



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N°d'enregistrement

/.../.../.../.../...

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم آلية وكهر وميكانيك

Département d'automatique et d'électromécanique

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Thème :

Contribution au développement d'un modèle numérique pour l'analyse des déformations plastiques

Présenté le :

Par :

ROUANI Akram

RAHMANI Lalmi

Évalué Par le jury composé de :

| | | | |
|------------------------|-----|---------------|-----------|
| AISSAOUI Fares | MCA | Univ Ghardaia | Président |
| BELLAOUAR Abderrahmane | Pr. | Univ Ghardaia | Encadrant |
| BOUKHARI Hamed | MCA | Univ Ghardaia | Examineur |
| MARZOUG Hocine | MCB | Univ Ghardaia | Examineur |

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Nous remercions Dieu Tout-Puissant pour Sa grâce qui nous a permis d'achever ce travail.

Nous adressons nos remerciements à :

Pr. BELLAOUAR Abderrahmane, encadrant de notre mémoire, pour sa disponibilité constante à nous aider et pour

Ses précieuses contributions qui ont enrichi ce travail.

Nous remercions également tout le personnel administratif et pédagogique de l'Université de Ghardaïa, en particulier les professeurs de la Faculté des Sciences et de la Technologie, et plus

Particulièrement ceux du Département d'automatique et d'électromécanique,

Ainsi que tous ceux qui nous ont soutenus, encouragés et apporté leur aide tout au long de ce parcours.

Dédicaces

À nos chers parents, en témoignage de notre profonde gratitude pour leurs sacrifices constants et

Leur soutien indéfectible au fil des années.

À nos frères et sœurs, ainsi qu'à l'ensemble de notre famille. À nos amis fidèles, pour leur

Présence et leurs encouragements.

À nos enseignants, pour la richesse de leur enseignement et la qualité de leur accompagnement.

À toutes les personnes qui occupent une place précieuse dans notre cœur.

Nous dédions ce mémoire en signe de reconnaissance et d'estime.

Résumé

Cette étude vise à fabriquer des pièces par déformation plastique, en se concentrant sur les opérations de pliage, de découpe et d'emboutissage. L'objectif principal est de développer un programme informatique permettant de déterminer les coordonnées du centre de poussée et la force nécessaire pour positionner l'outil avec précision, quelle que soit la forme de la pièce.

L'étude présente les concepts fondamentaux de la déformation plastique, notamment les zones élastiques et plastiques, la résistance théorique des cristaux et les principes du pliage. Elle détaille également les différents types de pliage (pneumatique et par marteau) et analyse les forces et les paramètres d'ingénierie tels que le rebond élastique. Concernant le processus de découpe, elle aborde ses principes, le jeu de coupe, les types d'outils, les forces de coupe et d'extraction, ainsi que le processus de formage de bandes. L'étude traite également de l'organisation des opérations de découpe et présente des méthodes de calcul, graphiques et analytiques, pour déterminer le centre de poussée et la force requise. La maintenance des outils de coupe et des presses est également abordée, ainsi que les tâches spécifiques liées aux outils (affûtage et contrôle du jeu) et aux presses (inspections mécaniques, hydrauliques et électriques). L'étude se conclut par une étude de cas et une méthodologie de planification.

Mots Clé : Déformation plastique Pliage Découpage Emboutissage Centre de poussée Effort de pliage Retour élastique

ملخص:

تهدف هذه الدراسة تصنيع القطع عن طريق التشوه اللدن، مع التركيز على عمليات الثني، والقطع، والتشكيل بالكبس. الهدف الرئيسي هو تطوير برنامج حاسوبي لتحديد إحداثيات مركز الدفع والقوة اللازمة لتحديد موضع الأداة بدقة، بغض النظر عن شكل القطعة. جاءت هاته الدراسة بعد تقديم بعض المفاهيم الأساسية للتشوه اللدن، بما في ذلك المناطق المرنة واللدنة، والمقاومة النظرية للبلورات، ومبادئ الثني. كما يوضح بالتفصيل الأنواع المختلفة للثني (الثني الهوائي وبالضرب)، ويحلل القوى والمعايير الهندسية مثل الارتداد المرن وكذلك فيما يخص عملية القطع حيث يغطي مبادئها، خلوص القطع، أنواع الأدوات، قوى القطع والاستخراج، وعملية التشكيل على الشريط، تنظيم عمليات القطع: يتناول العمل تنظيم عمليات القطع ويقدم طرقاً حسابية، سواء بيانية أو تحليلية، لتحديد مركز الدفع والقوة اللازمة. كما تم التطرق إلى صيانة أدوات ومكابس القطع، والمهام الخاصة بالأدوات (السّن، وفحص الخلوص) والمكابس (الفحص الميكانيكي، والهيدروليكي، والكهربائي). ويختتم بدراسة حالة ومنهجية للتخطيط.

الكلمات المفتاحية: تشوه لدن، ثني، قطع، تشكيل بالكبس، مركز الدفع، قوة الثني، ارتداد مرن.

Abstract:

This study aims to fabricate parts using plastic deformation, focusing on bending, cutting, and pressing operations. The main objective is to develop a computer program to determine the thrust centre coordinates and the force required to accurately position the tool, regardless of the part's shape.

This study follows the introduction of some fundamental concepts of plastic deformation, including elastic and plastic zones, the theoretical strength of crystals, and the principles of bending. It also details the different types of bending (pneumatic and hammer bending) and analyses forces and engineering parameters such as elastic rebound. Regarding the cutting process, it covers its principles, cut clearance, tool types, cutting and extraction forces, and the strip forming process. The study also addresses the organization of cutting operations and presents computational methods, both graphical and analytical, for determining the thrust centre and the required force. The maintenance of cutting tools and presses is also discussed, along with specific tool tasks (sharpening and clearance checks) and press tasks (mechanical, hydraulic, and electrical inspections). The study concludes with a case study and a methodology for planning.

Keywords: Plastic deformation, bending, cutting, compression forming, thrust centre, bending force, elastic rebound.

Sommaire

| | |
|--|-----|
| Remerciements | i |
| Dédicaces | i |
| Résumé | ii |
| Sommaire | iii |
| List du Figures..... | v |
| List du Tableaux | vi |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Déformation Plastique | 2 |
| I.1. Introduction..... | 3 |
| I.2. Résistance théorique des cristaux | 4 |
| I.3. Déformation plastique des Tôles..... | 5 |
| I.3.1. Pliage | 5 |
| I.3.1.1. Définition | 5 |
| I.3.1.2. Principe | 5 |
| I.3.1.3. Type de pliage : | 6 |
| I.3.1.4. Analyse de la déformation | 7 |
| I.3.1.5. Effort de pliage..... | 8 |
| I.3.1.6. Retour élastique | 9 |
| I.3.1.8. Avantages des outils | 12 |
| I.3.2. Découpage | 12 |
| I.3.2.1. Généralités | 12 |
| I.3.2.2. Définition | 12 |
| I.3.3. Emboutissage | 14 |
| I.3.3.1. Définition | 14 |
| I.3.3.2. Principe | 14 |
| I.3.3.3. Analyse théorique de la déformation | 16 |
| I.3.3.4. Matériaux emboutissables..... | 17 |
| I.3.3.5. Traçage des pièces embouties | 17 |
| I.3.3.6. Matrices et poinçons | 18 |
| Chapitre II : Découpage | 21 |
| II.1. Principe..... | 22 |
| II.2. Définition du découpage..... | 22 |
| II.3. Jeu de découpage | 23 |
| II.4. Les outils utilisés pour le découpage | 24 |
| II.4.1. Outils découverts | 24 |
| II.4.2. Outils à contre-plaque..... | 25 |
| II.4.3. Outil à presse-bande (outil suisse)..... | 29 |
| II.4.4. Outil à pilotage | 29 |
| II.4.4.1. Description fonctionnelle..... | 29 |
| II.4.4.2. Pavés..... | 30 |
| II.4.5. Outils de reprise..... | 31 |
| II.4.5.1. Poinçonnage et ajourage..... | 31 |
| II.4.5.2. Drageoir | 31 |
| II.4.5.3. Détrompeur | 32 |
| II.4.6. Outil de coupe à longueur..... | 33 |
| II.4.6.1. Utilisation | 33 |
| II.4.6.2. Outil de cisailage sans perte | 33 |
| II.4.6.3. Outil de coupe à longueur avec perte | 34 |
| II.4.7. Outil de crevage..... | 35 |
| II.4.8. Outil d'encochage (fig. II.4.41)..... | 36 |

| | |
|---|-----------|
| II.4.9. Outil de découpe à la retourne | 36 |
| II.5. Effort de découpe..... | 37 |
| II.5.1. Définition..... | 37 |
| II.5.2. Effort d'extraction | 38 |
| II.5.3. Pénétration du poinçon | 39 |
| II.5.4. Affûtage | 40 |
| II.5.5. Dépouille | 40 |
| II.6. Mise en bande..... | 41 |
| II.6.1. Définition..... | 41 |
| II.6.2. Mise en bande simple | 41 |
| II.6.3. Mise en bande à la retourne | 41 |
| II.7. Coefficient d'utilisation | 43 |
| II.8. Découpage des pièces circulaires | 44 |
| II.8.1. Définition..... | 44 |
| II.8.2. Jeu de découpage | 44 |
| II.8.3. Effort de découpage | 45 |
| II.8.4. Effort d'extraction | 45 |
| II.8.5. Organisation des découpes | 46 |
| II.8.6. Outillage | 46 |
| Chapitre III : Organisation des Découpes | 47 |
| III.1. Introduction | 48 |
| III.2. Positionnement de l'outil sur la presse..... | 49 |
| III.3. Le programme | 51 |
| Chapitre IV : Maintenance des outils et presses de découpage | 52 |
| IV.1 Introduction | 53 |
| IV.2. Types de maintenance appliqués | 54 |
| IV.2.1. Maintenance corrective..... | 54 |
| IV.2.2. Maintenance préventive..... | 54 |
| IV.2.3. Maintenance prédictive..... | 55 |
| IV.2.4. TPM (Total Productive Maintenance) | 55 |
| IV.3. Maintenance des outils de découpage | 56 |
| IV.3.1. Affûtage régulier des poinçons et matrices..... | 56 |
| IV.3.2. Contrôle du jeu poinçon/matrice | 56 |
| IV.3.3. Vérification de la dépouille et des états de surface..... | 57 |
| IV.3.4. Lubrification pour limiter l'échauffement | 57 |
| IV.3.5. Suivi des déformations et des usures..... | 57 |
| IV.4. Maintenance des presses..... | 58 |
| IV.4.1. Inspection mécanique | 58 |
| IV.4.2. Système hydraulique/pneumatique..... | 58 |
| IV.4.3. Système électrique et de commande..... | 59 |
| IV.4.4. Alignement et fixation | 59 |
| IV.5 Méthodologie de planification..... | 59 |
| IV.6. Étude de cas..... | 60 |
| IV.7 Conclusion..... | 62 |
| IV.8 Conclusion Générale | 62 |
| IV.9 Bibliographies | 62 |
| IV.10 Annexes..... | 62 |

List du Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Deux Zones Distinctes | 3 |
| Figure 2 : Déformation élastique et plastique à l'échelle cristalline | 3 |
| Figure 3 : Contrainte Critique de Cisaillement | 4 |
| Figure 4 : Torsion et traction/compression dans un pliage. | 5 |
| Figure 5 : Angle de Retour élastique. | 6 |
| Figure 6 : Pliage en l'air. | 6 |
| Figure 7 : Pliage avec frappe. | 7 |
| Figure 8 : Analyse de la déformation. | 8 |
| Figure 9 : Pliage en U sans frappe | 9 |
| Figure 10 : Pliage en U avec frappe | 9 |
| Figure 11 : Outillage pour pliage en V | 11 |
| Figure 12 : Outillage pour pliage en équerre | 11 |
| Figure 13 : Outillage pour pliage en Z | 12 |
| Figure 14 : Le poinçonnage | 13 |
| Figure 15 : Le principe de L'emboutissage | 14 |
| Figure 16 : Emboutissage | 15 |
| Figure 17 : Schéma d'un outil de découpage | 15 |
| Figure 18 : Analyse Théorique de la Déformation | 16 |
| Figure 19 : Traçage des pièces embouties | 17 |
| Figure 20 : Emboutis tronconiques..... | 17 |
| Figure 21 : Emboutis parallélépipédiques | 18 |
| Figure 22 : Matrice sans serre-flan | 19 |
| Figure 23 : Les poinçons | 19 |
| Figure 24 : les passes intermédiaires | 20 |
| Figure 25 : l'évacuation de la pièce emboutie | 20 |
| Figure 26 : Découpage..... | 22 |
| Figure 27 : Étapes du découpage..... | 23 |
| Figure 28 : Le Poinçon Pousse | 23 |
| Figure 29 : Les Fissures de Découpage | 24 |
| Figure 30 : Le poinçon | 25 |
| Figure 31 : Outils à contre-plaque | 25 |
| Figure 32 : Contrôle de L'avance | 26 |
| Figure 33 : À couteau | 27 |
| Figure 34 : Pièce à Récupérer..... | 27 |
| Figure 35 : Les Sections Spéciales | 27 |
| Figure 36 : Engrènement | 28 |
| Figure 37 : Départ de la butée | 28 |
| Figure 38 : le 3 ^e coup de presse | 29 |
| Figure 39 : Outil à presse-bande..... | 29 |
| Figure 40 : Outil à pilotage..... | 30 |
| Figure 41 : Pavés | 30 |
| Figure 42 : Outil de poinçonnage avec serre-flan..... | 31 |
| Figure 43 : Drageoir | 32 |
| Figure 44 : Détrompeur | 32 |
| Figure 45 : Outils de reprise à palette..... | 33 |
| Figure 46 : La palette..... | 33 |
| Figure 47 : Outil de cisailage sans perte..... | 34 |
| Figure 48 : Outil de coupe à longueur avec perte..... | 34 |
| Figure 49 : Pièces à Extrémités | 35 |

| | |
|---|----|
| Figure 50 : Butée réglable | 35 |
| Figure 51 : Outil de Crevage | 35 |
| Figure 52 : Outil de crevage | 36 |
| Figure 53 : Outil d'encoche | 36 |
| Figure 54 : 1er passage | 37 |
| Figure 55 : 2ème passage (après retournement) | 37 |
| Figure 56 : Effort de découpe | 38 |
| Figure 57 : Le Poinçon Après Découpe | 39 |
| Figure 58 : Découpage fin | 39 |
| Figure 59 : Pénétration du Poinçon | 40 |
| Figure 60 : Affûtage | 40 |
| Figure 61 : Dépouille | 40 |
| Figure 62 : Mise en bande simple | 41 |
| Figure 63 : Les Pièces Circulaires | 41 |
| Figure 64 : Mise en bande à la retourne | 42 |
| Figure 65 : déforme de la bande | 42 |
| Figure 66 : Outil à plusieurs poinçons | 42 |
| Figure 67 : Cisailage des bandes | 43 |
| Figure 68 : Coefficient D'utilisation | 43 |
| Figure 69 : Opération de Cisailage | 44 |
| Figure 70 : Jeu de découpage | 44 |
| Figure 71 : Effort de Découpage | 45 |
| Figure 72 : le Poinçon Après Découpe | 45 |
| Figure 73 : Organisation des découpes | 46 |
| Figure 74 : Les Matrices Longue | 48 |
| Figure 75 : Méthode analytique | 49 |
| Figure 76 : Méthode graphique | 50 |

List du Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : les valeurs de KKK pour différents métaux | 10 |
| Tableau 2 : l'évacuation de la pièce emboutie | 20 |
| Tableau 3 : Les Fissures de Découpage | 24 |
| Tableau 4 : La Résistance à la Traction | 38 |
| Tableau 5 : Méthode analytique | 49 |

Introduction Générale

Introduction Générale

Le présent travail porte sur la réalisation de pièces par déformation plastique, notamment à travers les procédés suivants :

- Le pliage.
- Le découpage.
- L'emboutissage.

L'objectif est de développer un programme de calcul permettant de déterminer les coordonnées du centre de poussée, afin d'assurer un positionnement précis de l'outil, ainsi que l'effort nécessaire que celui-ci doit exercer, quelle que soit la forme de la pièce à réaliser.

L'outil, monté sur un bras automatisé, est capable de balayer une surface donnée (tôle à découper).

Le contenu de ce mémoire est structuré en introduction générale, quatre chapitres et conclusion générale :

- Le premier chapitre présente une vue d'ensemble du concept de déformation plastique des métaux ainsi que des différents procédés associés.
- Le deuxième chapitre est consacré au procédé de découpage.
- Le troisième chapitre traite de l'organisation des découpes ainsi que des méthodes de calcul, à la fois graphiques et analytiques, concernant la détermination du centre de poussée, de l'effort à appliquer, et du programme de calcul correspondant.
- Enfin, le quatrième chapitre donne une étude et des notions sur la maintenance des outils et presses de découpage.

Chapitre I:

*Déformation
Plastique*

I.1. Introduction

Lorsqu'un matériau métallique est soumis à un effort de traction, la courbe obtenue présente généralement deux zones distinctes (voir Fig. I.1) :[01]

- Une **zone élastique**, correspondant à une déformation réversible du métal, c'est-à-dire que le matériau reprend sa forme initiale une fois la contrainte supprimée.
- Une **zone plastique**, où la déformation devient permanente.

