constant et continu.

B : Cisaillement et décohérence.

C : La séparation fait apparaître différents aspects de la coupe

VII.4. Opération de découpage

On peut distinguer trois types d'opération de découpage :

- Découpage simple : on utilise deux outils de découpage sur deux presses et la pièce est obtenue en deux opérations (exemple obtention d'une rondelle).
- Découpages consécutifs : on utilise une presse et on fixe sur son coulisseau deux ou plusieurs poinçons. La pièce est obtenue après deux pas d'avance de labande.
- Découpages simultanés : la pièce est obtenue après une opération de découpage et poinçonnage simultanément.

Au cours de la découpe, la matière s'écoule plastiquement, apparaissent ensuite des phénomènes d'endommagement conduisant à la rupture complète. En identifie cinq phases présentées sur la **figure 3 a**).

Ces phases peuvent aussi être identifiées sur la courbe effort-déplacement du poinçon, comme le montre la **figure 3 -b**).

Les premières et deuxièmes phases correspondent au comportement élastique du matériau avec une montée linéaire de l'effort.

Au cours de la troisième phase, le matériau est l'objet de transformations inélastiques (écrouissage et endommagement). La phase quatre correspond à la propagation d'une fissure entre l'arête de la matrice et l'arête du poinçon. Au cours de la phase cinq, la tôle est séparée en deux et les outils frottent contre les bords coupés.

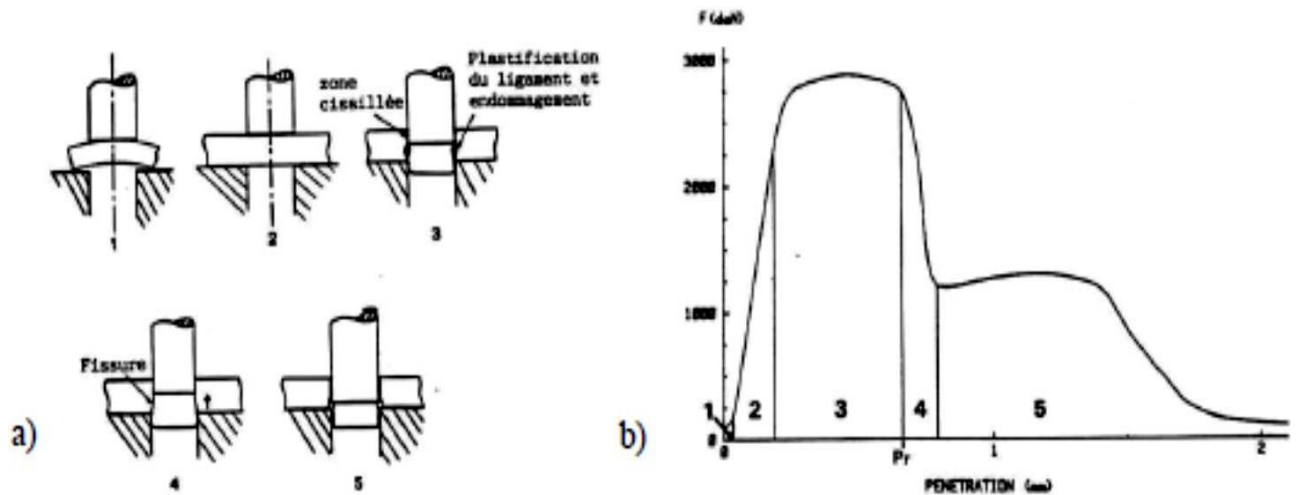


Figure VII 3 : a) Phases de l'opération de découpage

Figure VII 3 : b) Courbe effort-déplacement

VII.5. Effort de découpage

L'étude des efforts développés au cours de l'opération de découpage a fait l'objet de nombreux travaux [1]. Les différents travaux mettent en évidence l'influence des paramètres du procédé sur les efforts de découpe et la qualité du produit final.

VII.6. Méthode analytique

$$F_{\text{découpage}} = P \times e \times R_c$$

Avec :

- p = périmètre découpé (mm) □
- e = épaisseur de la tôle (mm) □
- R_c = résistance à la rupture au cisaillement de la tôle à découper (daN/mm²)

Remarque

La résistance au cisaillement R_c dépend du matériau travaillé, on l'estime à environ 0,8 fois la résistance à la traction R_m ; on a : $R_c = 0,8 \times R_m$; R_c est donné par le tableau 5 pour les matériaux courants.

Matériaux		R_c (daN /mm ²)	
Aciers	0.1 % C - recuit.....	24	
	- laminé à froid.....	31	
	0.2 % C - recuit.....	31	
	- laminé à froid.....	39	
	0.3 % C - recuit.....	37	
	- laminé à froid.....	47	
	Tôles laminée à froid :		
	- Qualité TC.....	31	
	- Qualité E.....	29	
	- Qualité ES.....	27	
Acier inoxydable.....	50 à 60		
Acier au silicium.....	45		

Tableau VII 1 : résistance au cisaillement des matériaux courants

VII.7. Méthode utilisant l'abaque

L'abaque de la figure ci-dessous permet de déterminer rapidement l'effort de découpage moyennant le diamètre du poinçon ou le périmètre à découper .

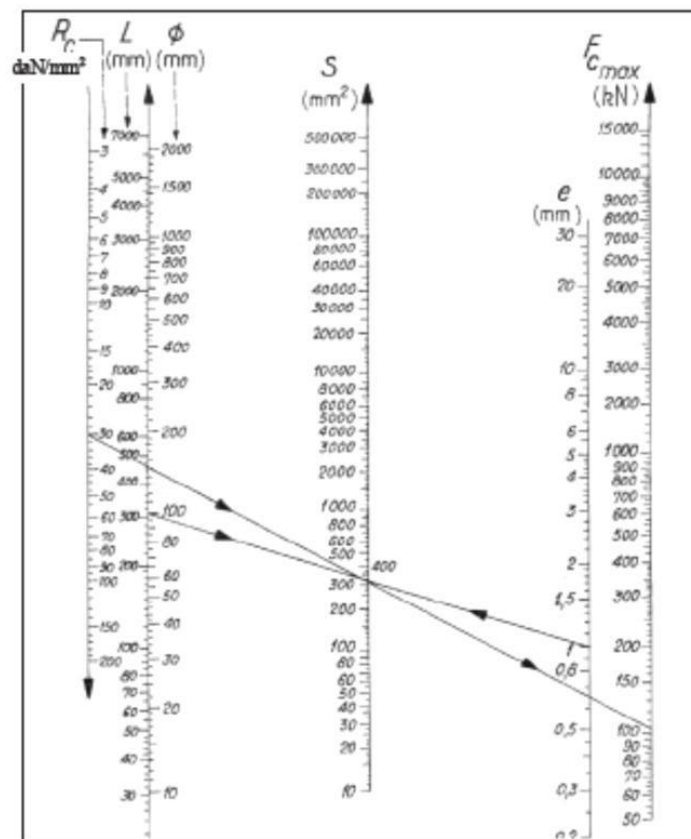


Figure VII 4 : abaque permettant de déterminer l'effort de découpage

VII.8. Vitesse de découpage

La vitesse de découpage ne doit pas dépasser : 0.06 m/s pour les aciers, et 0.10 m/s pour les aciers doux [2].