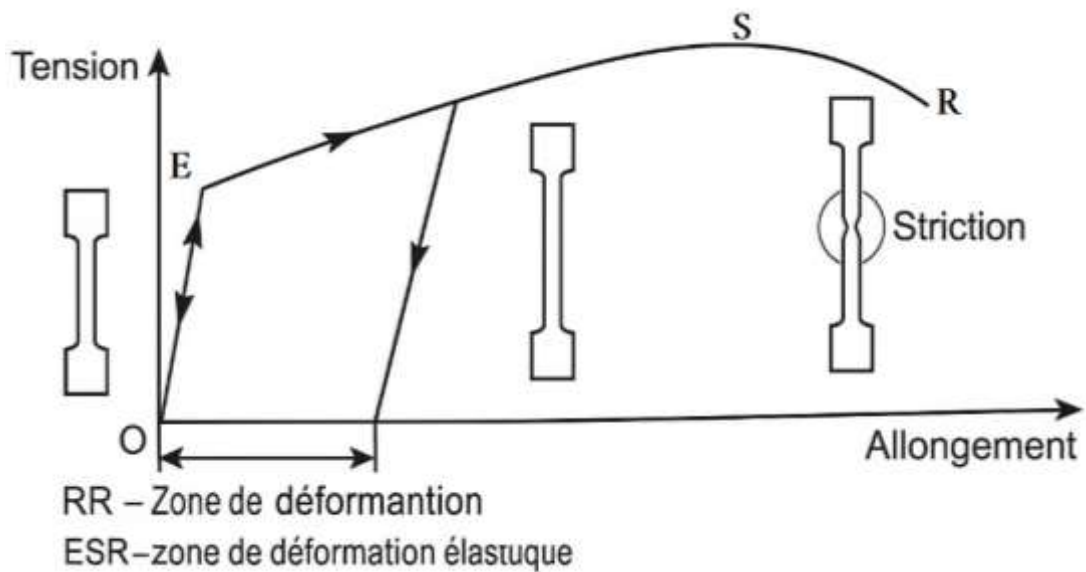


Figure 1 : Deux Zones Distinctes [02]

À l'échelle cristalline, la déformation plastique résulte principalement du **glissement** d'un plan cristallin par rapport à un autre, selon des intervalles correspondant à des multiples entiers de la distance interréticulaire (voir Fig. I.2).

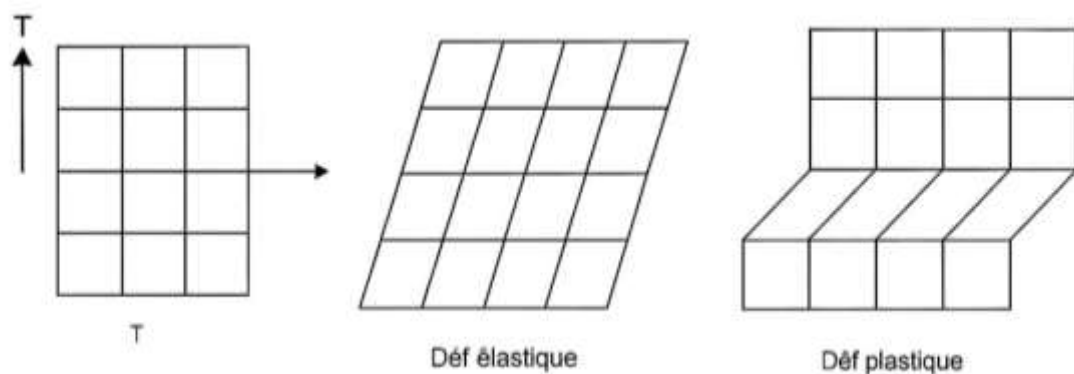


Figure 2 : Déformation élastique et plastique à l'échelle cristalline [03]

Ce phénomène de glissement s'explique par le **mouvement des dislocations**. Ainsi, la résistance d'un métal à la déformation plastique dépend étroitement de la facilité ou de la difficulté avec laquelle ces dislocations peuvent se déplacer.

I.2. Résistance théorique des cristaux

Considérons, comme illustré sur la figure (I.3), un cristal de forme rectangulaire soumis à une contrainte de cisaillement τ . Supposons que la partie supérieure du cristal se déplace par rapport à la partie inférieure sous l'effet de cette contrainte.

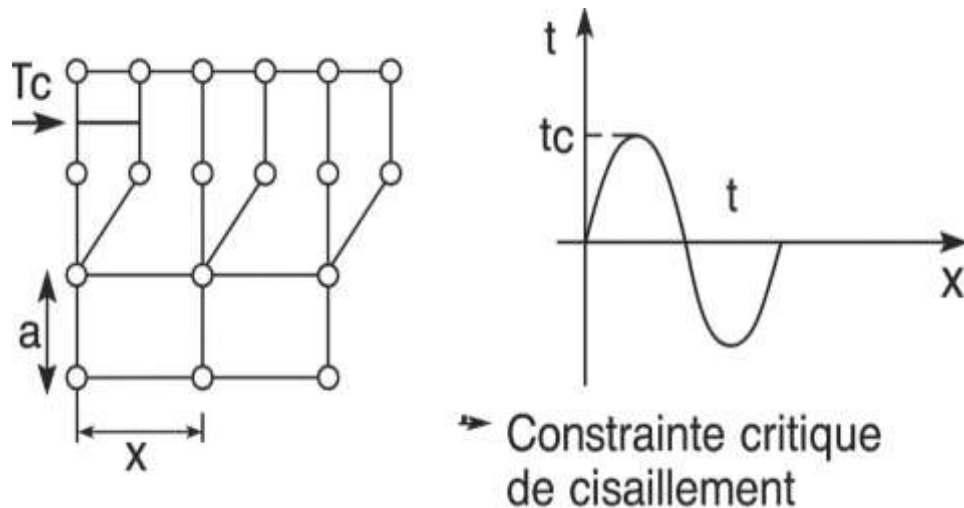


Figure 3 : Contrainte Critique de Cisaillement [04]

Si l'on note X le déplacement relatif dû à cette contrainte τ , on peut représenter schématiquement la variation de τ en fonction de X . Cette relation peut s'exprimer ainsi : Pour des déplacements très faibles, c'est-à-dire lorsque le rapport X/a est très petit (où a est la distance entre deux plans cristallins), on a :

$$\tau = \tau_c \cdot \sin \left(\frac{2\pi X}{a} \right) \approx \tau_c \cdot \left(\frac{2\pi X}{a} \right)$$

En supposant que la loi de Hooke (proportionnalité entre la contrainte et la déformation) est applicable dans ce régime, on peut également écrire :

$$\tau = G \cdot \left(\frac{X}{a} \right)$$

où G est le module de cisaillement.

En combinant ces deux expressions, on obtient :

$$G \cdot \left(\frac{X}{a} \right) \approx \tau_c \cdot \left(\frac{2\pi X}{a} \right) \Rightarrow \frac{G}{2\pi} \approx \tau_c$$

Avec :

- a : distance entre deux plans cristallins (en mm),
- X : déplacement relatif des plans cristallins (en mm),
- τ_c : contrainte de cisaillement critique (en N/mm²),
- G : module de cisaillement du matériau.

I.3. Déformation plastique des Tôles

On distingue généralement **trois principaux types de déformation** des matériaux:

- Le **pliage**,
- L'**emboutissage**,
- Le **découpage**.

Dans chacun de ces procédés, l'**outillage utilisé** est composé de deux éléments essentiels : **un poinçon** et **une matrice**, qui travaillent en complémentarité pour former ou découper la pièce.

I.3.1. Pliage

I.3.1.1. Définition

Le pliage permet de transformer une pièce plane en une pièce développable, généralement constituée de sections adjacentes avec des arêtes arrondies selon un rayon de courbure **R** très faible par rapport à l'épaisseur **e** du matériau, typiquement tel que **R ≤ 5e**. Ce procédé engendre une distribution non uniforme des déformations à travers l'épaisseur de la pièce :

- Les fibres situées au-dessus de la fibre neutre subissent un allongement,
- Tandis que les fibres situées en dessous de cette fibre neutre subissent un raccourcissement (voir Fig. 1.4).

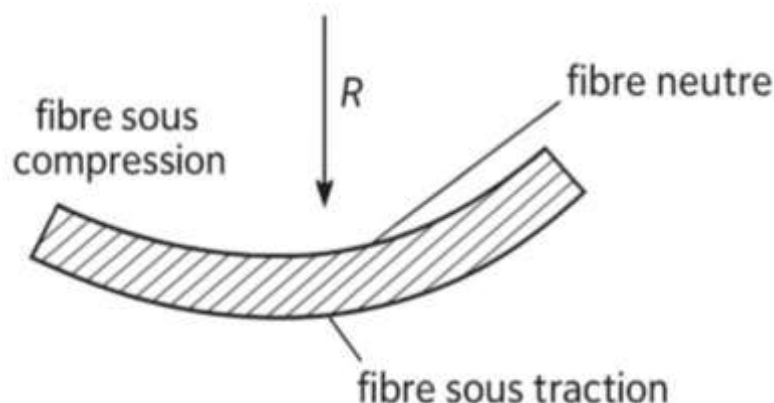


Figure 4 : Torsion et traction/compression dans un pliage. [05]

I.3.1.2. Principe

Lorsqu'une force est appliquée sur une ébauche (flan) reposant sur deux ou plusieurs appuis, ou encastrée à une extrémité, le flan subit un fléchissement. Lorsque l'effort cesse, si le fléchissement a été suffisamment important, le flan adopte une forme intermédiaire. Ce phénomène est caractérisé par un retour élastique, noté " v ", ainsi qu'un angle α correspondant à ce retour élastique, comme illustré dans les figures (I.5).

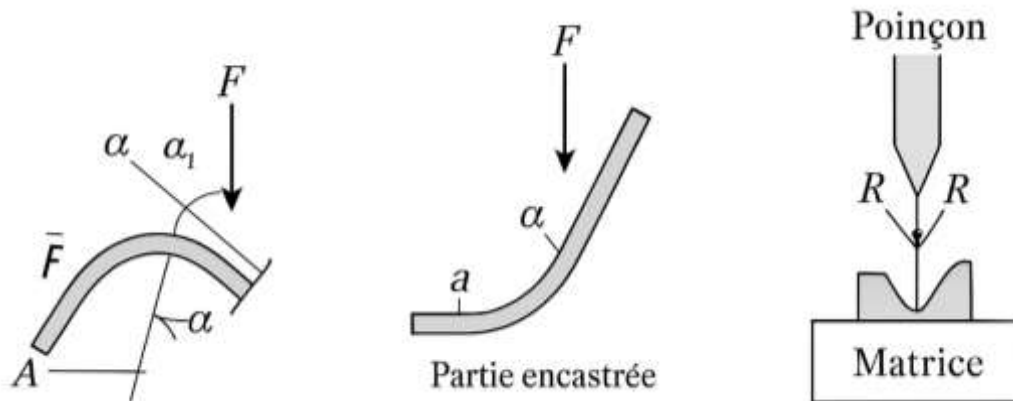


Figure 5 : Angle de Retour élastique. [06]

I.3.1.3. Type de pliage :

Il existe deux **types principaux de pliage** :

- Pliage en l'air.
- Pliage avec frappe.

A- Pliage en l'air : Le pliage en l'air utilise un poinçon et une matrice en forme de V, dont l'angle est inférieur à celui du pli à réaliser. Le pli est formé en fonction de la **profondeur de pénétration** du poinçon dans la matrice (voir Fig. 1.8).

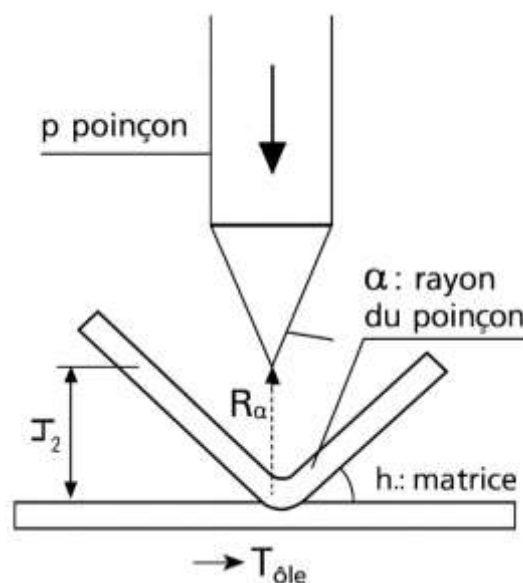


Figure 6 : Pliage en l'air. [07]

Selon la **position du poinçon** en fin de course, différents **angles internes** peuvent être obtenus avec le même outillage, l'angle terminal étant celui du V augmenté du **retour élastique**.

B- Pliage avec frappe : Dans le pliage avec frappe, le poinçon et la matrice sont également en forme de V, mais l'angle est pratiquement égal à celui du pli à réaliser. Lors de ce procédé, l'épaisseur de la tôle est réduite au niveau du pli. Cette réduction dépend du rayon de pliage R_r et de l'épaisseur et du matériau, comme illustré dans les Fig. 1.7

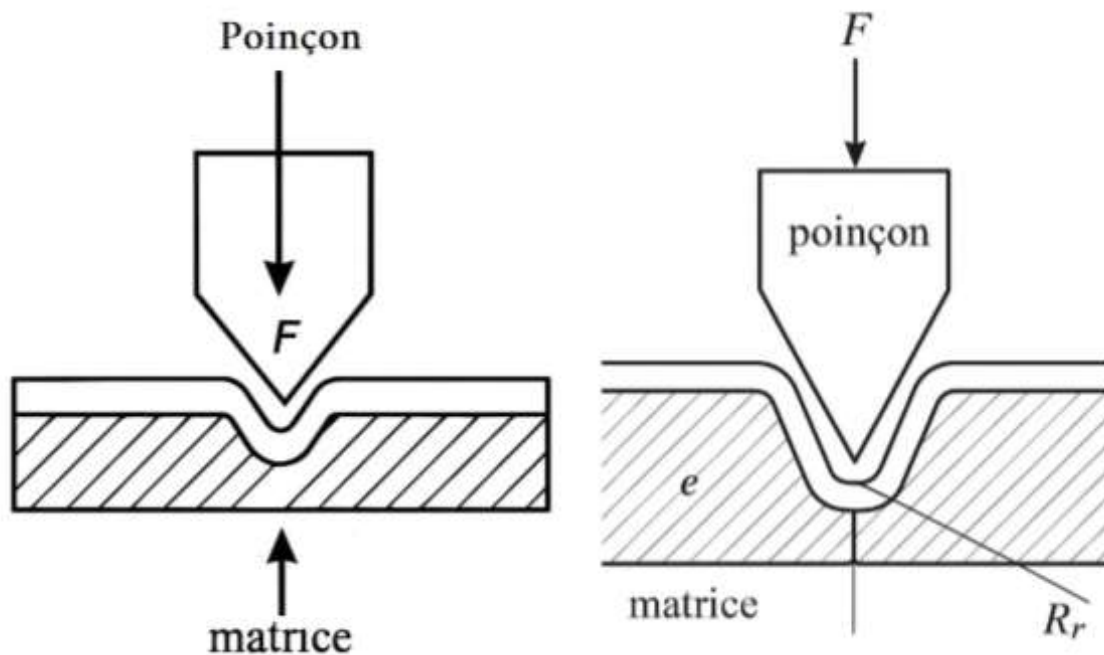


Figure 7 : Pliage avec frappe.[08]

Le rayon R_p du poinçon, qui pénètre dans le métal, doit être **2/3 du rayon RRR** obtenu lors du pliage en l'air.

I.3.1.4. Analyse de la déformation

Sous l'action du poinçon, le métal situé dans la section L est soumis à des forces de compression et de traction sur la hauteur H. L'intensité de ces forces s'annule au niveau de la fibre neutre, et leurs valeurs maximales sont atteintes aux points E et K.

Le maintien de l'équilibre de la section, où l'une des zones augmente tandis que l'autre diminue, entraîne un déplacement de la fibre neutre vers le rayon intérieur, comme illustré dans la Fig. I.8.

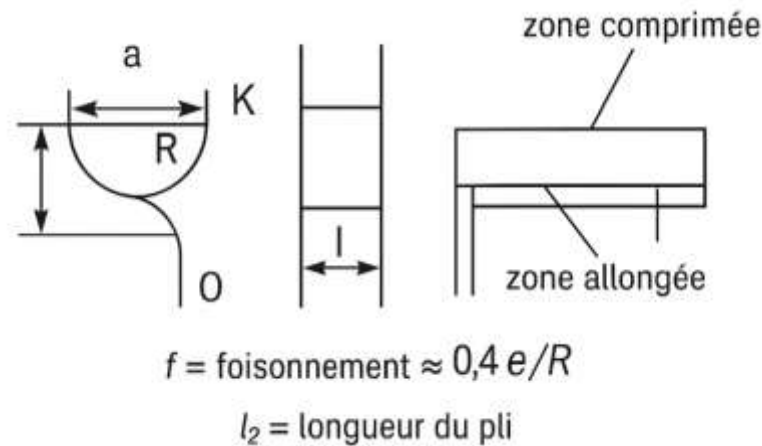


Figure 8 : Analyse de la déformation.[09]

Approximativement la fibre neutre située à :

- $e/2$ si $R/e \geq 3$.
- $2e/5$ si $R/e = 2$.
- $e/3$ si $R/e = 1$.

I.3.1.5. Effort de pliage

A- Pour le pliage en l'air : L'effort de pliage F_1 est défini par la relation suivante :

$$F_1 = \frac{K \cdot L \cdot e^2 \cdot R_m}{a}$$

où:

- F_1 : effort de pliage en **daN**,
- e : épaisseur de la tôle à plier (en mm),
- L : longueur du pli (en mm),
- a : ouverture du **V** (en mm),
- R_m : résistance à la rupture du métal (en **daN/mm²**),
- K : coefficient dépendant de l'ouverture du **V**.

Le rayon **R** obtenu est approximativement égal à **a/6**, à condition que **R_p ≤ R** où :

- R_p : rayon du poinçon,
- R : rayon obtenu après pliage.

B - Pliage avec frappe : De bons résultats sont obtenus lorsque $a=6ea$, Le rayon R_p du poinçon, qui pénètre dans le métal, doit être proche des deux tiers du rayon R obtenu lors du pliage à l'air, La force nécessaire est donnée par la relation :

$$F_2 = 2F_1 = \frac{2 \cdot K \cdot L \cdot e^2 \cdot R_m}{a}$$

C - Pliage en U sans frappe : Dans ce cas, l'efficacité du pliage dépend fortement du jeu entre le poinçon et la matrice. Lorsque ce jeu correspond à l'épaisseur nominale de la tôle majorée de la tolérance, l'effort nécessaire est : (voir figure 1.9)

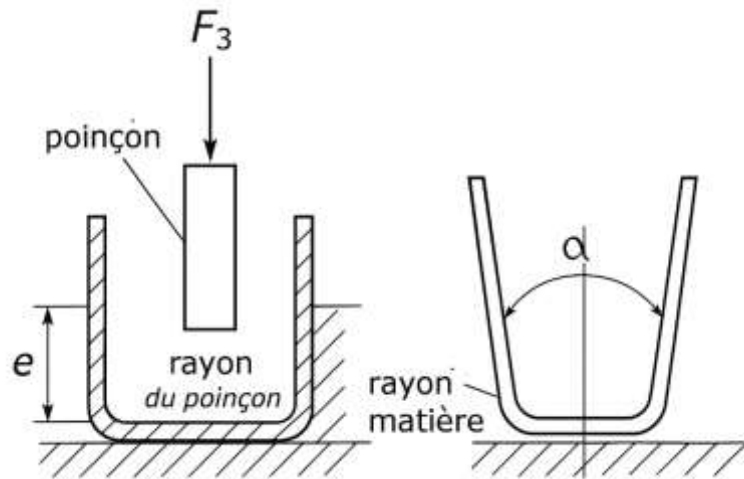


Figure 9 : Pliage en U sans frappe

$$F_3 = \frac{2}{3} \cdot L \cdot R_m \cdot e \cdot \left(1 + \frac{e}{a}\right)$$

D - Pliage en U avec frappe : La relation suivante permet d'obtenir de bons résultats grâce à l'écrasement du galbe formé au début du pliage ou du rayon e :

$$F_4 = 2,5F_3 = \frac{5}{3} \cdot L \cdot R_m \cdot e \cdot \left(1 + \frac{e}{a}\right)$$

Le phénomène d'arc-boutement engendre un refoulement du métal excédentaire vers les angles, ce qui s'oppose à l'ouverture des ailes. (voir figure 1.10)

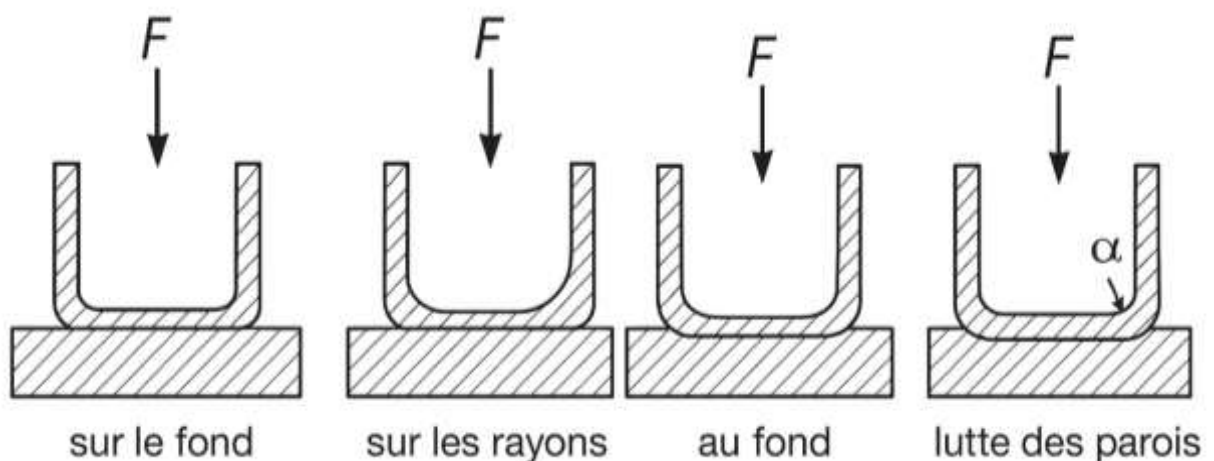


Figure 10 : Pliage en U avec frappe

I.3.1.6. Retour élastique

(Se référer aux figures 1.5 et 1.6)

- Il est nécessaire de procéder à des essais préliminaires pour estimer le retour élastique et ajuster l'angle de pliage en conséquence.
- Une méthode de calcul approximative peut également être utilisée selon la formule :

$$\alpha_i = K \cdot \alpha_f$$

où :

- α_i est l'angle de pliage (ou angle de l'outil),
- α_f est l'angle final souhaité,
- K est un coefficient dépendant du matériau et du rapport R/eR/eR/e (rayon de pliage sur épaisseur).

Le tableau suivant (1.1) indique les valeurs de K pour différents métaux :

Tableau 1 : les valeurs de K pour différents métaux [10]

| K- | | Aluminium | Acier doux | Laiton | Z2CN 18-10 |
|------------|-----------|------------------|-------------------|---------------|-------------------|
| R/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 |
| | 40 | 0.96 | 0.85 | 0.82 | 0.65 |

I.3.1.7. Outils spéciaux

Dans le cas de la production en moyenne ou grande série, on utilise des outils spéciaux réalisés à partir de blocs d'acier, souvent composés de plusieurs éléments assemblés pour s'adapter à la géométrie des pièces.

A – Outillage pour pliage en V :

Comme illustré dans la figure 1.11, l'outillage est simple :

- Le poinçon est fixé sous le coulisseau de la presse.
- La matrice est positionnée sur la table.
- Un éjecteur permet de retirer la pièce après pliage.
- Un drageoir assure le positionnement correct du flan sur la matrice.

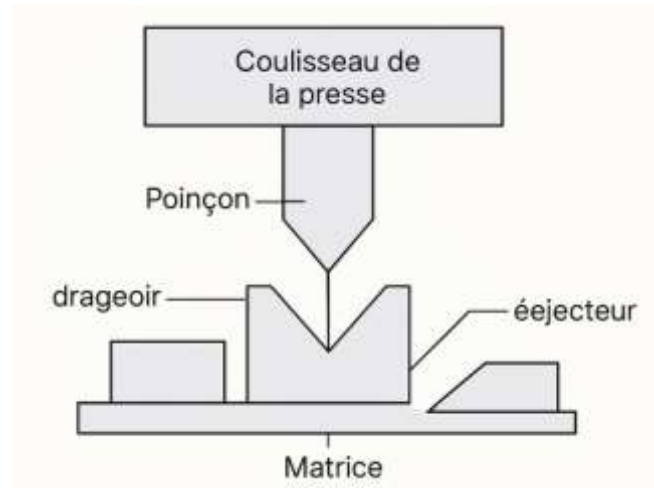


Figure 11 : Outillage pour pliage en V

B – Outillage pour pliage en équerre : La figure 1.12 montre le type d’outillage utilisé pour ce pliage.

- L’aile la plus courte est celle qui est relevée en premier.
- L’éjecteur remplit une double fonction :
 1. Il permet l’éjection de la pièce,
 2. Il protège la partie formée du flan contre toute déformation.

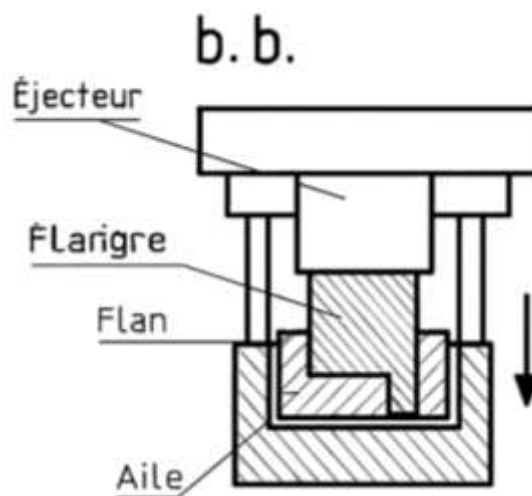


Figure 12 : Outillage pour pliage en équerre

C – Outillage pour pliage en Z :

- La figure 1.13 présente un outillage simple, peu précis.
- La figure 1.13 illustre un outillage plus précis, adapté aux pièces en tôle d’épaisseur inférieure ou égale à 2 mm.

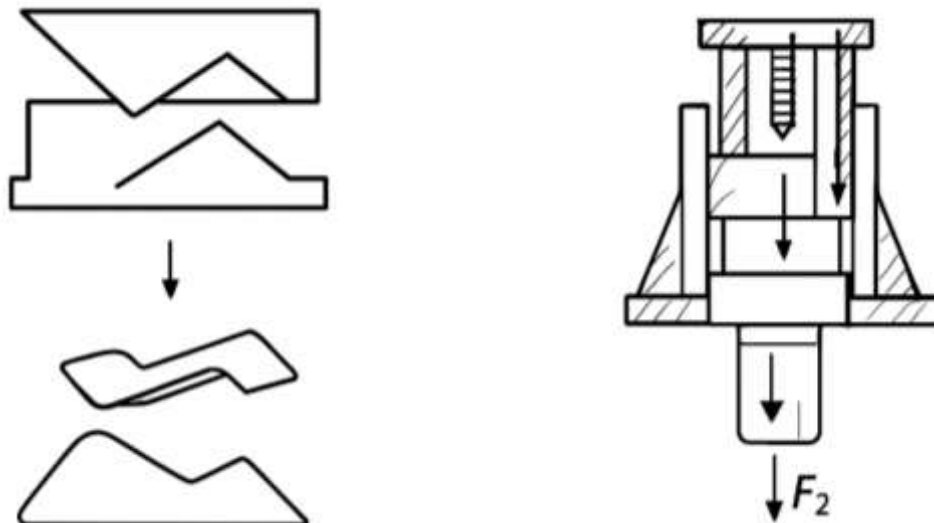


Figure 13 : Outillage pour pliage en Z

I.3.1.8. Avantages des outils

Les outils spécialisés présentent plusieurs avantages significatifs :

- Ils assurent une grande fidélité dans la reproduction des formes et des dimensions des pièces.
- Ils permettent l'intégration d'éléments interchangeables en acier résistant à l'usure.
- Ils contribuent à une augmentation notable des cadences de production.

I.3.2. Découpage

I.3.2.1. Généralités

Le **découpage** est une opération qui consiste à obtenir un flan à partir d'une tôle plane, par **cisaillement** du métal.

I.3.2.2. Définition

Le **poinçonnage** est un type de découpage **intérieur**, réalisé à l'intérieur du flan. Un outillage de découpage comprend :

- Un **poinçon** et
- Une **matrice**, tous deux en acier dur traité (trempé et revenu à basse température).

Le poinçon est généralement placé dans la partie supérieure de l'outil. Lors de sa descente, il découpe un flan qui tombe dans la partie inférieure de la matrice, où une ouverture est prévue pour son évacuation (voir fig. 1.14) [10].

Lors de la remontée du poinçon, celui-ci a tendance à entraîner la tôle restante. Pour éviter cela, on utilise un dévêisseur, une plaque ajourée maintenant la tôle en place.

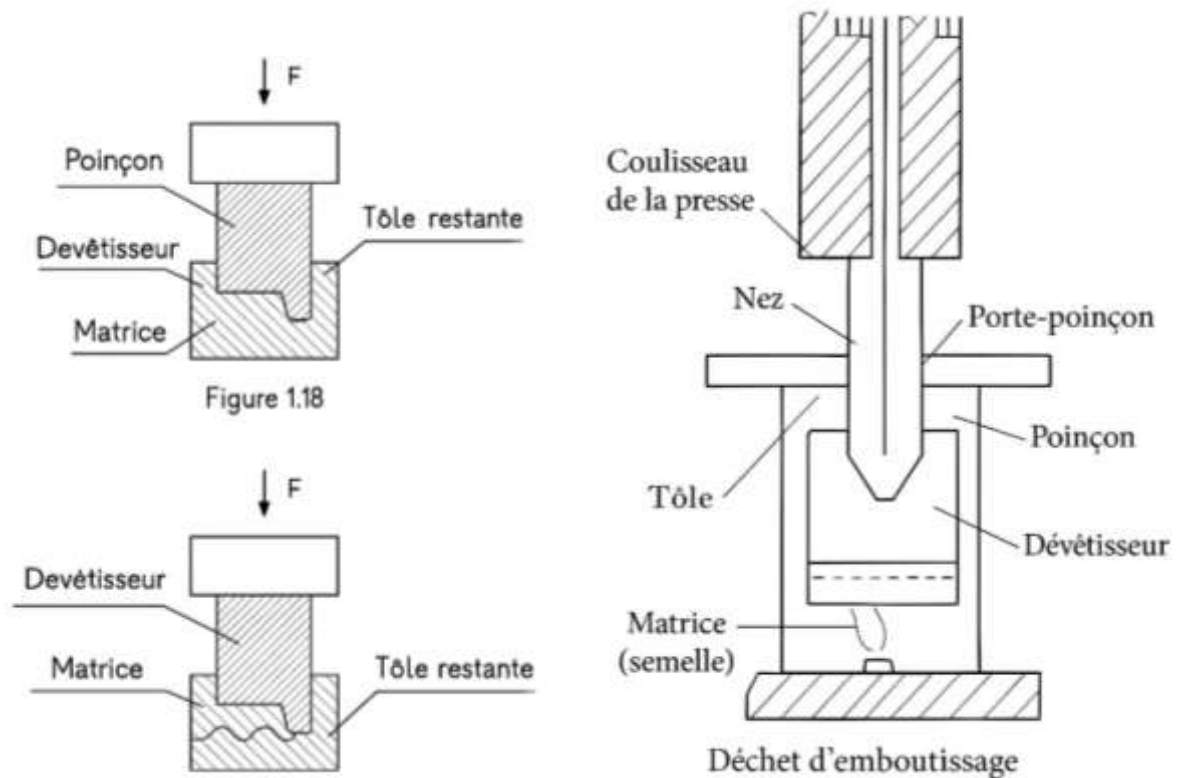


Figure 14 : Le poinçonnage

Le cisaillement exige un mouvement de translation du poinçon par rapport à la matrice selon la direction de la force F . Ainsi, l'un de ces éléments est fixé à la table de la presse, l'autre au coulisseau.

L'outil illustré en figures 14 comprend :

- Une matrice fixée sur la table de la presse via des semelles ou enclumes,
- Un poinçon fixé au coulisseau à l'aide d'un porte-poinçon, qui peut être constitué d'une ou plusieurs pièces.

Pour garantir un bon fonctionnement du coulisseau, la résultante des efforts de cisaillement doit passer par l'intersection des plans médians des glissières. Cette position est matérialisée par un alésage cylindrique sur le coulisseau, où vient s'insérer un téton (ou nez) cylindrique, dont l'axe est confondu avec cette résultante.

La force de découpage est donnée par la formule :

$$F = S \cdot R_c = L \cdot e \cdot R_c$$

où :

- L = périmètre découpé [mm]
- e = épaisseur de la tôle [mm]
- R_c = résistance au cisaillement du métal [N/mm^2].

I.3.3. Emboutissage**I.3.3.1. Définition**

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique dans lequel une surface de métal est entraînée par un poinçon dans une matrice. Cette déformation, liée au déplacement moléculaire du métal, est difficilement réversible. Ainsi, on considère que la pièce obtenue n'est pas développable.

I.3.3.2. Principe

Le flan est d'abord placé sur la matrice, puis le poinçon descend, ce qui initie l'emboutissage (fig. 1.15).

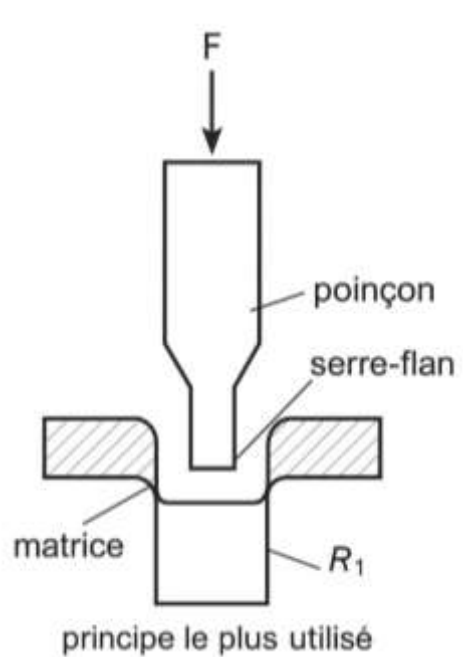


Figure 15 : Le principe de L'emboutissage

Dans le cas d'un **embouti peu profond à bords cylindriques**, le flan circulaire est centré sur la matrice et maintenu par un **drageoir**.

Les bords du poinçon et de la matrice sont **arrondis** pour faciliter le glissement du métal et éviter toute **déchirure** en début de formage (fig. 1.16).