La vitesse de descente du poinçon influence les efforts de découpe et la qualité du produit final. L'augmentation de la vitesse du poinçon se traduit par une amélioration de la qualité du bord découpé.

Pour des vitesses plus importantes, elle se situe aux alentours de 0.55 à 0.65 mm (85 - 100% de l'épaisseur).

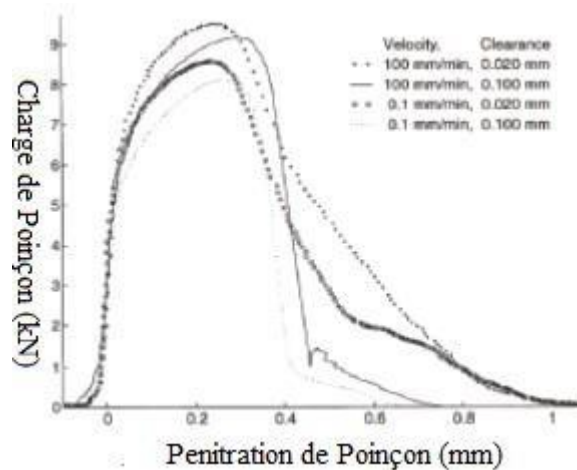


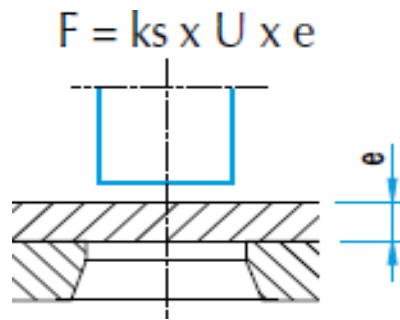
Figure VII 5: Influence de la vitesse du poinçon sur l'effort de découpe

VII.9. Effort à créer sur le devêtisseur et Effort de l'attraction

L'effort d'extraction est l'effort du poinçon nécessaire pour pousser le flan coincé dans la section constante de la matrice. Une dépouille réduit le nombre de flans coincés et empilés, et limite l'effort du poinçon [1].

- L'effort à créer sur le devêtisseur est estimé à $F_1 = 7\%$ de F si la découpe est en pleinetôle. (Cas du poinçonnage)
- L'effort à créer sur le devêtisseur est estimé à $F_2 = 2\%$ de F si la distance de la découpe au bord de la tôle $\leq 3.e$. (cas du découpage)
- Si le flan doit être extrait au-dessus du plan de coupe, l'effort d'extraction est estimé à $F_3 = 1,5\%$ de F .

La formule de la force de découpe est la suivante :



$$F = K_s \times U \times e$$

- F (daN) : force de découpe nécessaire
- k_s (daN/mm²) : résistance au cisaillement de la matière.
- U (mm) : périmètre à découper (pour un rond : $\varnothing \times 3,14$).
- e (mm) : l'épaisseur de la matière.

Remarque

Le diamètre maximal d_1 du poinçon ne peut pas être inférieur à l'épaisseur de la matière.

VII.10. Jeu de découpage

Les fissures sont obliques, pour qu'elles se rejoignent, et que la tranche de la pièce découpée soit propre, Il est nécessaire de mettre un jeu soit sur la matrice soit sur les poinçons afin d'obtenir les cotes voulues [2].

$$j = \frac{R_m - R_p}{e_0} \times 100$$

e_0

Où

- R_m et R_p représentent respectivement les rayons de la matrice et du poinçon,
- e_0 L'épaisseur initiale de la tôle.

Ce jeu dépend de la bavure que l'on veut admettre sur la pièce, de l'épaisseur de la pièce, et de la matière choisies.

D'une manière générale, Le jeu est représenté par l'écart entre les faces de découpe du poinçon et de la matrice.

On définit aussi le jeu radial en pourcentage de l'épaisseur de la tôle $j\%$.

$$j\% = 100 \times \frac{(d_m - d_p)}{2.e}$$

En découpage, $j\%$ est compris entre 5% et 10%.

Pour le découpage le jeu est à prendre sur le poinçon varie selon la nature et l'épaisseur (e) du matériau à découper (Figure VII 6).

- $1/20 \times e$ pour laiton, l'acier doux et les aciers inoxydables
- $1/15 \times e$ pour l'acier dur,
- $1/10 \times e$ pour l'aluminium.

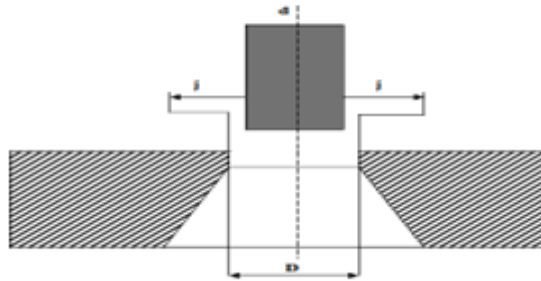


Figure VII 6 : Jeu de découpage.

VII.11. L'angle tranchant

C'est l'angle qui permet d'avoir une arrête tranchante, il varie de 80° à 90° selon le type de la cisaille.

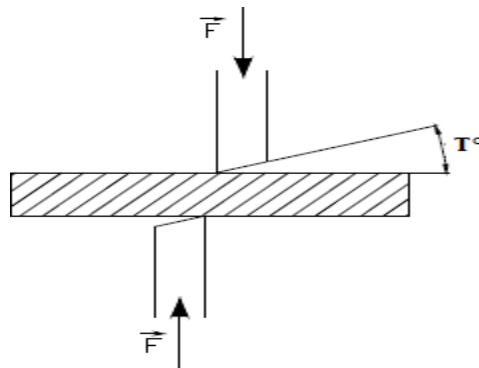


Figure VII 7 : L'angle tranchant des lames

VII.12. Effets de la coupe

La force F_1 est obtenue par une butée qui tend à éliminer le couple qui soulève la pièce dans le sens opposé à cette dernière [2].

Quand la force F_2 , et le jeu sont inexistant, le cisailage tend à rejeter la pièce sur les côtés, c'est pourquoi une butée est aussi nécessaire pour palier à cet effort.

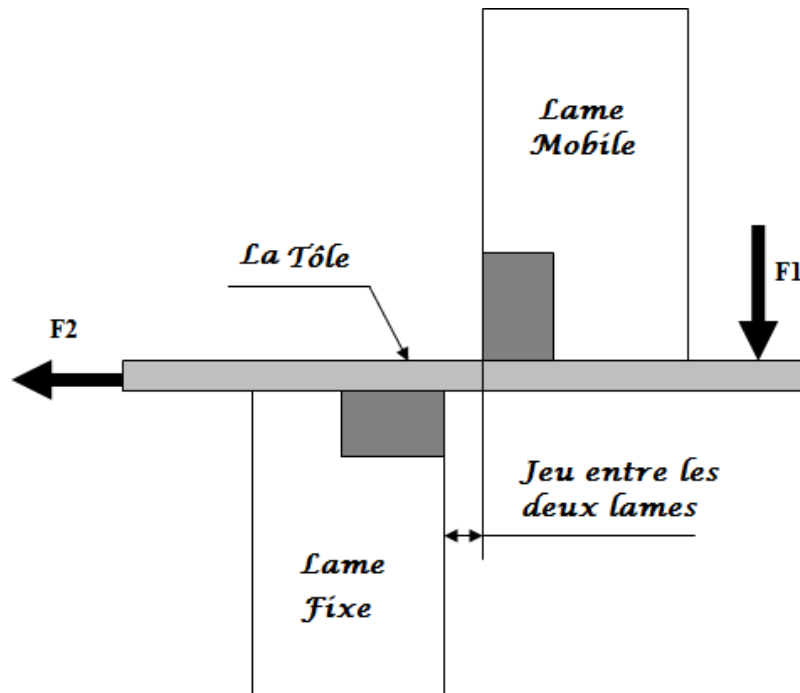


Figure VII 8 : jeu entre les lames fixe et mobile

VII.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les paramètres de découpage des feuilles entrant dans la fabrication des pièces, étant donné la difficulté liée à la réalisation de la coupe. Ensuite nous avons décrit le principe et les efforts de découpage.

A decorative rectangular border with a repeating floral pattern of small flowers and leaves.

CHAPITRE VIII
LE CISAILLAGE

VIII.1. Définition

Le cisailage est la séparation totale ou partielle d'un élément métallique à l'aide de deux lames dont l'une au moins est mobile.

VIII.2. Principe

Sous l'action de la contrainte imposée par la partie active des lames, il se produit une déformation élastique, puis glissement avec décohéSION du métal (suivant deux directions formant un angle β). La lame poursuivant sa course provoque la rupture de la plaque. L'angle β ainsi que la profondeur de décohéSION varient suivant la nuance du métal et son état.

Exemple : $\beta = 4^\circ$ pour les aciers durs et $\beta = 6^\circ$ pour les aciers doux.

L'aspect et le profil de la face cisailée peuvent être améliorés en choisissant un jeu convenable entre les deux lames. (Voir figure VIII.1)

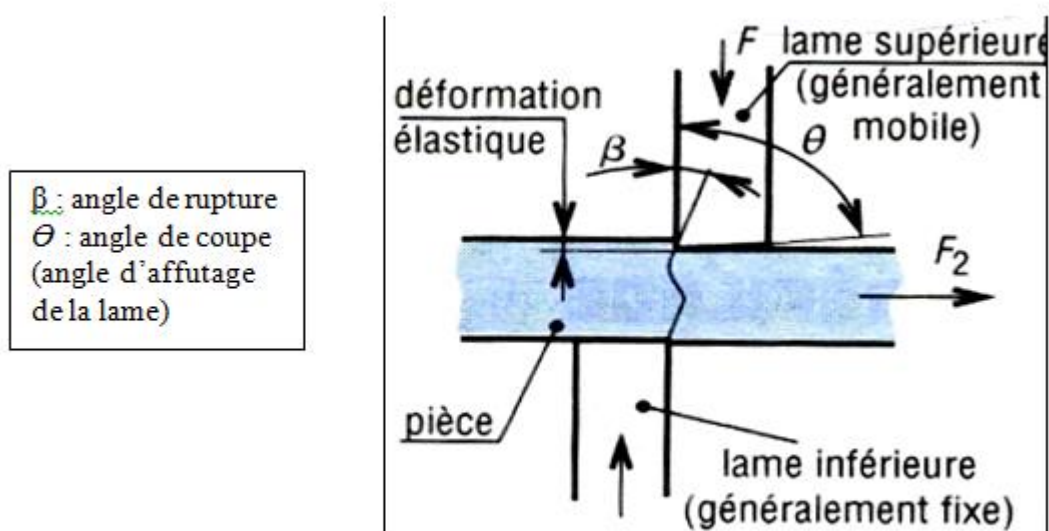


Figure VIII 1 : Cisailages des tôles

VIII.3. Effort de coupe

L'effort de coupe est le produit de la section cisailée S_{cis} par la résistance au Cisaillement

$$F_c = S_{cis} R_c$$

- S_{cis} : Epaisseur de la tôle (mm^2)
- R_m : La résistance de la tôle (N/mm^2)

La résistance au cisaillement est égale à 0,8 R_m .

VIII.4. Différentes méthodes de cisailage

Les principales machines universelles de cisailages sont :

- ✓ Cisaille à lame parallèle.
- ✓ Cisaille à lame oblique.
- ✓ Cisaille à lame circulaire.

VIII.4.1. Cisaille à lames parallèles

Le cisailage à lames parallèles permet de cisailer simultanément toute la longueur de la tôle pour cette raison il faut que $L_1 < L_2$. La coupe est généralement rectiligne et l'effort nécessaire à la coupe est

- e : Epaisseur de la tôle (mm^2)
- R_m : Résistance au cisaillement de la tôle (N/mm^2)
- L_1 = longueur cisailée

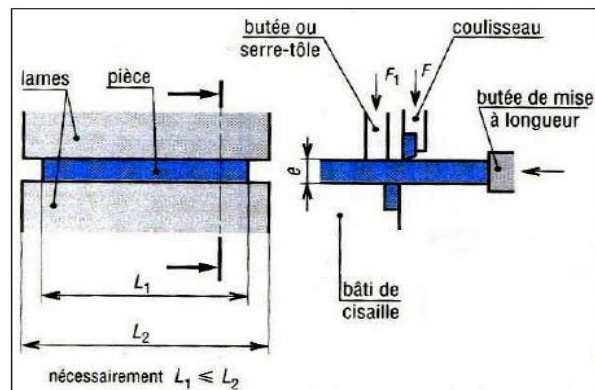


Figure VIII 2 : Cisaille à lames parallèles

VIII.4.2. Cisaille à lames obliques

Dans ce cas la lame supérieure fait un angle α avec la lame inférieure, qui reste constant au cours de la coupe. La lame mobile se déplace entre deux positions extrêmes : le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB).

La longueur découpée pour une course complète de la lame est L pour découper toute la tôle, il faut faire progresser la plaque suivant P .