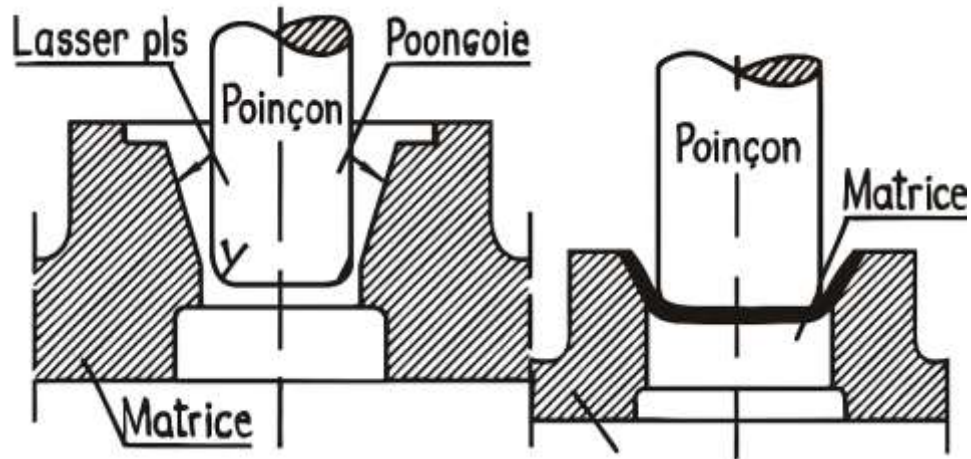


Figure 16 : Emboutissage

Au début de l'opération :

- Les bords du flan se relèvent, formant une **cuve** de diamètre inférieur à celui du flan initial.
- Des **plis** apparaissent sur la zone relevée, accompagnés d'une **légère augmentation d'épaisseur** ($e' > e$).
- Le poinçon poursuit sa descente jusqu'à élimination des plis.

Une fois l'emboutissage terminé, la pièce est évacuée vers le bas (voir fig. 1.17).

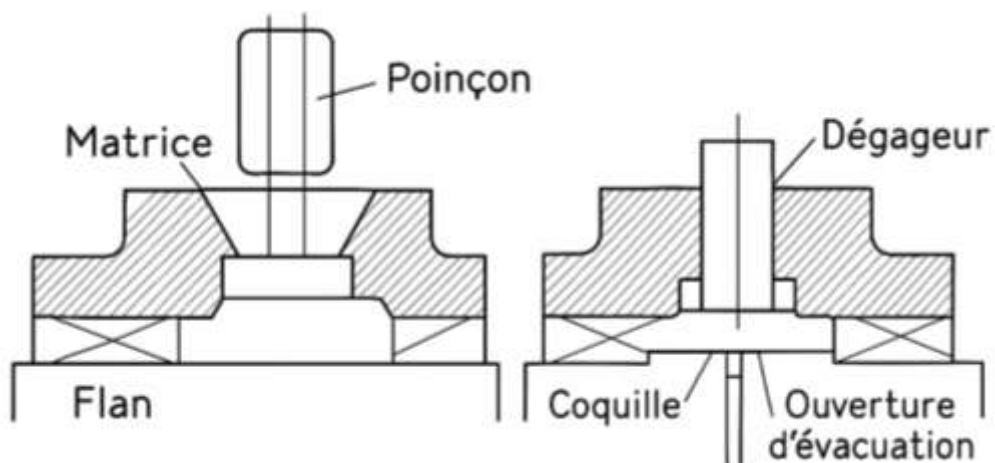


Figure 17 : Schéma d'un outil de découpage

I.3.3.3. Analyse théorique de la déformation

Lors de l'emboutissage, comme illustré en figure 1.18 :

- Un rectangle A.B.C.D est déformé sous l'effet de forces radiales ramenant AE vers AB, et DC vers DF.
- Le déplacement de matière est **maximum en EF** et nul en AD.

Cela induit différents types de **contraintes** :

- Radiales,
- Tangentielles,
- **Ou une combinaison variable des deux.**

Deux cas se présentent selon la hauteur de l'embouti :

1. Hauteur faible (BC proche de EF) :

L'augmentation d'épaisseur est maîtrisée grâce au **jeu** entre poinçon et matrice.

2. Hauteur importante (BC éloigné de EF) :

- Si le métal est suffisamment épais : pas de plis.
- Si l'épaisseur est faible : **des plis se forment.**

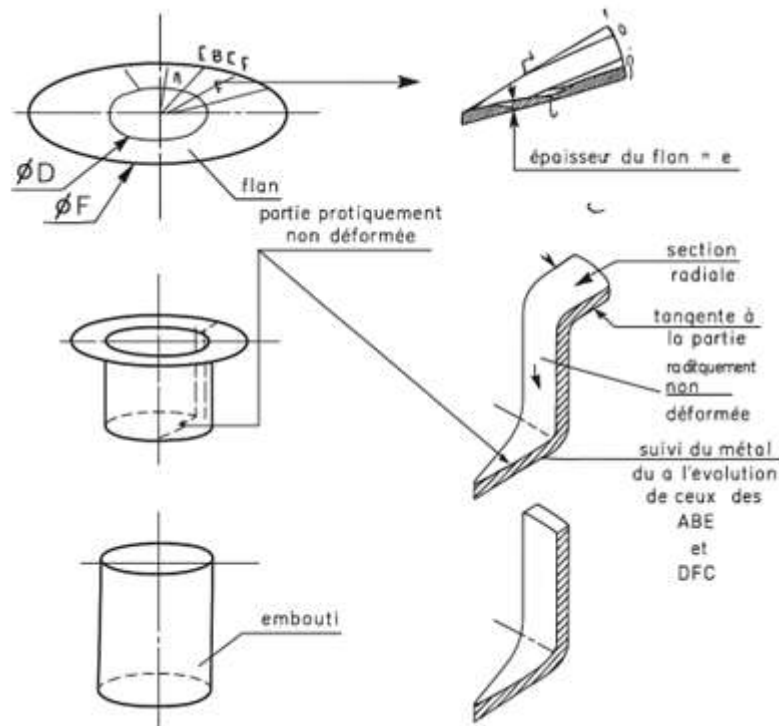


Figure 18 : Analyse Théorique de la Déformation

I.3.3.4. Matériaux emboutissables

Sont considérés comme emboutissables tous les métaux et alliages en feuilles présentant un **allongement élevé** ($A\% \geq 30\%$), condition essentielle pour permettre la déformation plastique sans rupture.

I.3.3.5. Traçage des pièces embouties

Les pièces obtenues par emboutissage ne possèdent généralement pas de dépouille. Leur traçage dépend de leur géométrie :

A – Emboutis cylindriques : Ces formes sont généralement faciles à réaliser. Toutefois, pour réduire le nombre d'opérations, il est conseillé de :

- Prévoir des rayons de fond supérieurs à 5 fois l'épaisseur de la tôle ($R > 5E$).
- Éviter les hauteurs excessives, qui compliquent l'emboutissage (fig. 1.19).

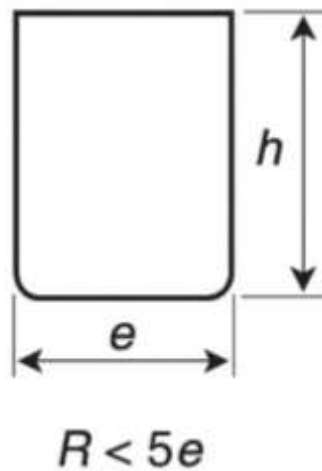


Figure 19 : Traçage des pièces embouties

B – Emboutis tronconiques : Ce sont les plus difficiles à réaliser en emboutissage profond. Toutefois, certaines formes tronconiques peuvent être obtenues sans difficulté majeure (fig. 1.28 et 1.29).

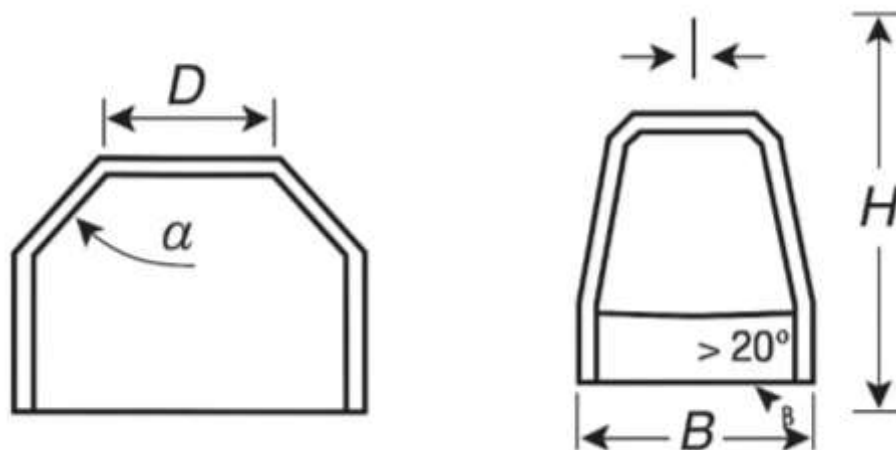


Figure 20 : Emboutis tronconiques

C – Emboutis parallélépipédiques : Pour ces formes :

- Il est recommandé de ne pas trop s'éloigner d'une forme carrée.
- Prévoir un grand rayon d'angle pour faciliter l'écoulement du métal (fig. 1.21).

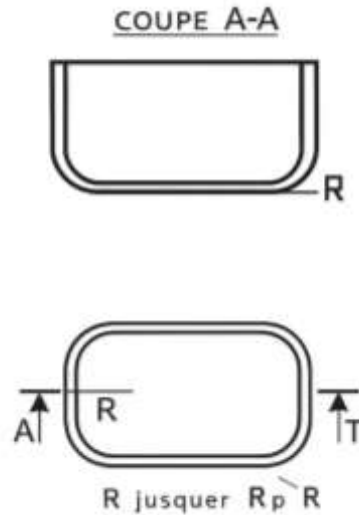


Figure 21 : Emboutis parallélépipédiques

I.3.3.6. Matrices et poinçons

A – Les matrices : Les matrices se distinguent par :

- Leur forme et dimensions,
- Le jeu entre la matrice et le poinçon,
- Leur qualité mécanique et état de surface.

• Matrice sans serre-flan

La figure 1.22 présente une matrice sans serre-flan, utilisée pour des emboutis simples.

La pièce est calibrée selon :

- $R_e = 3e$;
- $R_c = 5e$;
- $h = 5e$;

où H représente la hauteur de la zone calibrant la pièce.

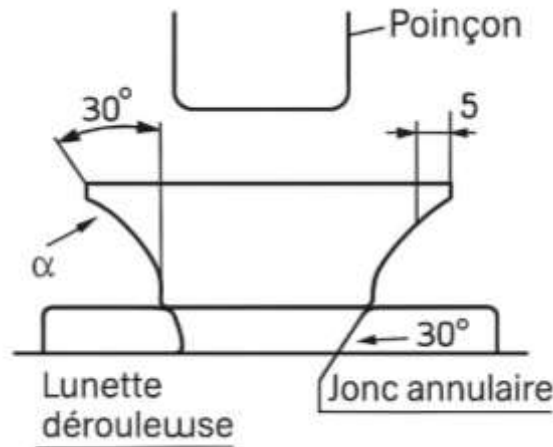


Figure 22 : Matrice sans serre-flan

• **Matrice avec serre-flan**

La matrice de première passe, avec détails en fig. 1.22, comprend un serre-flan :

- Si R_e est trop grand → le métal se relâche trop tôt, entraînant la formation de plis.
- Si R_e est trop petit → la tôle s'amincit dangereusement.

La relation empirique de KACZMAREK donne une estimation correcte :

- Pour l'acier : $R_e = 0,8 D.e$
- Pour l'aluminium et alliages : $R_e = 0,9 D.e$

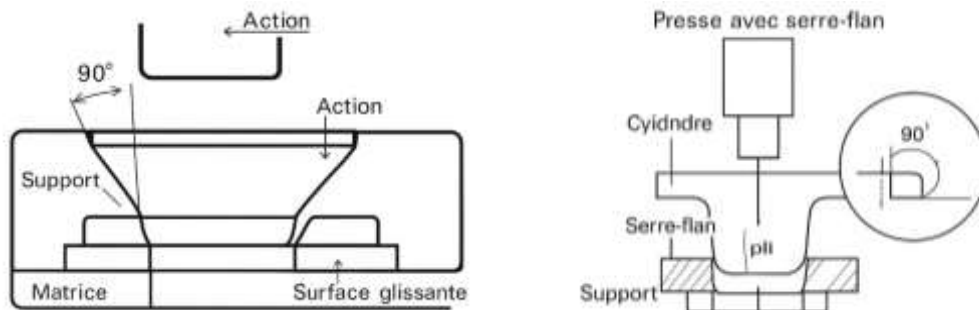


Figure 23 : Les poinçons

B – Les poinçons : Un rayon trop faible entraîne une diminution d'épaisseur de la tôle enroulée, défaut qui apparaîtra sur la paroi latérale de la pièce après réemboutissage.

Pour éviter cela, les passes intermédiaires doivent être réalisées avec un rayon du poinçon au moins égal à celui de la matrice (fig. 24) :

$$5e < R_p < 10e$$

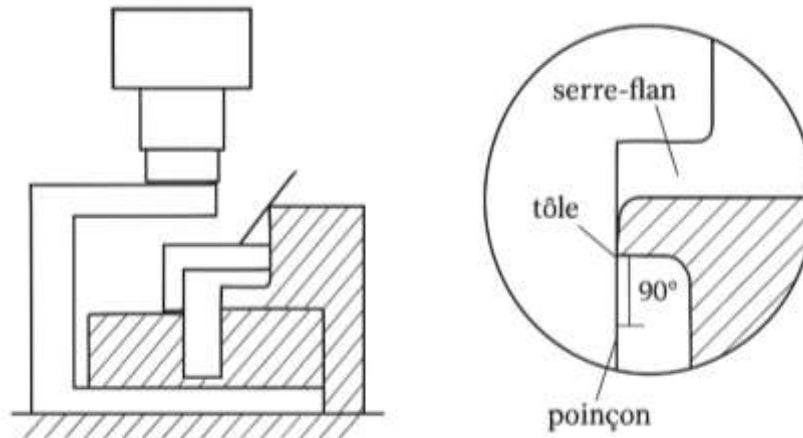


Figure 24 : Passes intermédiaires

Un **trou d'air** est prévu pour faciliter l'évacuation de la pièce emboutie (voir fig. 1.25).

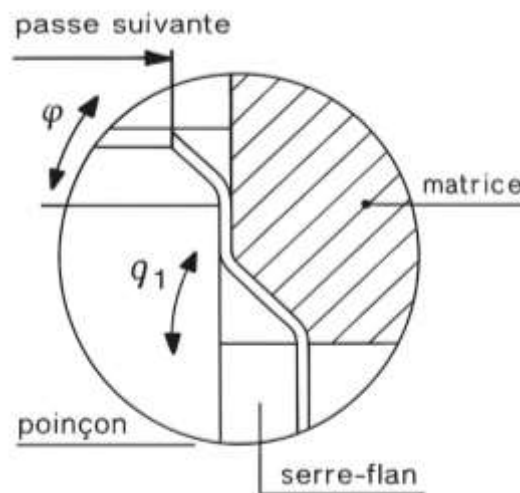


Figure 25 : l'évacuation de la pièce emboutie

I.3.3.7 – Effort d'emboutissage

L'effort maximal correspond à la charge de rupture par traction du métal sur la section de la matrice.

En pratique, on utilise la formule suivante :

$$F_e = \pi \cdot d \cdot e \cdot R_m \cdot K$$

Avec :

- d : diamètre du poinçon [mm]
- e : épaisseur de la tôle [mm]
- R_m : résistance à la traction de la tôle [daN/mm²]
- D : diamètre du flan [mm]
- K : coefficient dépendant du rapport d/D

Tableau 2 : l'évacuation de la pièce emboutie

| d/D | 0.55 | 0.60 | 0.65 | 0.70 | 0.75 | 0.80 |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| K | 1 | 0.86 | 0.72 | 0.6 | 0.5 | 0.4 |

Chapitre II:

Découpage

II.1. Principe

Le découpage repose sur l'action combinée de deux outils (poinçon et matrice, lame, molettes) exerçant une compression localisée par cisaillement sur la matière. Selon la géométrie des outils, le découpage peut être :

- Progressif : la forme est obtenue en plusieurs temps.
- Simultané : la découpe s'effectue en un seul coup suivant un contour fermé prédéfini.

Un des outils est fixé sur la table de la presse, tandis que l'autre est solidaire du coulisseau. À chaque course du coulisseau, un ou plusieurs découpages sont réalisés.

La matière utilisée se présente sous forme de :

- Bande de largeur constante (généralement 1 à 2 mètres de long), ou en bobine.
- Flan pour les pièces de grande dimension ou les opérations de finition (arasage ou détournage).

II.2. Définition du découpage

Le découpage est un cisaillement selon un contour fermé. L'outillage comprend un poinçon et une matrice ayant la forme exacte :

- Soit du tracé à poinçonner,
- Soit de la pièce finale à découper.

À la fin de l'opération, un divertisseur permet de dégager le poinçon de la tôle (voir fig 26).

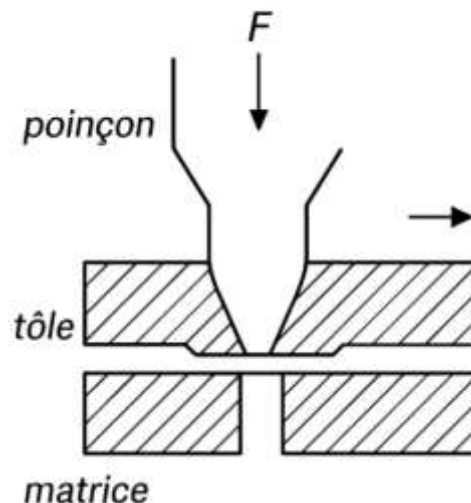


Figure 26 : Découpage [11]

Étapes du découpage :

1. La tôle est placée sur la matrice, le poinçon commence sa descente (fig27).
2. Sur le diagramme :
 - Axe vertical = Effort du poinçon

- Axe horizontal = Déplacement du poinçon
- 3. Dans un premier temps, la tôle se déforme élastiquement sans rupture → phase d'allongement.