L'effort de cisailage est égal à :

$$F_c = \frac{e^2}{2 \operatorname{tg} \alpha} R_c$$

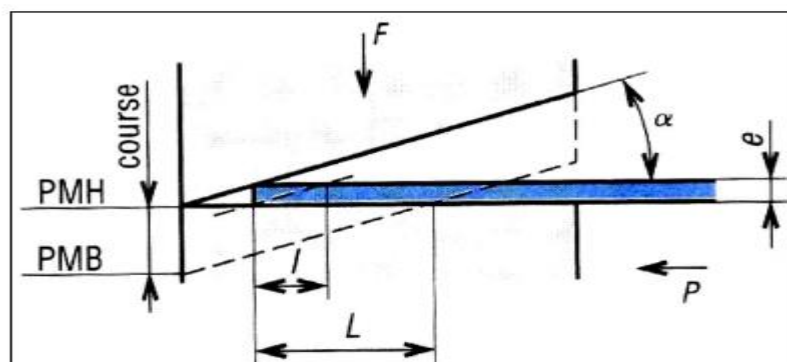


Figure VIII 3 : Cisaille à lames obliques

On a intérêt à avoir α grand pour diminuer F_c . Cisaille à lames parallèles



Figure VIII 04 : Cisaille manuelle

Il existe deux types de cisailles obliques :

- Les cisailles à lames longues : se sont les cisailles guillottes, l'angle de prise α est entre $2^\circ 30'$ et 6° . Leur longueur est entre 1m à 5m.(coupes rectilignes)
- Les cisailles à lames courtes : la longueur des lames est généralement comprise entre 180 mm et 300 mm L'angle de reprise est entre 10° à 20° .(coupes curvilignes par une succession des petites coupes rectilignes)



(b)



(a)

Figure VIII 05 : a : Cisaille à lames longues, b : Cisaille à lames courtes

Précision sur cisaille à guillotine (pour largeur de coupe =500 mm) :

- $2 < e < 3 \text{ mm}$: $\pm 0,2 \text{ mm}$ sur 3 m de long de la pièce
- $6 < e < 10 \text{ mm}$: $\pm 0,4 \text{ mm}$ sur 3 m de long de la pièce

Avec : e = épaisseur de la tôle

Précision sur cisailles avec lames obliques courtes : suivant l'habileté de l'opérateur ou la précision de la machine à commande numérique.

VIII.4.3. Cisaille à lames circulaires

Le cisailage est effectué par deux lames circulaires rotatives et motrices. Les axes des lames peuvent être parallèles au plan de coupe : c'est le cas idéal pour le cisailage rectiligne, comme ils peuvent être inclinés par rapport au plan de coupe.

Ce cas est idéal pour le cisailage curviligne. Pour limiter les déformations, on a intérêt à diminuer e : hauteur de recouvrement des lames

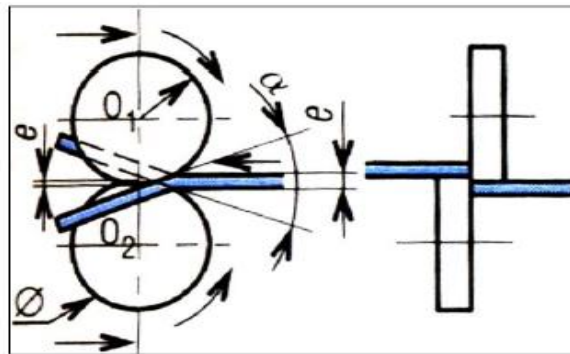


Figure VIII 06 : Cisaille à lames circulaires



Figure VIII 07 : Exemple de cisaille circulaire

VIII.5. Paramètres de coupe

Trois facteurs influent sur la coupe

VIII.5.1. L'angle d'attaque

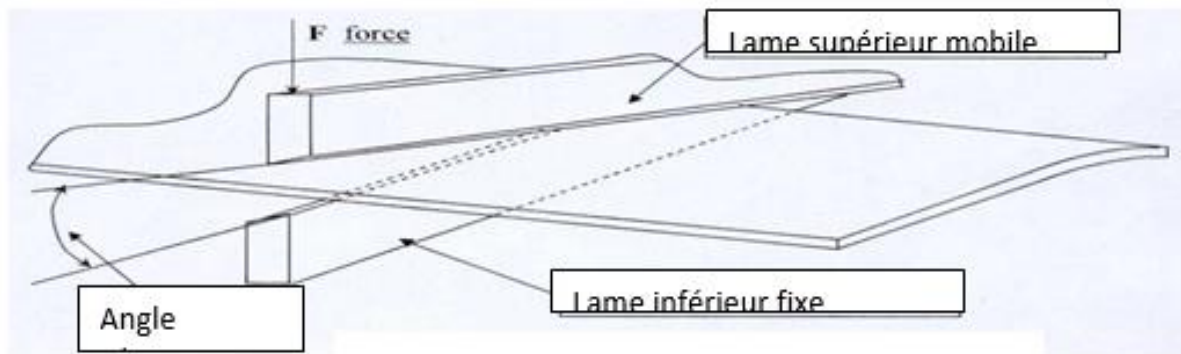


Figure VIII 08 : L'angle d'attaque

L'angle d'attaque des lames est généralement de 2 à 6° pour les lames longues et de 10 à 20° pour les lames courtes, celui des cisailles à levier est de 10 à 15°.

Plus l'angle d'attaque des lames augmente et plus la déformation est importante.

VIII.5.2. L'écartement entre les lames (ou jeu entre lames)

Jeu trop important	Jeu adéquate	Jeu trop faible
<ul style="list-style-type: none"> • Peu de précision de coupe 	<ul style="list-style-type: none"> • Coupe précise 	<ul style="list-style-type: none"> • Il faut plus de puissance pour cisailer
<ul style="list-style-type: none"> • Bavures importantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspect de la coupe correct 	<ul style="list-style-type: none"> • Ecrasement anormal du métal
<ul style="list-style-type: none"> • Détérioration des lames 		<ul style="list-style-type: none"> • Détérioration des lames

VIII.5.3 L'angle de coupe (ou angle de tranchant)

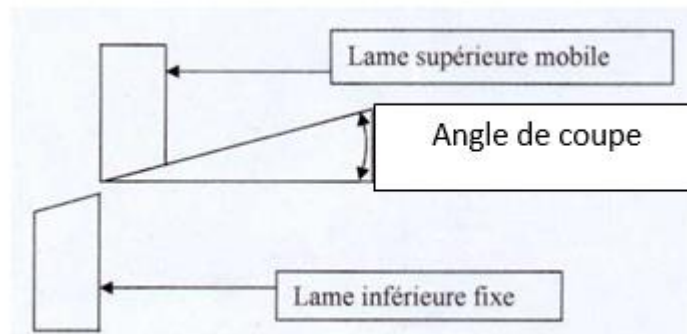


Figure VIII 09 : L'angle de coupe (ou angle de tranchant)

L'angle de coupe des lames est généralement de 85° à 90° pour les cisailles guillotine et peut aller jusqu'à 80° pour les autres.

Si l'angle de coupe des lames augmente, la qualité de la coupe est meilleure.

A decorative rectangular border with a repeating floral pattern of small flowers and leaves.

CHAPITRE IX

POINÇONNAGE

IX.1. Introduction

L'étude du découpage conduit naturellement à découvrir le principe du poinçonnage ; on peut facilement admettre que cette technique est un cisaillement de forme fermé (forme quelconque, souvent circulaire). Dans ce chapitre on s'intéressera essentiellement à une étude théorique de ce principe, et nous allons décrire en définissant son procédé et les éléments qui consistent à la réalisation qui se fait avec un outil à contour fermé.



Figure IX 1 : Poinçonnage.

IX.2. Définition

Le poinçonnage est une opération de découpage à chaud ou à froid qui consiste à exécuter un trou dans le métal qu'on appelle flan, entraînée par un poinçon dans une matrice qui enlève la matière en totalité d'un seul coup.

Le poinçonnage s'exécute soit à la main, pour des travaux unitaires et peu précis, à l'aide de petit poinçon manuel, soit à la machine (qui est le but de notre travail) pour les travaux de grandes séries et de bonne précision dimensionnelle.

Un serre-flan est utilisé évitant la formation des plis dus au déplacement radial de la tôle

IX.3. Le procédé de poinçonnage

Dans l'industrie, l'opération de poinçonnage est réalisée à l'aide de presses hydrauliques ou mécaniques. La tôle est mise et maintenue en position entre la matrice et le serre-flan.

Animé d'un mouvement de translation, le poinçon vient en contact avec la tôle sur laquelle il exerce un effort en appui sur la matrice. Conventionnellement, la matrice constitue la partie fixe de l'outillage (**figure IX 2**)

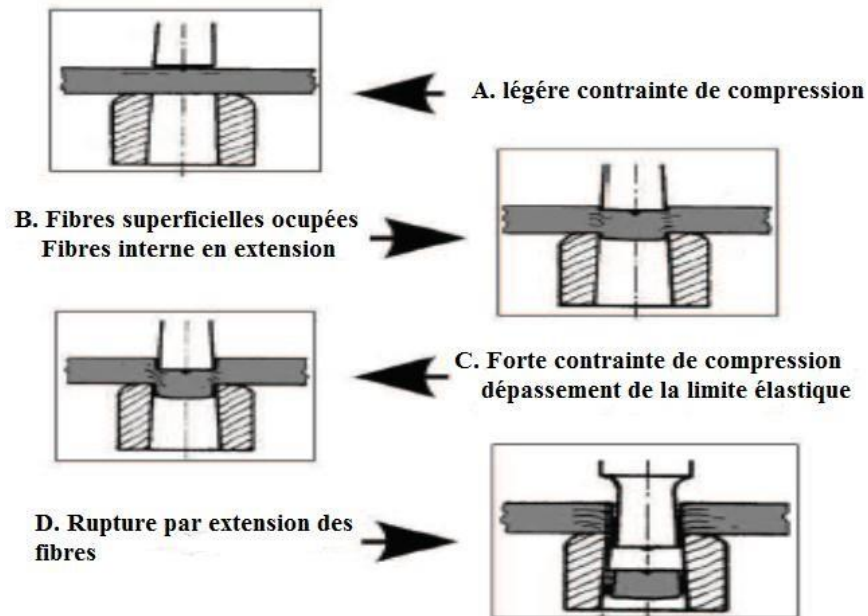


Figure IX 2 : Les différentes étapes du poinçonnage

La figure IX 2 décrit les étapes successives de la réponse du matériau de la tôle à la pénétration du poinçon.

L'opération de poinçonnage passe par plusieurs étapes :

- Figure IX-2-A : Légère contrainte de compression.
- Figure IX-2-B : Fibres superficielles coupées, fibres internes en extension.
- Figure IX-2-C : Forces et contraintes de compression, dépassement de la limite élastique.
- Figure IX-2-D : Rupture par extension des fibres
- Une première phase de légère compression,
- Les fibres superficielles sont découpées alors que les fibres intérieures sont en tension.

Ensuite, on observe une zone des forces et contraintes de compression où la limite d'élasticité du matériau de la tôle est atteinte.

Il s'en suit une importante extension des fibres qui conduit à la fissuration. La localisation et la propagation de fissures s'amorcent sur les rayons d'extrémités du poinçon et de la matrice.

Les poinçons sont fixes si les matrices sont mobiles. Ils doivent résister à la compression et au flambage.

Pour les poinçons cylindriques, on prend :

$d = 1,6 \times e$ (e = épaisseur de la tôle) pour les aciers doux

En acier fortement allié, de dureté HRC = 60, ils doivent pouvoir être affûtés après usure.

La tôle est coincée entre un poinçon et une matrice et la descente du poinçon dans la matrice découpe le matériau comme le ferait une paire de ciseaux.

Il s'agit d'un glissement de métal dans un plan transversal entre deux barres, sans que celles-ci ne se déforment ou cessent d'être parallèles. L'ouverture du trou est effectuée à l'aide du poinçon et de la matrice qui sont des outils comparables aux lames de cisaille.

Le principe reste le même que pour le cisailage. La rupture s'effectue donc après un effort de traction.

Généralement, le poinçonnage est utilisé en tôlerie pour réaliser des trous et découper des flans de formes complexes parfois non rectangulaires, donc difficiles ou impossibles à réaliser par cisailage.

Utilisé aussi en construction métallique pour percer les profilés. Il existe trois modes possibles de poinçonnage:

- Le poinçonnage classique : enlèvement de matière par simple réalisation de trous.
- Le grignotage : qui consiste à découper un pourtour intérieur ou extérieur par de multiples coups de poinçon.
- Le découpage à la presse : découpe de flan à l'aide d'un outillage spécifique.

Selon la puissance appliquée, il est possible de poinçonner et découper diverses épaisseurs de matériaux. En principe, il n'y a pas de limite au poinçonnage ; seule la capacité de la machine fixe une limite d'épaisseur des matériaux à découper en tenant compte des propriétés du matériau.

IX.4. Organes de l'outil Poinçon

Sa forme reproduit, en principe, la forme intérieure de la pièce voulue, sauf si des corrections de courbure ont été apportées pour compenser le retour élastique.

Sauf dans le cas d'un nez de poinçon parfaitement plat entouré par un rayon de poinçon très faible, pour raison de la soumission de métal à l'expansion et amené à glisser sur l'outil, un poinçon doit être soigneusement poli. Mais l'expansion se fait au détriment

de l'épaisseur et dans des cas assez rares.