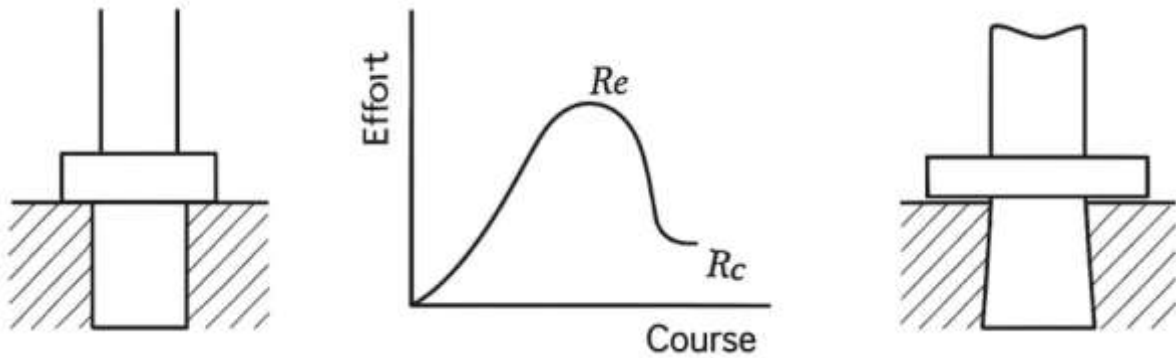


Figure 27 : Étapes du découpage

- 4. En poursuivant sa course :
 - Les fibres métalliques se tendent.
 - Un étranglement apparaît (fig. 27).
 - Des fissures se forment près des arêtes de coupe.
 - Ces fissures se rejoignent, la découpe est effective.
- 5. Enfin, le poinçon pousse la pièce dans la matrice (fig. 28).

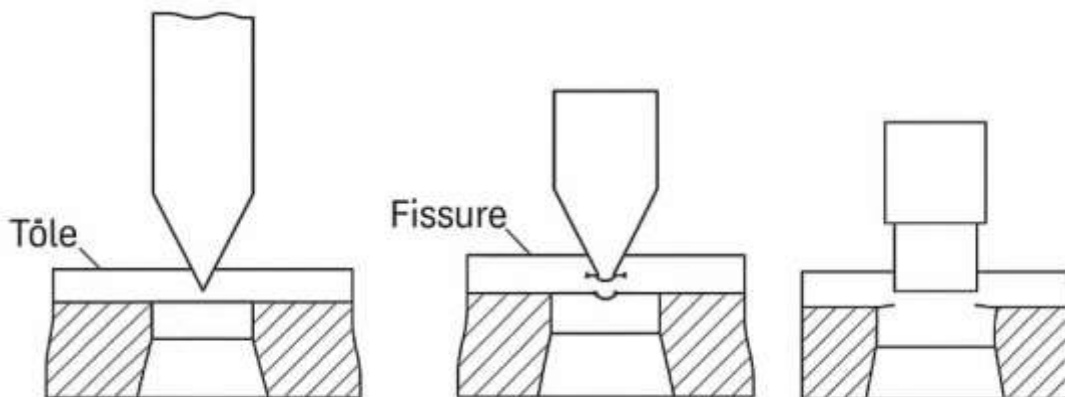


Figure 28 : Le Poinçon Pousse [12]

II.3. Jeu de découpage

Les fissures de découpage sont obliques. Pour garantir une coupure nette, il faut prévoir un jeu entre poinçon et matrice (fig. 29).

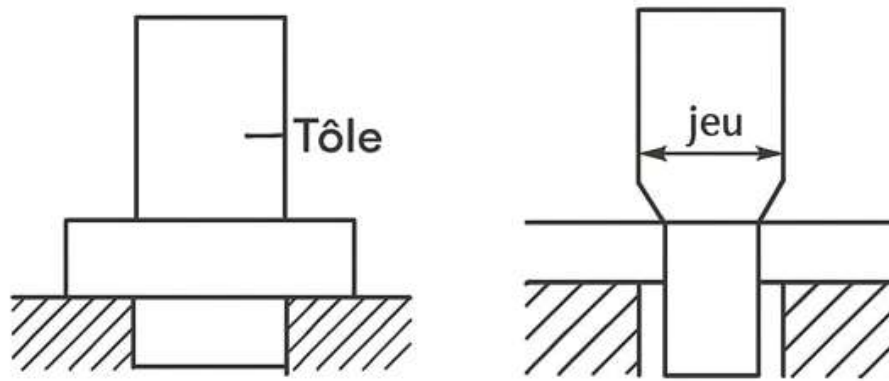


Figure 29 : Les Fissures de Découpage

- Ce jeu est pris sur le poinçon.
- Exemple :
 - Lors du découpage d'une rondelle → la matrice donne le diamètre extérieur.
 - Lors du découpage du trou → le poinçon définit le diamètre intérieur.

Valeurs du jeu diamétral total selon le matériau :

Tableau 3 : Les Fissures de Découpage

| Matériau découpé | Jeu diamétral total |
|--------------------|---------------------|
| Laiton, acier doux | $e / 20$ |
| Acier dur | $e / 15$ |
| Aluminium | $e / 10$ |

II.4. Les outils utilisés pour le découpage

Les outils de découpage doivent répondre à plusieurs exigences techniques :

- Séparer proprement la pièce du déchet.
- Guider et positionner correctement la bande métallique.
- Assurer une cadence élevée de production avec une bonne sécurité.
- Permettre le remplacement rapide des composants usés et leur affûtage.

Types d'outils de découpage :

II.4.1. Outils découverts

- Guidés uniquement par le coulisseau.
- Utilisés avec une presse en parfait état.
- Conviennent pour le poinçonnage ou l'ajourage sur tôle pleine.
- Les références sont extérieures à l'outil (ex. : table de presse).
- Le poinçon (fig. 30) n'adhère pas au déchet, ce qui facilite sa séparation.

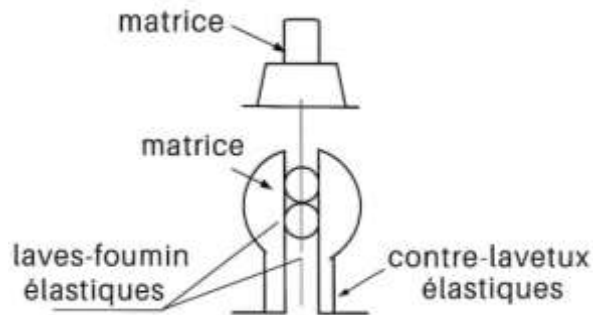


Figure 30 : Le poinçon

II.4.2. Outils à contre-plaque

A) À engrenement (fig 31)

- La contre-plaque guide le poinçon et détache la bande.
- Un engreneur contrôle l'avance (pas) de la bande.
- Limité à :
 - Épaisseur $e \geq 1$ mm,
 - Pièces ≤ 250 mm de côté,
 - Un seul poste de découpe.

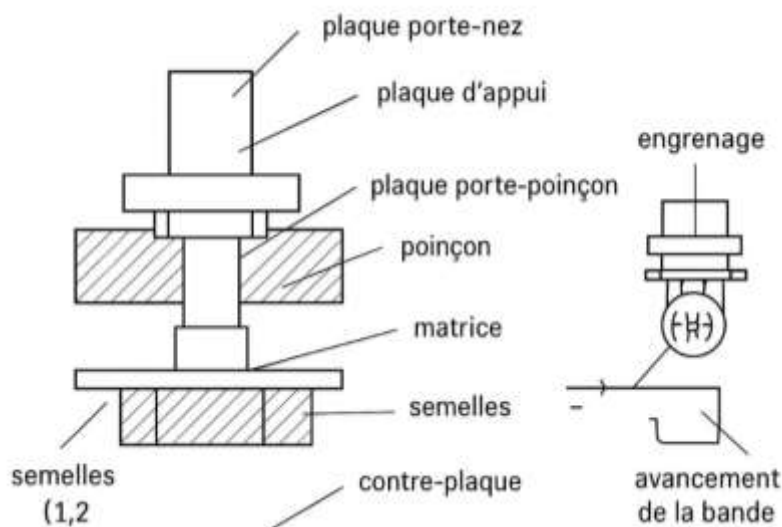


Figure 31 : Outils à contre-plaque

Description fonctionnelle

1. Semelles (1, 2) : créent un espace pour récupérer les pièces.
2. Matrice (3).
3. Guides (4, 5) : guident la bande dans un couloir.
4. Contre-plaque (6) : centre et guide le poinçon.
5. Poinçon (7) : section constante ; retenu par matage, tête, vis ou clavette.

6. Plaque porte-poinçon (8).
7. Plaque d'appui (9) : répartit l'effort et évite le marquage.
8. Plaque porte-nez (10).
9. Nez (11) : fixation sous le coulisseau.
10. Engrenage (12) : contrôle de l'avance. (Fig. 32) :

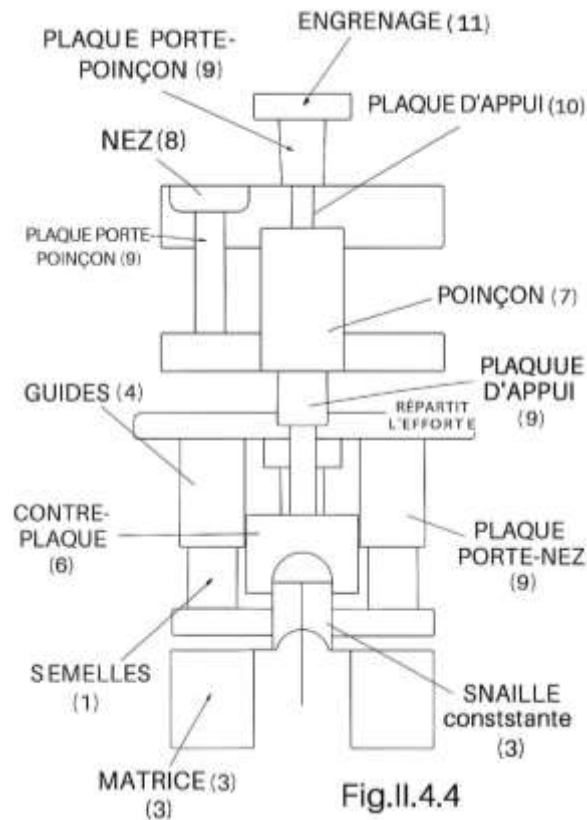


Figure 32 : Contrôle de L'avance

B) À couteau

- Sans engrenage, remplacé par un couteau latéral qui coupe la bande.
- Entre chaque coup de presse, la bande est poussée contre un guide.
- Pour pièces étroites et longues, on peut utiliser deux couteaux :
 - Sur le même plan ;
 - Un second couteau pour récupérer la dernière pièce.

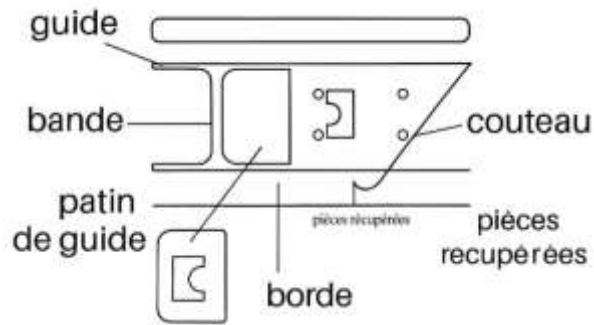


Figure 33 : À couteau

Conditions d'utilisation :

- Tôles $e \leq 2$ mm.
- Selon longueur L :
 - $2 < a \leq 3$ mm si $L \leq 80$
 - $a = 6$ si $L \leq 10$
 - $a = 8$ si $10 < L \leq 20$
 - $a = 10$ si $L > 20$

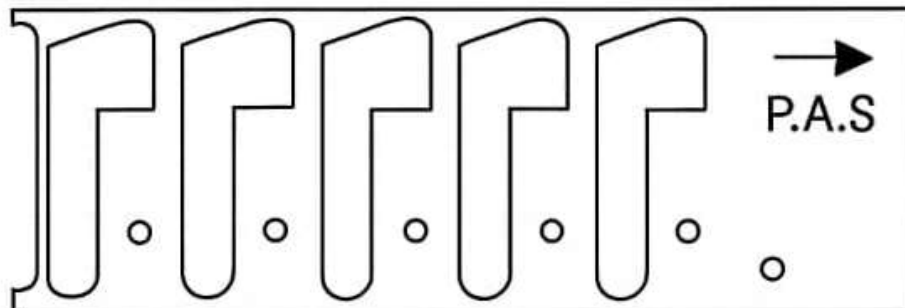


Figure 34 : Pièce à Récupérer

Des sections spéciales (fig. 34 et 35) sont adoptées pour éviter l'usure rapide du couteau et l'apparition de bavures.



Figure 35 : Les Sections Spéciales

C) À engrenement à suivre (fig. 36)

- Comporte plusieurs postes (ex. : poinçonnage + découpage).
- Engrenage peu précis mais parfois utilisé.
- Pilote indispensable pour corriger la position de la bande.

Fonctionnement :

- Exemple : trou cylindrique → découpe rectangulaire.
- Un pilote (3) placé sous le poinçon rectangulaire corrige l'avance.

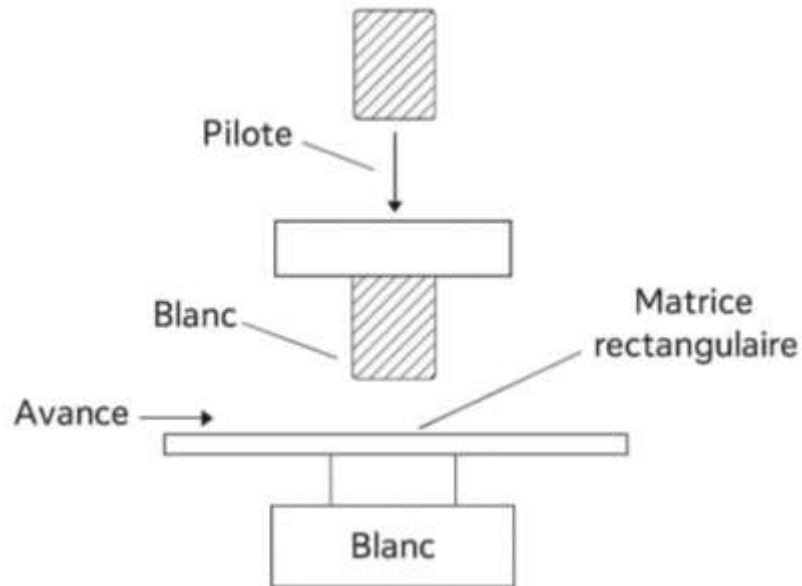


Figure 36 : Engrenement

- La butée de départ est positionnée selon la fig. 37 puis reculée.

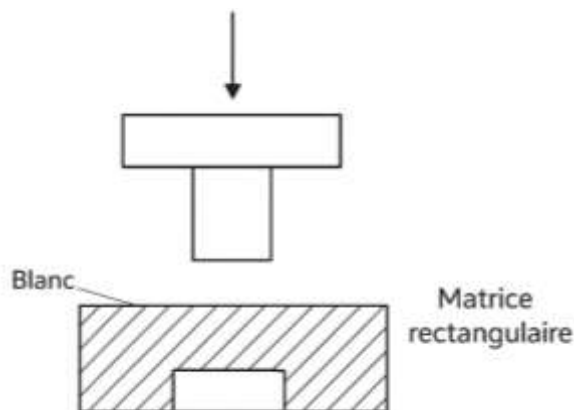


Figure 37 : Départ de la butée

- Le pilote réduit les erreurs dès le 3^e coup de presse (fig. 38).

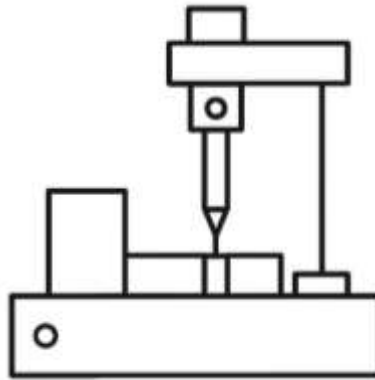


Figure 38 : le 3^e coup de presse

II.4.3. Outil à presse-bande (outil suisse)

Outil combiné découpage/poinçonnage (fig 39) :

- Pas de transfert : opérations simultanées.
- Colonnes à billes pour un guidage précis.
- Très haute précision (dépend de l'outillage).
- Aménage indépendant : ex. rouleaux (fig. 39).
- Spécifique pour les tôles minces (quelques dixièmes de mm).
- Maintien rigide de la tôle pendant le découpage.

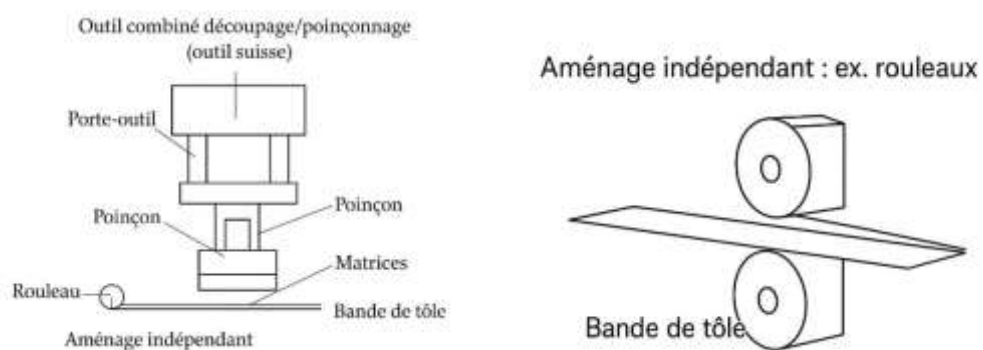


Figure 39 : Outil à presse-bande

II.4.4. Outil à pilotage

II.4.4.1. Description fonctionnelle

- Type presse-bande avec aménage automatique par la presse (rouleaux ou pinces).
- Pilotes remplacent engrenage ou couteaux (plus précis).
- 1^{er} poste : poinçonnage de trous non fonctionnels.
- Lors du retour du poinçon, la bande avance d'un pas.
- Les pilotes ogivaux (fig. 40) guident la bande.

- Le cycle se répète, avec précision acceptable (inférieure à celle d'un outil suisse mais suffisante).

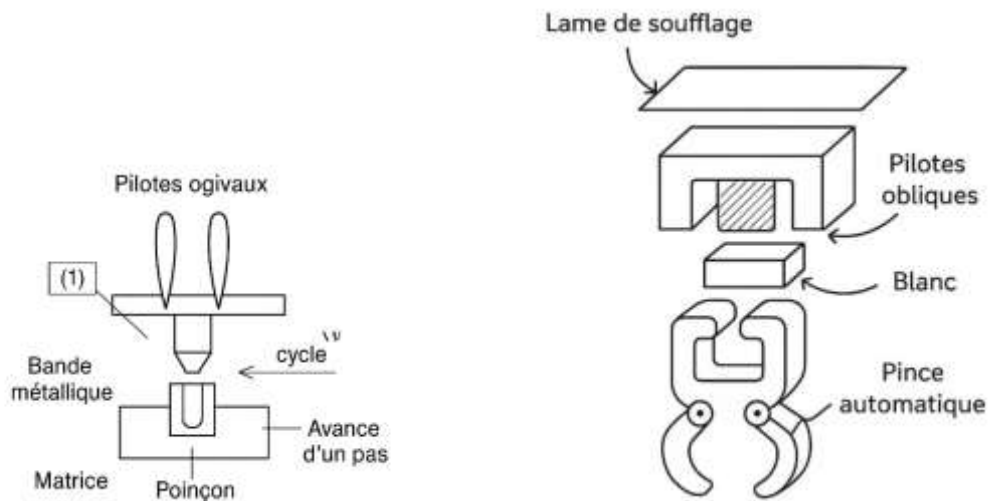


Figure 40 : Outil à pilotage

II.4.4.2. Pavés

Les outils à guidage sont généralement longs, ce qui complique l'usinage et le traitement thermique d'une matrice monobloc. C'est pourquoi on préfère assembler les matrices sans jeu dans une boîte monobloc entièrement rectifiée. (Voir figure 41).

Cette boîte se compose d'un bloc en forme de U et de deux barrettes. Chaque pavé est fixé par des vis au fond du U.

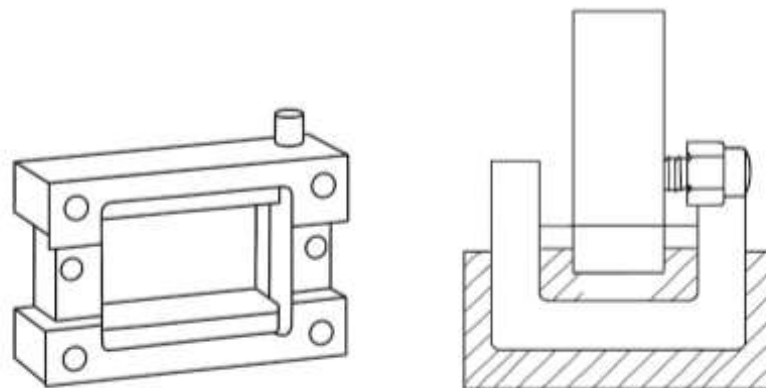


Figure 41 : Pavés

II.4.5. Outils de reprise**II.4.5.1. Poinçonnage et ajourage**

A. Outil de poinçonnage avec contre-plaque (fig 42) Composé de :

1. Matrice
2. Poinçon
3. Contre-plaque
4. Drageoir

Utilisé pour le poinçonnage de flans préalablement découpés. Le flan est positionné dans un drageoir, et cet outil est adapté aux flans d'épaisseur supérieure à 1 mm.

B. Outil de poinçonnage avec serre-flan (fig. 42) Composé de :

1. Matrice
2. Poinçons
3. Serre-flan
4. Drageoir
5. Bloc à colonnes

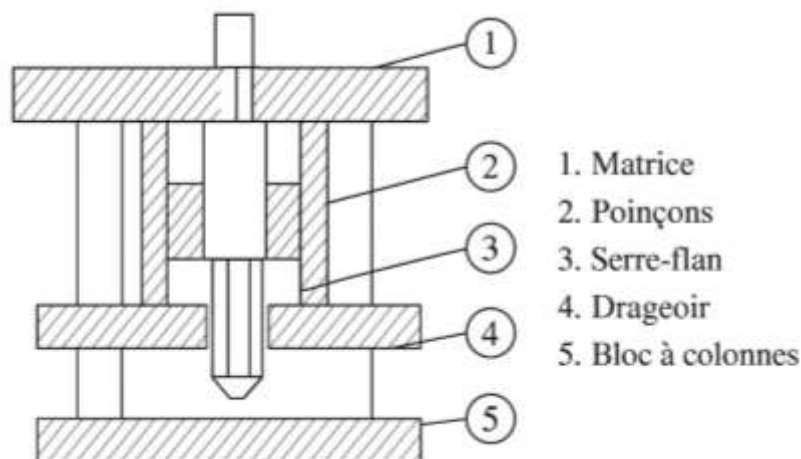


Figure 42 : Outil de poinçonnage avec serre-flan

A usage similaire à l'outil précédent, mais destiné aux flans minces (épaisseur généralement < 1 mm). Les colonnes de guidage assurent l'alignement précis entre poinçons et matrice.

II.4.5.2. Drageoir

Peut être constitué de :

- Un cadre (A) ;
- Des plaquettes de positionnement (B) ;
- Des goupilles de positionnement (C).

La pièce doit être positionnée de manière sûre. Il est déconseillé de s'appuyer uniquement sur trois côtés (fig. 43).

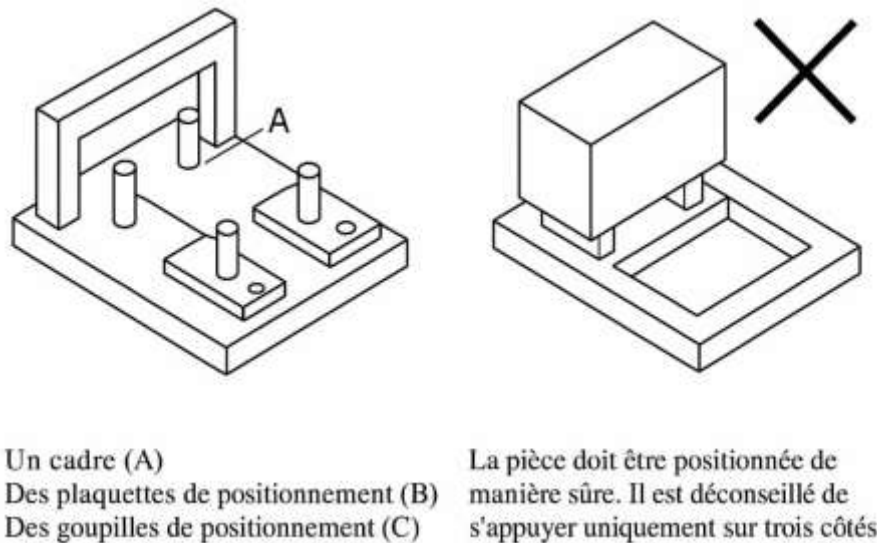


Figure 43 : Drageoir

II.4.5.3. Détrompeur

Indispensable pour les pièces asymétriques : un drageoir de forme spécifique ou une simple goupille évite toute erreur d'orientation du flan. (fig 44)

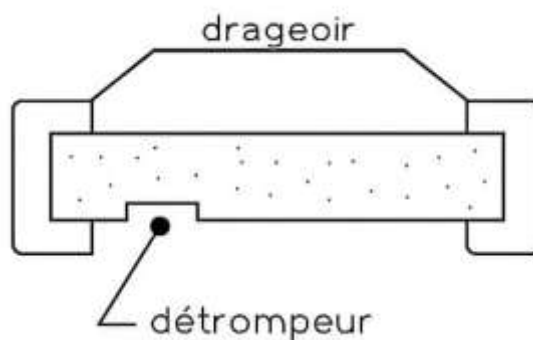


Figure 44 : Détrompeur

C. Outils de reprise à palette (fig. 45) : Composés de :

1. Matrice
2. Poinçons
3. Pilote
4. Tablier
5. Palette

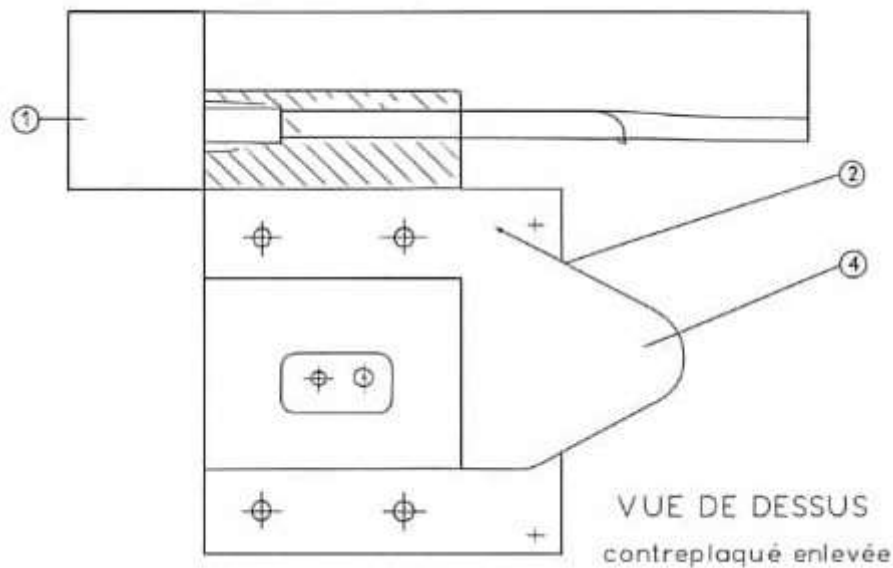


Figure 45 : Outils de reprise à palette

Utilisés pour le poinçonnage de petites pièces. La palette, amovible, sert de drageoir. La pièce est insérée dans son logement hors de l'outil, puis la palette est poussée en position de travail. Un pilote vérifie le bon positionnement. La pièce poinçonnée est évacuée en tirant la palette vers l'avant (fig. 46).

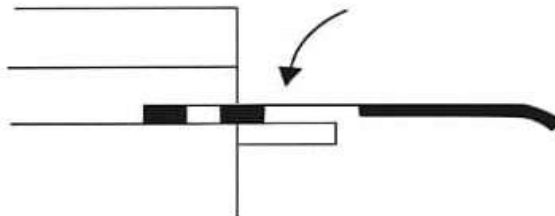


Figure 21 : La palette

II.4.6. Outil de coupe à longueur

II.4.6.1. Utilisation

Outils conçus pour le poinçonnage et la découpe à longueur de feuillard étroit, barres étirées ou laminées.

II.4.6.2. Outil de cisailage sans perte

Composé de : (fig. II.4.27)

1. Matrice ;
2. Poinçons d'ajourage ;
3. Poinçon de cisailage ;
4. Contre-plaque ;
5. Butée ;

6. Ressort d'appui.

Adapté pour les pièces à extrémités droites (fig. 47).

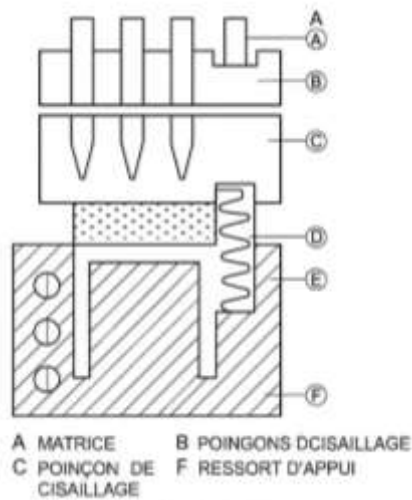


Figure 47 : Outil de cisailage sans perte

II.4.6.3. Outil de coupe à longueur avec perte

Composé de : (fig. 48)

1. Matrice
2. Poinçons d'ajourage
3. Poinçon de séparation
4. Contre-plaque
5. Butée
6. Ressort d'appui

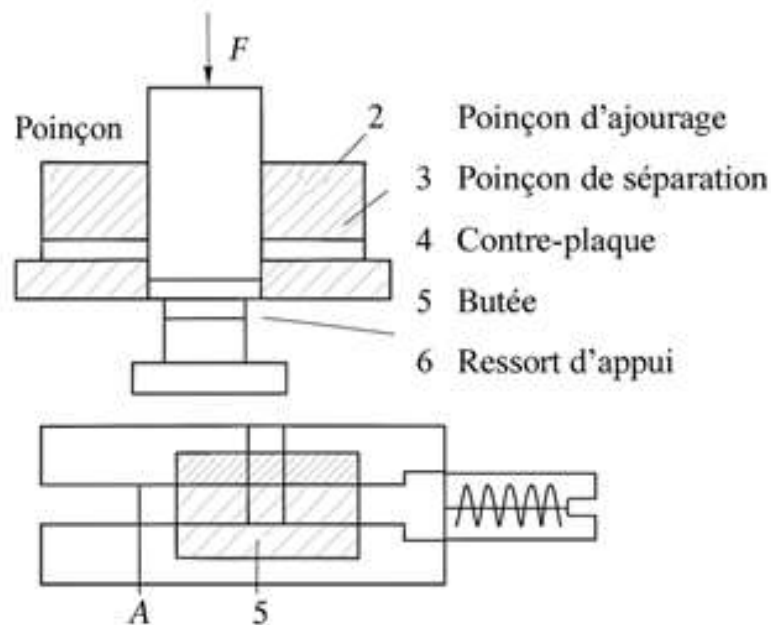


Figure 23 : Outil de coupe à longueur avec perte

Destiné aux pièces à extrémités demi-circulaires. Le poinçon est profilé pour éviter les défauts (fig. 49) sur des bandes trop larges.

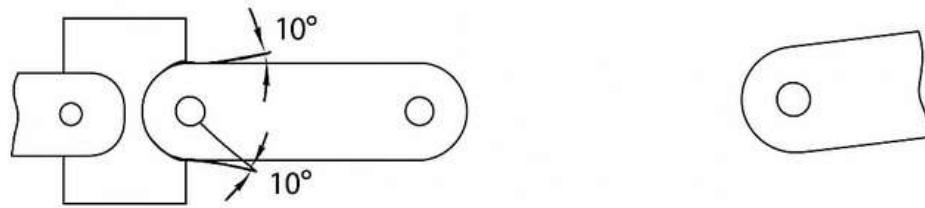


Figure 49 : Pièces à Extrémités

Butée réglable (fig. 50) : permet d'obtenir différentes longueurs de pièces. En cas de multiples ajourages, deux conceptions d'outils sont possibles.

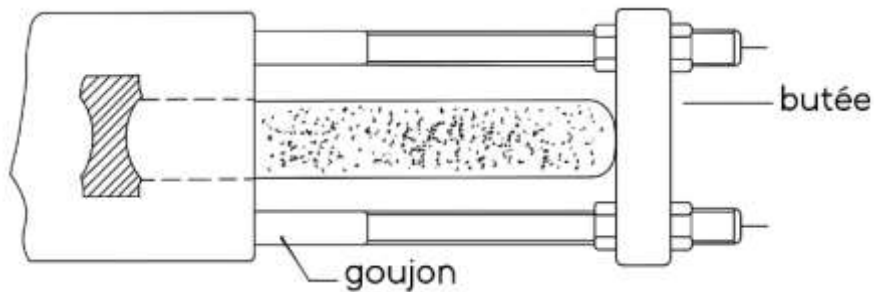


Figure 50 : Butée réglable

Le centrage est assuré par deux pressions en V. Le ressort d'appui est supprimé dans les figures 49 et 50.

II.4.7. Outil de crevage

Permet de découper et cambrer simultanément une patte en pleine tôle (fig. 51 et 52). Le poinçon et la matrice cisailent trois côtés, tandis que le quatrième est arrondi (cambrage).



Figure 51 : Outil de Crevage

Les ouïes (fig. 52) sont également cisailées et formées. Une seule arête est coupante, la forme finale est obtenue par allongement de la tôle.

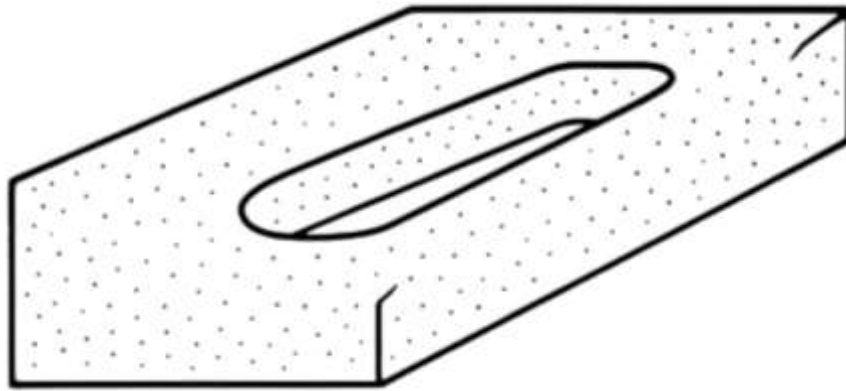


Figure 52 : Outil de crevage

II.4.8. Outil d'encochage

Effectue une découpe sur trois côtés. Pour compenser l'effet de chasse du poinçon, il est nécessaire de prévoir :

- Une plaque de réaction sur la matrice (fig 53).
- Un talon sur le poinçon.