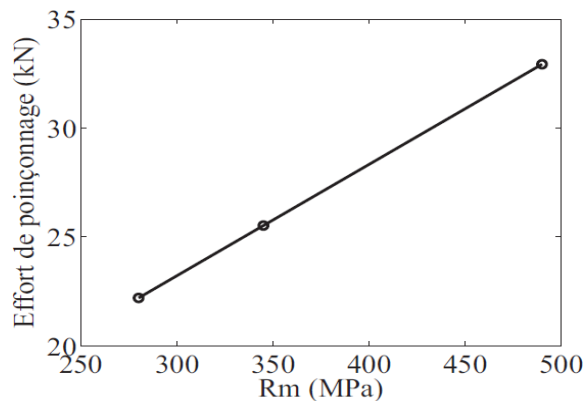
Remarque

On limite ainsi l'amincissement mais aussi la profondeur d'emboutissage possible. Il faut voir également que cette modification de rugosité a tendance à disparaître sous l'effet de l'usure et qu'il faut donc l'entretenir. Cette solution n'est employée qu'exceptionnellement.



Figur IX 3 : Vue éclatée de l'outillage

Lorsque nous ramenons dans un premier temps les tôles découpées à une même épaisseur et supprimons l'effet du jeu relatif, la figure suivante présente l'évolution des efforts de découpe en fonction de la résistance mécanique maximale à la traction R_m .



L'effort de découpe évolue linéairement avec la résistance mécanique à la traction du matériau. L'effort de poinçonnage peut donc être estimé à l'aide d'une équation de droite de type :

$$F(R_m) = A \times R_m + B \quad (1)$$

Avec

- $F(R_m)$: l'effort de poinçonnage,

- R_m : la résistance mécanique maximale à la traction du matériau,
- A : le coefficient directeur de la droite,
- B : l'ordonnée à l'origine.

IX.5. Rayon du poinçon

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. R_p est compris entre $5e < R_p < 10e$

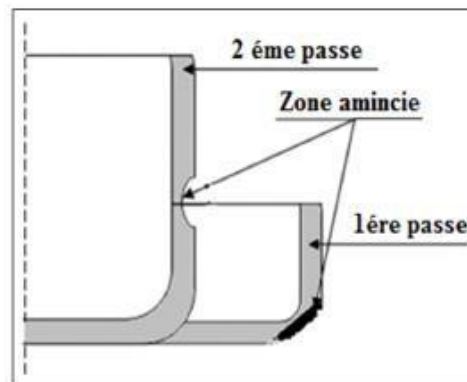


Figure IX 4 : le rayon sur le poinçon

IX.6. Matrice et poinçon

Les poinçons sont fixes si les matrices sont mobiles. Ils doivent résister à la compression et au flambage. Pour les poinçons cylindriques, on prend à la limite :

$d \geq 1.6 e$ pour les aciers doux .

Une matrice en acier peut produire environ 50 000 pièces sans être affûtée. L'affûtage diminue h de 0.2 à 0.5mm (voir figure -6). Approximativement, on peut ainsi définir le minimum des pièces réalisées par l'outil.



Figure IX 5 : Poinçon (à gauche) et matrice (à droite)

Remarque : Le poinçon de forme quelconque doit résister à la compression et au flambage, sa longueur libre est vérifiée par

$$L \leq \sqrt{\frac{E \times I}{F}}$$

Avec:

- E : module d'élasticité en (N/mm²)
- I : moment quadratique de la section en (mm⁴)
- F : effort de découpage en (N)

IX.7. Jeu poinçon –matrice

Pour avoir une bonne surface emboutie il est nécessaire de calculer un jeu de coupe basé sur la formule suivante :

$$D - d = 2 \times j$$

$$j = e + \text{tolérance max de la tôle.}$$

- Concept : Réduire le jeu afin de limiter le fluage de la matière entre le poinçon et la matrice
- Favorise le cisaillement
- Jeu actuel = 0.02mm
- Contact avec Chrome BN et S2E : Limite technique (précision des guidages, dilatation thermique)

IX.8. Effort d'extraction

C'est l'effort nécessaire pour dégager le poinçon de la zone de découpage et pour pousser le flan coincé dans la section constante de la matrice. Une dépouille réduit le nombre de flans coincés et empilés, et limite l'effort du poinçon, il varie de 2 à 7 % de celui du découpage selon la bande entourant le poinçon soit :

- 7% de l'effort de découpage en pleine tôle ;
- 2% si la chute de découpage est faible.

$$F_{\text{dév}} = C \times F \quad (2)$$

C : valeur forfaitaire choisie qui, selon l'usure de l'outil que l'on

admet, pourra varier de 2 à 7% de l'effort de découpage



Figure IX 6 : Contraintes à l'origine de l'effort de dévêtissage

IX.9. Éjecteurs

Fabriquer une pièce n'a de sens que si on peut ensuite la récupérer intacte. Il faut donc la sortir de l'outil, ce qui n'est pas toujours facile à cause des contraintes élastiques résiduelles qui tendent parfois à « l'ouvrir », parfois à la « fermer », donc à la retenir dans la matrice ou sur le poinçon. Ceci est réalisé grâce aux éjecteurs, qui peuvent se présenter sous plusieurs formes.

L'effort nécessaire pour éjecter la pièce découpée est d'environ 1,3% de l'effort de découpage.

Si la pièce n'a pas à respecter des contraintes d'aspect, ou si elle est faite avec un acier dur et épais, on peut se contenter de quelques tiges montées sur ressort qui la repousseront quand le poinçon sera extrait.

IX.10. Prédécoupe

Concept : Réaliser une prédécoupe afin de modifier l'état de contrainte du matériau

- Vue en coupe d'une chute :

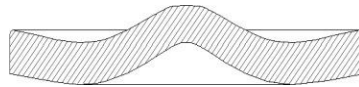


Figure IX 7 : Vue en coupe d'une chute

- Déformations importantes
- Effet néfaste : consommation d'énergie dans la déformation

IX.11. Forme de l'outil

- Concept : Amincir le poinçon pour réduire l'effort sur la chute due aux frottements :

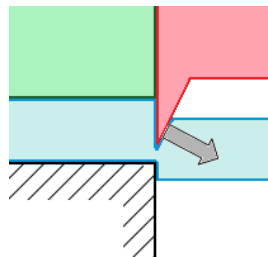


Figure IX 8 : forme de l'outil de poinçonnage

IX.12. Forme de la matrice

- Concept : Optimiser l'amorce de rupture du côté de la matrice
- Création d'une arête vive sur la matrice

Réduit le fluage de la matière, sa mise en position délicate, on peut envisager l'ajout d'un poinçon :

- Le premier poinçon ⁽²⁾ réalise un poinçonnage partiel : création d'une concentration de contraintes du côté matrice, le devêisseur ⁽¹⁾ joue le rôle de tas
- Le second poinçon ⁽³⁾ réalise le poinçonnage

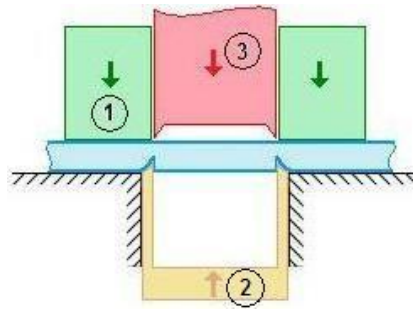


Figure IX 9 : les étapes de poinçonnage

C'est le dégagement réalisé au-dessous de la partie active de la matrice, qui est de dimension légèrement plus grande que celle de la partie active, il permet d'éviter l'entassement des chutes dans la matrice.