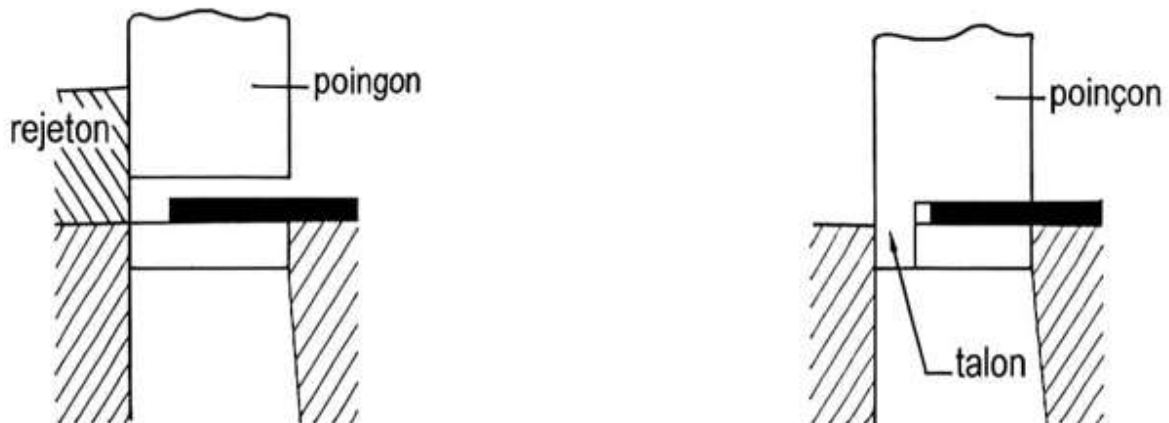


Figure 53 : Outil d'encochage

II.4.9. Outil de découpe à la retourne

Lors du processus de mise en bande à la retourne (fig. 54), l'outil doit assurer un positionnement précis de la bande au début de chaque passage (avant et après retournement).

- **1^{er} passage** : la première pièce découpée correspond à la seconde pièce de la bande. La bande est mise en butée sur l'engrenage.

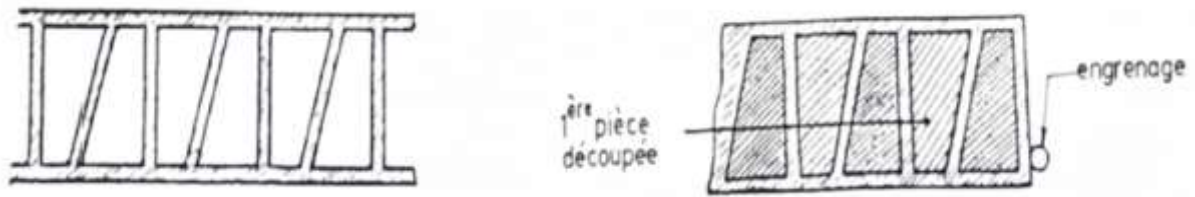


Figure 54 : 1er passage

- **2^{ème} passage (après retournement)** : la mise en position se fait via une butée escamotable (fig. 55), avec l'engrenage utilisé normalement.

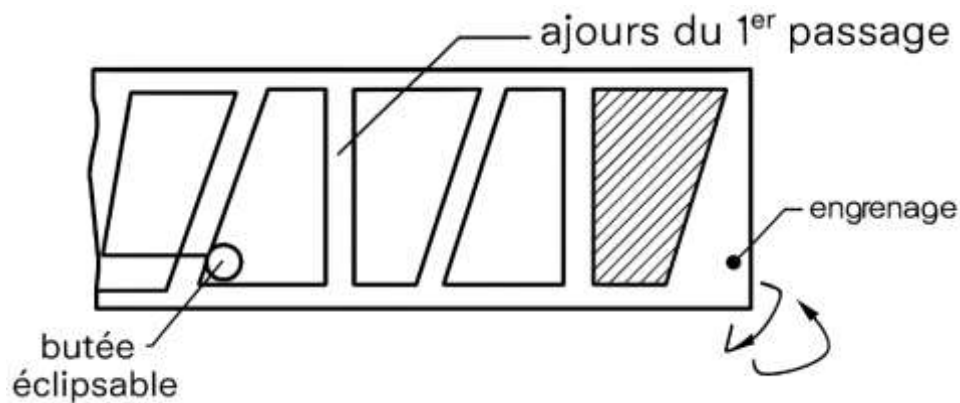


Figure 55 : 2ème passage (après retournement) [13]

II.5. Effort de découpe

II.5.1. Définition

L'effort de découpe **F** nécessaire pour séparer une pièce (voir figure 56) est déterminé par la formule suivante :

$$F = p \times e \times R_c$$

où :

- **F** : effort de découpe (daN)
- **p** : périmètre de la pièce (mm)
- **e** : épaisseur de la tôle (mm)
- **R_c** : résistance au cisaillement du matériau (daN/mm²)

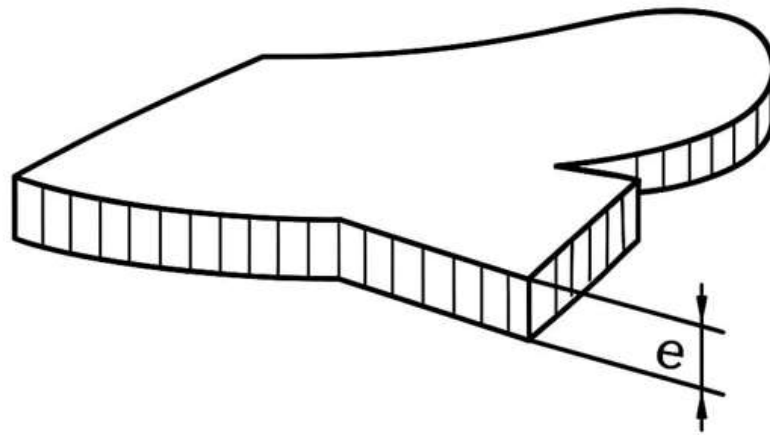


Figure 56 : Effort de découpe

Le choix de la presse dépend directement de l'effort à fournir. En l'absence de données précises sur R_c , on peut l'estimer à **0,8 fois la résistance à la traction (R_m)**, bien que cela reste approximatif.

Tableau 4 : La Résistance à la Traction

| Métal | R_c (daN/mm ²) |
|---------------------|------------------------------|
| Aluminium | 10 |
| Cuivre recuit | 20 |
| Laiton recuit | 30 |
| Duralumin | 30 |
| Tôle d'emboutissage | 35 |
| Acier doux | 40 |
| Acier demi-dur | 50 |
| Tôle au silicium | 50 |
| Acier inoxydable | 55 |
| Acier dur | 70 |

II.5.2. Effort d'extraction

Il s'agit de l'effort requis pour retirer le poinçon après découpe. Il représente entre **2 % et 7 %** de l'effort de découpe selon la configuration :

- 7 % pour un poinçonnage en pleine tôle (voir figure 57)
- 2 % pour des chutes minimales.

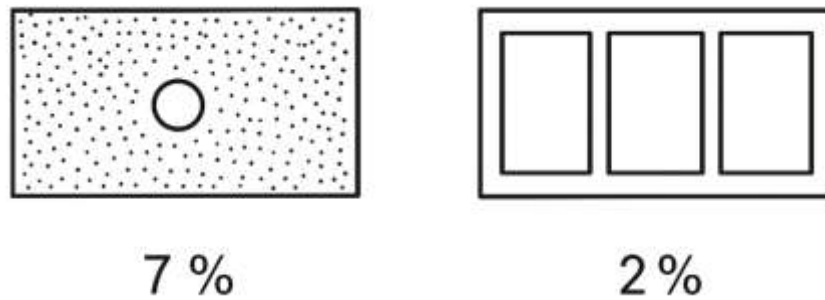


Figure 57 : Le Poinçon Après Découpe

Remarque – Découpage fin

Les outils doivent générer trois efforts distincts :

- Sur la plaque de pression : $F1 = 0,4 \times P \times e \times Rm$
 - Sur la contre-presse : $F2 = 0,2 \times P \times e \times Rm$
- avec :
- P : périmètre (mm)
 - e : épaisseur (mm)
 - Rm : résistance à la rupture (N/mm²)

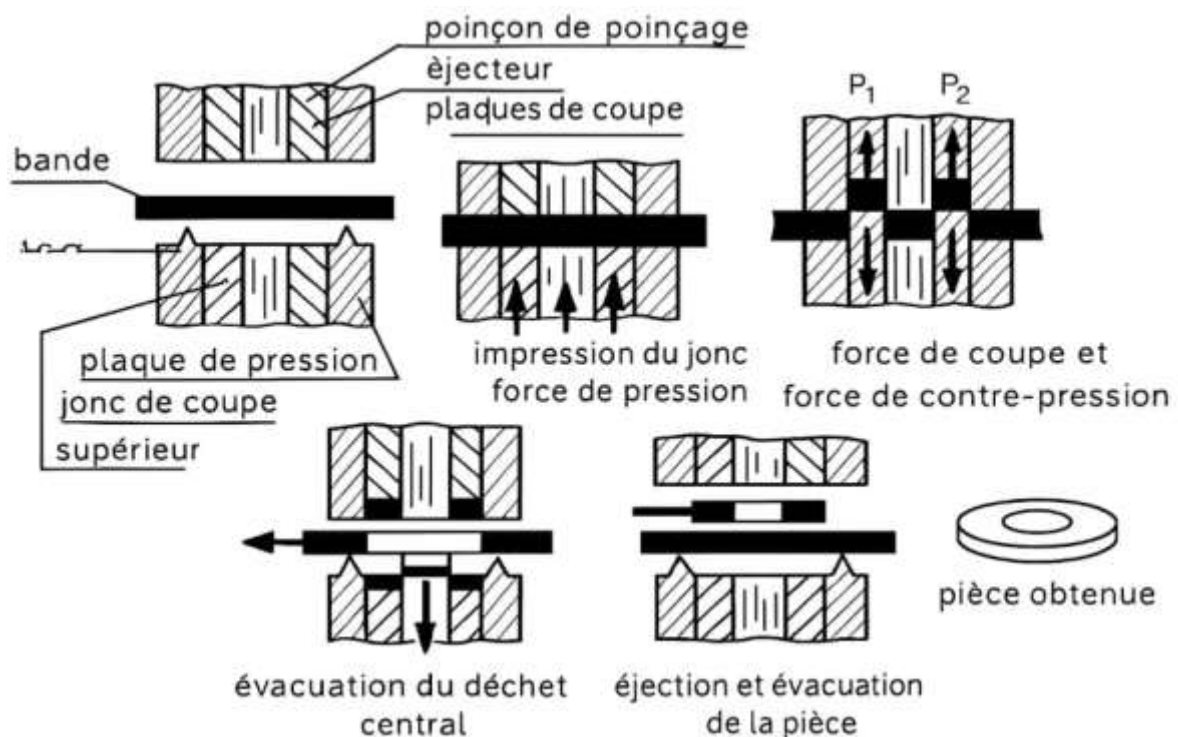


Figure 58 : Découpage fin

II.5.3. Pénétration du poinçon

Elle doit être très faible voire nulle, car les pièces sont évacuées par empilement (figure 58). Une grande pénétration peut endommager l'outil en cas de mauvais centrage.

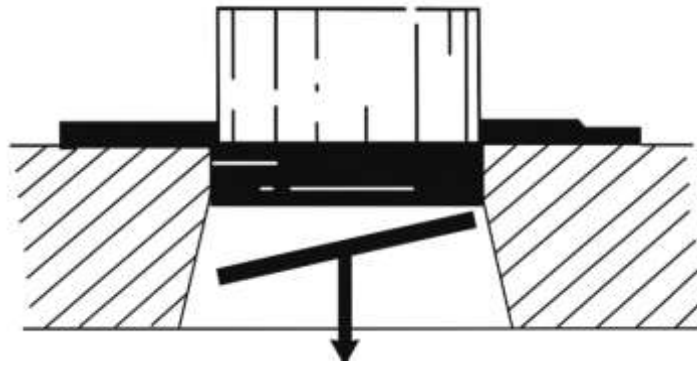


Figure 59 : Pénétration du Poinçon

II.5.4. Affûtage

Après usage prolongé (50 000 à 200 000 pièces), les arêtes s'usent et nécessitent affûtage (figure 60).

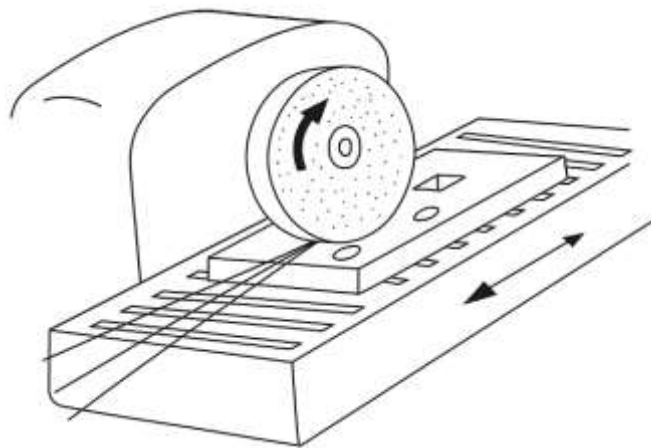


Figure 60 : Affûtage

II.5.5. Dépouille

A. Poinçon : Pas de dépouille, section constante pour préserver les dimensions après affûtage.

B. Matrice :

- Une dépouille de **5 %** ($\sim 3^\circ$) est prévue après une section cylindrique de 4–5 mm pour faciliter l'évacuation (figure 61).
- Une légère surépaisseur du diamètre d'évacuation empêche le blocage des chutes.

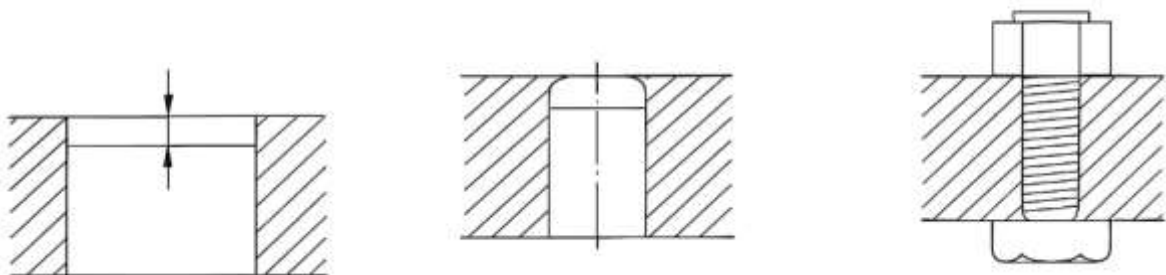


Figure 61 : Dépouille

II.6. Mise en bande

II.6.1. Définition

La mise en bande vise à disposer les pièces dans la bande pour minimiser les déchets.

II.6.2. Mise en bande simple

En général, les pièces sont espacées de l'épaisseur e (figure 62). Pour les métaux fins, on garde une largeur de déchet minimale de **2 mm**.

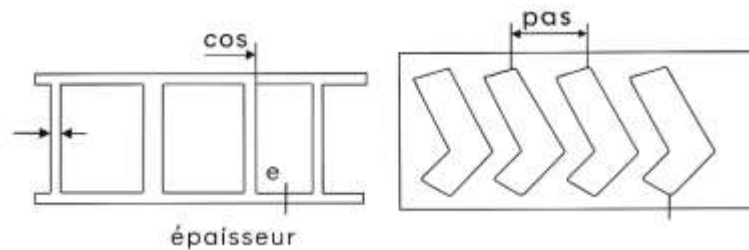


Figure 62 : Mise en bande simple

Pour les **pièces circulaires** :

- Disposition classique → beaucoup de déchets (figure 63).
- Solution tangente → réduction du déchet.

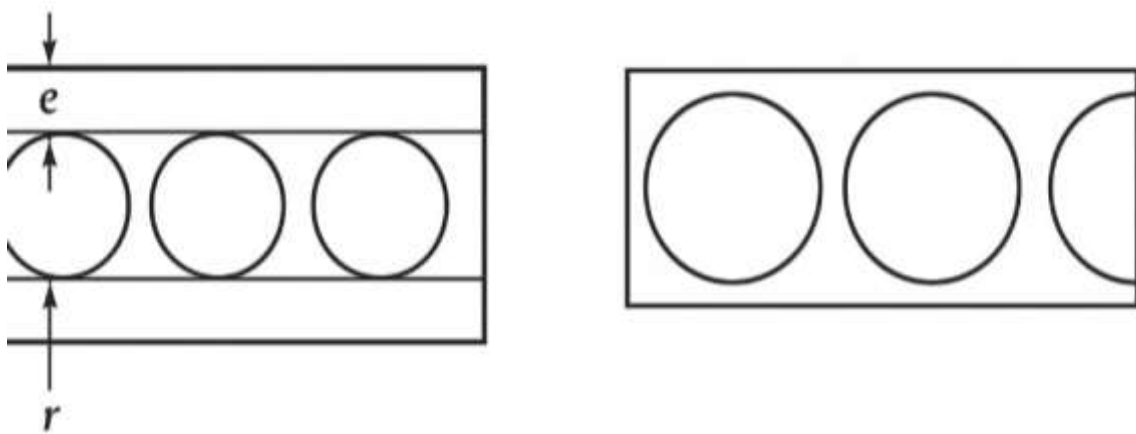


Figure 63 : Pièces Circulaires

- Disposition à éviter : risque de pièces incomplètes et danger pour l'opérateur (figure 63)
- Découpage en quinconce : économique mais limité aux petits diamètres et grandes séries.