Pour les matrices trempées on laisse (4 à 5 mm) de la partie cylindrique pour permettre l'affûtage. La dépouille fait un angle de (2 à 3°) avec la verticale.

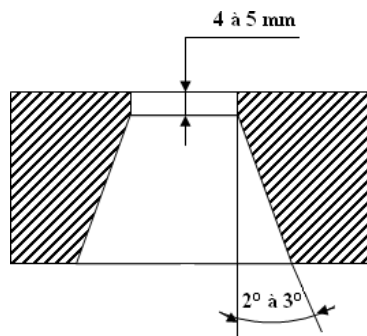


Figure IX 10 : Matrice avec un angle de dépouille de 2° à 3°.

IX.13. Dépouille

Pour les matrices non trempées qui servent pour le découpage des métaux tendres comme le laiton ou l'aluminium. La dépouille commence directement de la face supérieure et fait un angle de 1° environ avec la verticale.

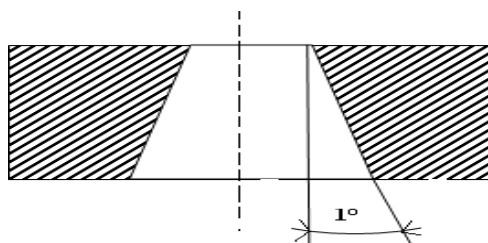


Figure IX 11 : Matrice avec un angle de dépouille de 1

IX.14. Usure des outils de découpage

L'usure est le processus d'endommagement des surfaces en contact, sous l'effet du frottement. Il s'agit d'un phénomène incontournable dans tous les contacts mécaniques tel le processus de mise en forme par découpage. Dans ce secteur, les éléments affectés par les phénomènes d'usure sont les poinçons et les matrices. Au cours du procédé ils subissent une usure progressive de leurs parties actives, modifiant ainsi par exemple le rayon de courbure sur les arêtes de découpe de ces éléments (figure 10).

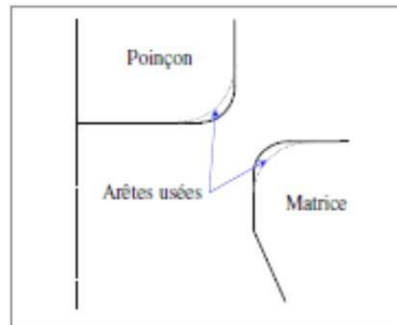


Figure IX 12 : Evolution des arêtes de découpe d'un poinçon et d'une matrice

La variation de ces dimensions a pour première conséquence l'augmentation de la valeur du jeu poinçon / matrice, mais également celui de l'effort nécessaire au découpage.

Dans la littérature, l'élément le plus étudié est le poinçon. Son usure est constituée de trois étapes reliées les unes aux autres et qui se déroulent successivement. Il subit donc tout au long de sa vie les étapes d'usure suivantes :

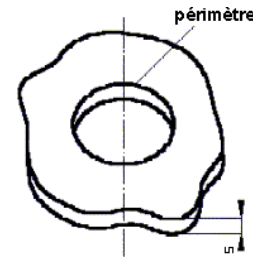
- Rodage : usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante,
- Marche normale : conditionne la durée de vie du poinçon (usure faible et constante),
- Vieillesse et mort : vitesse d'usure croissante, voire casse du poinçon dans certains cas.

Par conséquent, la capacité à prévoir l'usure des poinçons et l'aptitude à évaluer leur durée de vie sont d'une importance primordiale pour les découpeurs. En prévision de leur usure les poinçons sont conçus de façon à être affûtés après usure. Ils doivent également résister à la compression et au flambage.

Comme la dimension des poinçons conditionne la qualité des pièces produites, il est donc capital de comprendre le mécanisme et la cinétique de l'usure des poinçons afin d'en accroître la durée de vie.

IX.15. Effort de poinçonnage

L'effort de poinçonnage dépend de l'épaisseur, du périmètre de la section du trou, de la résistance du métal et des frottements qui sont généralement négligés.



Une lubrification est conseillée pour ne pas user prématurément les outils. Par conséquent, la section minimale de poinçonnage dépend de l'effort de poinçonnage, de la forme et de la surface de la section poinçonnée et aussi de la longueur de flambage de l'outil.

Formule générale de calcul des efforts de poinçonnage :

$$F \text{ (en KN)} = \frac{U \times S \times R_m \times 0.9 \times f}{1000}$$

F = effort de poinçonnage en kilonewton (10 kN = 1 tonne).

U = périmètre du poinçon (en mm).

S = épaisseur de tôle (en mm).

R_m = résistance à la traction (en N/mm²)

- inox (1.4301) 720 N/mm²

- acier (St 37) 420 N/mm²

- alu (AlMg3) 220 N/mm²

f = facteur d'atténuation entre 0.5 et 0.95 lors de l'utilisation de poinçon avec vague de coupe.

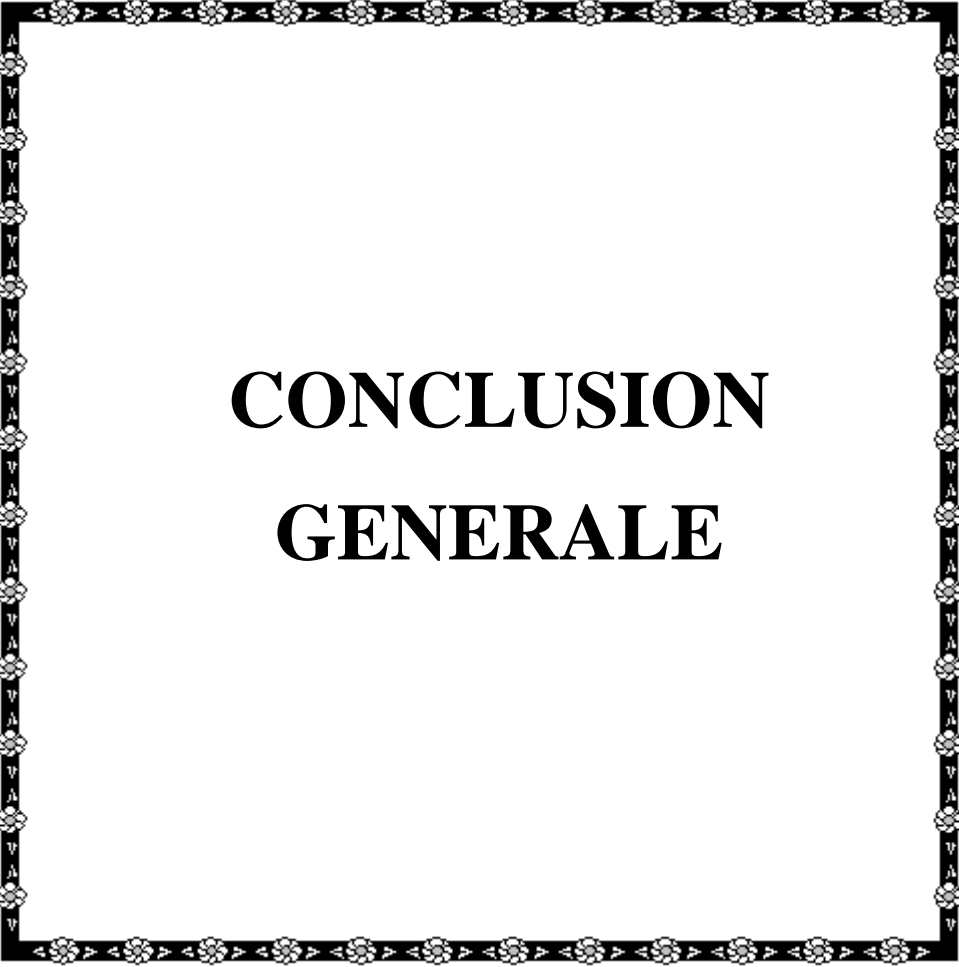
IX.16. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude sur le poinçonnage qui a pour objectif de donner une forme déterminée au matériau tout en lui imposant certaines conditions de coupe, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées.

C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement certains paramètres expérimentaux tels que :

La composition du matériau et ses différentes caractéristiques mécaniques.

Ce qui nous a permis de définir le procédé de l'opération en appliquant les efforts résultants des équations théoriques et de décrire certain outillage

A decorative rectangular border with a repeating floral pattern of small flowers and leaves, surrounding the central text.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude nous a permis à l'occasion de l'aborder et d'élargir nos connaissances dans ce domaine de fabrication, ce dernier existe depuis longtemps sa contrainte est toujours croissante dans l'industrie

Dans un premier temps, nous avons commencé par une présentation d'une étude théorique qui nous a amenés à faire un travail de recherche très poussé dans le domaine du formage des feuilles qui a nécessité une documentation technique adéquate pour bien les décrire (Découpage, Poinçonnage, Pliage, Cintrage, Emboutissage). Puis, nous avons défini les différents types des procédé et montré son importance sur le plan de fabrication et économique : (les essais de caractérisation, les paramètres du procédé, les défauts rencontrés dans ce procédé...), nous avons aussi énuméré les étapes et l'évaluation des efforts pour chaque procédé,

ces processus de mise en forme des tôles métalliques dans ce travail étaient d'une grande importance dans le domaine de l'industrie et que chaque procédé est considéré comme complémentaire aux procédés rémunérés dans le domaine de l'industrie et de la production de tôlerie de formation,

En fin, nous souhaitons que ce travail puisse être utile à l'entreprise, malgré nos efforts pour mener à bien cette étude, nous ne prétendons jamais est parfait, par conséquent il reste ouvert aux critiques et aux propositions allant dans le sens de son éventuelle amélioration,

Bibliographie

[1] Découpage-Emboutissage-Pliage - Fiches techniques, CETIM

[2] Cours mise en forme des métaux, AMIR BEB RHOUMA

[3] Production 2 , GOZLAN MAHDIA , BADEREDDIN SAIDI, HAMROUNI LOTFI

[4] Batoz J.L., Naceur H., Guo Y.Q., « Approche inverse pour la modélisation et l'optimisation du procédé d'emboutissage et fonctionnalités du logiciel Fast_Stamp » 17 Congrès Français de Mécanique, Troyes, Septembre 2005

[5]. Numerical Simulation of Metal Sheet Plastic Deformation ...

[6] Badais HADDAG « Contribution à la modélisation de la mise en forme des tôles métallique : application au retour élastique et à la localisation »

Thèse de doctorat 2007

[7]. KHIRANI DALEL.pdf - Mémoires de Magistère - Université ...

[8], A. Soualem, E.H.Ouakdi, G.Ferron, 2007, « Comparative Study of Springback for Expansion and Retreint Deep Drawing, Journal of Engineering and Applied Sciences » Vol.2, N°05, pp.849-853.

[8]. Haddadou Mahdi, aichoun Mohammed « Etude et conception de deux outils de découpage-poinçonnage et de pliage pour clapet air bruleur », mémoire de master II en Construction mécanique, UMMTO 2013.

[9]. Chamekh Abdes salem, Optimisation des procédés de mise en forme par réseaux de neurones artificiels, Thèse de doctorat, Ecole nationale d'Ingénieurs de Monastir Tunisie, 2007.

[10]. Col A, Emboutissage des tôles : Importance des modes de déformation, Techniques de l'ingénieur, BM 7510, 2002.

[11]. [A. B. Ismail. Modélisation de la découpe des tôles ferromagnétiques : corrélation entre l'état mécanique et les propriétés magnétiques. PhD thesis, Université De Technologie De Compiègne, 2000.

- [12].L. Girardot,
Technologie Professionnelle pour l'outilier, Découpage, Cambrage, Emboutissage
FOUCHIER, France.
- [13].R. Quatremer « Déformation plastique des tôles », édition DELAGRAVE, 1981.
- [14].Gréban F.,
Découpeabilité du cuivre et des alliages cuivreux, Thèse de l'Université de Franche-
comté, Besançon, France, 2006.
- [15]. [Col 02-1] Alain Col, « Emboutissage des tôles, aspect mécanique », Technique de
l'ingénieur, 2002, MC1, M3 181.
- [16]. [Col 02-3] Alain Col, « emboutissage des tôles, importance des modes de
déformation », technique de l'ingénieur, MC1, M 3 180. 2002
- [17]. [Fel00] É. Felder, « Procédés de mise forme : Introduction », Techniques de
l'ingénieur, M 3000, 2000
- [18]. [Fel] . Felder E., « Tribologie de l'emboutissage », Techniques de l'ingénieur, Traité
Mécanique et Chaleur, B7535.
- [19]. Cours mise en forme des métaux, Mr. JERBI Mourad, 2018.
- [20]. Déformation plastique des tôles à l'usage des techniciens en génie mécanique, par R.
QUADREMER Edition DELAGRAVE.
- [21]. Technique d'ingénieur.

Webographie

<https://www.scribd.com/document/352146569/1-Cours-plier-Emboutissage-pdf>

<https://www.decite.fr> › ... › Bâtiment › Technologies industrielles

<http://tspeed.free.fr/formroulage.htm>