II.6.3. Mise en bande à la retourne

Pour des formes comme le T, l'inversion des pièces réduit les pertes (figure 64).

- Découpe première série → retournement → deuxième série.

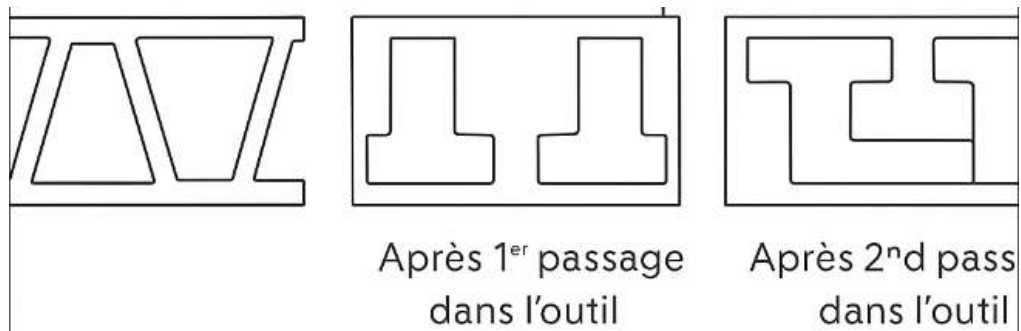


Figure 64 : Mise en bande à la retourne

- La bande se déforme comme une lame de sabre (figure 65).
- Ce procédé est pertinent si le gain en matière dépasse 20 %

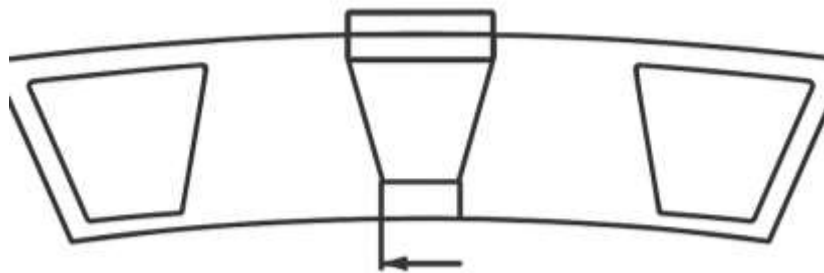


Figure 65 : déforme de la bande

Outil à plusieurs poinçons : Utilisé en grande série pour découper plusieurs pièces en un seul passage (figure 66).

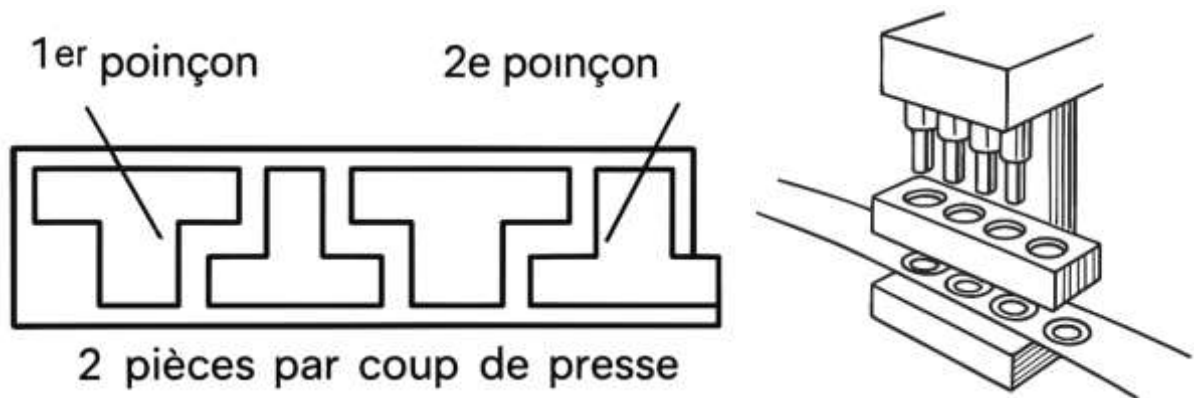


Figure 66 : Outil à plusieurs poinçons

Cisaillage des bandes :

- Feuilles de 2m x 1m → découpées en bandes selon le type d'alimentation :
 - 1m pour alimentation manuelle
 - 2m pour alimentation automatique
- Le sens de laminage correspond à la longueur (figure 67)
- Les bandes peuvent aussi être fournies en rouleaux, leur longueur dépend de l'épaisseur du métal.

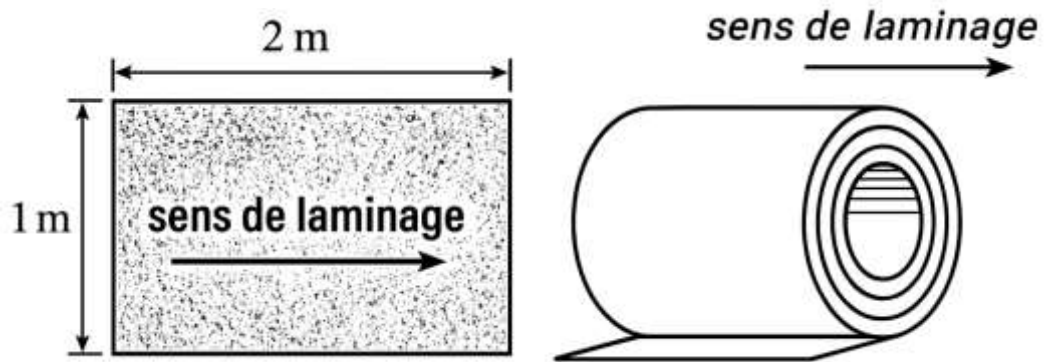


Figure 67 : Cisailage des bandes

II.7. Coefficient d'utilisation

Pour limiter les déchets, on utilise le **coefficient d'utilisation** :

$$\eta_u = (S_p / S_b) \times 100 \%$$

- **S_p** : surface utile (pièce découpée)
- **S_b** : surface de la bande
- Un bon rendement suppose $\eta_u \geq 65 \%$

Cela impose :

- Un espacement **a = 1 à 2e**
- Un pas minimal
- Une disposition des pièces facilitant la fabrication de la matrice (voir figures 68)

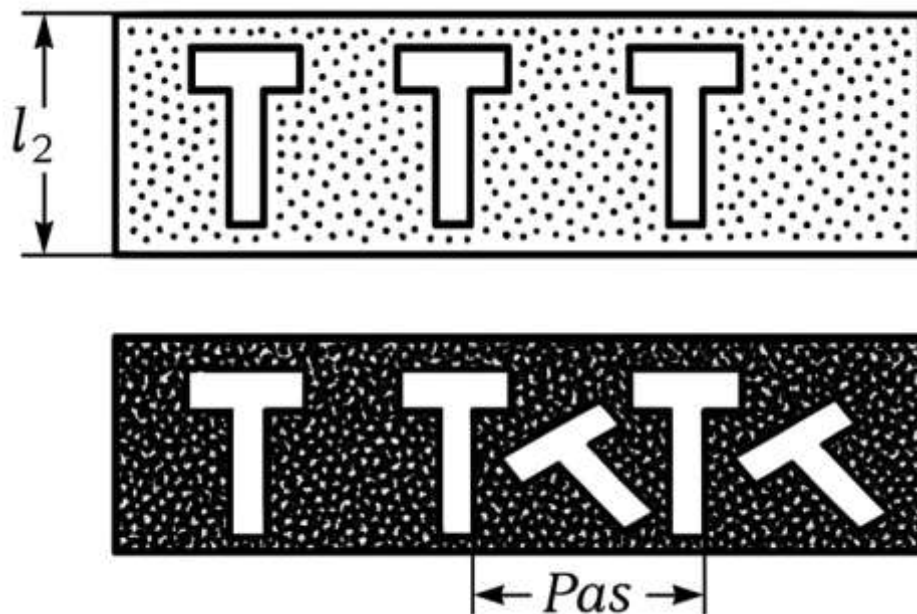


Figure 68 : Coefficient D'utilisation

II.8. Découpage des pièces circulaires

II.8.1. Définition

Le découpage d'une pièce circulaire correspond à une opération de cisailage effectuée sur un contour fermé (voir figure 69). La figure illustre la similitude entre le diagramme de découpage d'un flan en acier doux et celui de la rupture par traction sur ce même matériau, mettant en évidence la parenté des deux phénomènes.

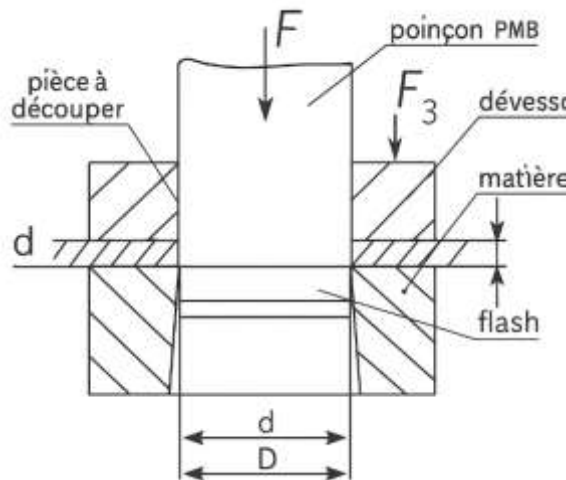


Figure 69 : Opération de Cisailage

II.8.2. Jeu de découpage

Un jeu doit être prévu entre le poinçon et la matrice (figure 70). Ce jeu est appliqué **sur le poinçon**, car c'est lui qui détermine le diamètre extérieur de la pièce à découper.

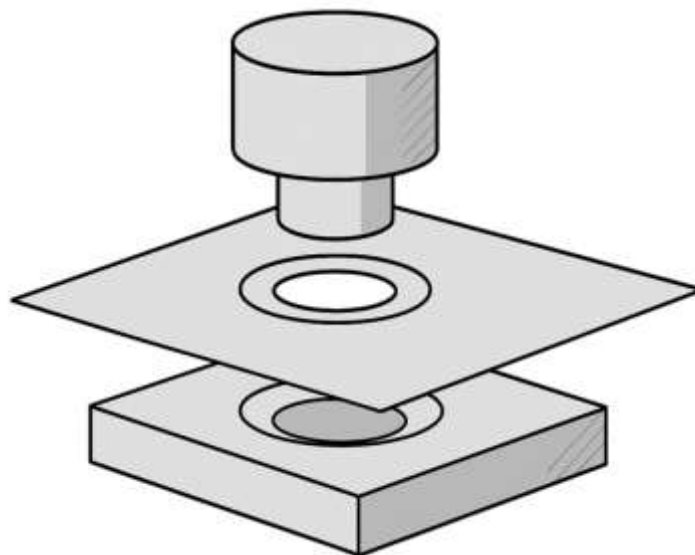


Figure 70 : Jeu de découpage [14]

II.8.3. Effort de découpage

L'effort requis pour découper une pièce circulaire suit la même formule que pour le découpage général (voir figure 71) :

$$F = \pi \times D \times e \times R_c$$

où :

- **F** : effort de découpe (daN)
- **D** : diamètre de la pièce (mm)
- **e** : épaisseur de la tôle (mm)
- **R_c** : résistance au cisaillement du métal (daN/mm²)
- **P** : périmètre = $\pi \times D$

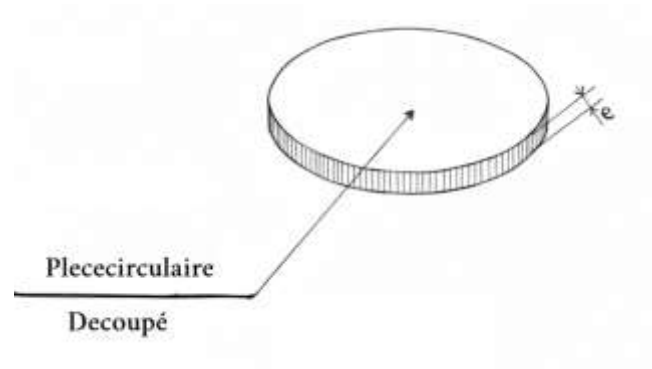


Figure 71 : Effort de Découpage

II.8.4. Effort d'extraction [15]

Il s'agit de la force nécessaire pour extraire le poinçon après découpe. Cet effort représente entre 2 % et 7 % de l'effort de découpe total **F** :

- 7 % si le poinçonnage est réalisé sur une tôle pleine.
- 2 % si la chute est minime (figure 72).

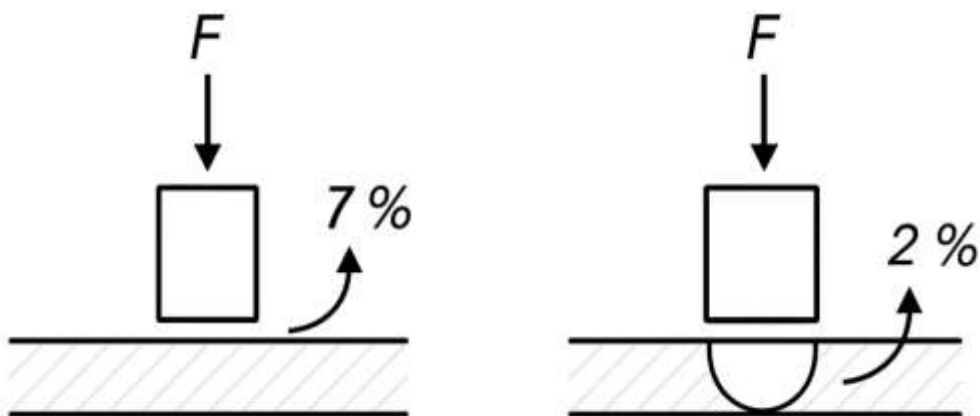


Figure 72 : Poinçon Après Découpe

II.8.5. Organisation des découpes

Il est essentiel d'optimiser la disposition des pièces sur la bande pour minimiser les pertes de matière.

$$\eta_{ht} = \left(\frac{S_p}{S_b} \right) \times 100\% \geq 65\%$$

Exemple :

Soit une bande de **90 mm × 36 mm**, soit une surface totale :

$$S_b = L \times l = 90 \times 36 = 3240 \text{ mm}^2$$

On découpe **3 pièces circulaires** de **D = 25 mm**, donc :

$$S_p = 3 \times \pi \times D^2 / 4 = 3 \times \pi \times 25^2 / 4 \approx 1472,62 \text{ mm}^2$$

Le **coefficient d'utilisation** est :

$$\eta_u = (S_p / S_b) \times 100 \% = (1472,62 / 3240) \times 100 \% \approx 45,45 \%$$

→ Résultat inférieur à 65 %, indiquant un **taux de déchet élevé**.

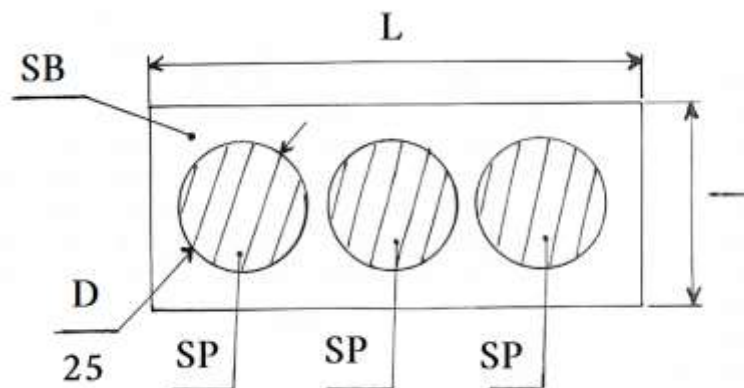


Figure 73 : Organisation des découpes

II.8.6. Outillage

Plusieurs types d'outils peuvent être utilisés pour obtenir des pièces circulaires, notamment :

- **L'outil découvert.**
- **L'outil à contre-plaque à engrenage.**

L'analyse détaillée de ces outils est abordée dans le chapitre précédent

Chapitre III:

Organisation des découpes

III.1. Introduction

Dans cette partie, l'étude est basée sur un **outil à contre-plaque**. Une fois les pièces positionnées sur la bande, il est essentiel de bien répartir les poinçons sur la matrice sans en compromettre la solidité. À cet effet, plusieurs précautions sont à respecter :

- **Assurer une distance suffisante entre les ajours** afin d'éviter tout affaiblissement local de la plaque (voir figure 74).
- **Simplifier les formes des ajours** pour faciliter l'usinage, respecter les jeux fonctionnels, garantir la précision, et éviter les parties en porte-à-faux (voir repère « Co» sur la figure 74).
- **Éviter les angles vifs ou rentrants**, car ils accélèrent l'usure au niveau des amorces de rupture.
- Pour les **matrices longues**, il est recommandé d'utiliser une **méthode de morcellement en pavés imbriqués** afin de prévenir les déplacements indésirables.

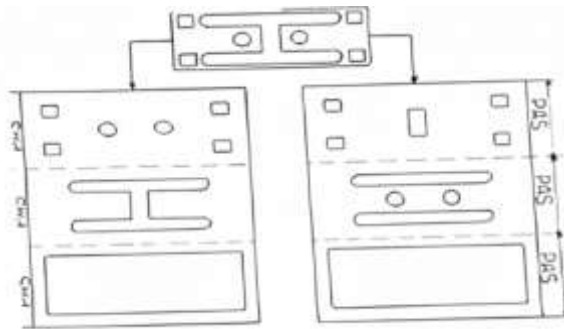


Figure 74 : Matrices Longue

Remarque : Une succession de découpes simples peut permettre d'obtenir une forme d'ajourage complexe, bien que la précision en soit généralement moyenne.

III.2. Positionnement de l'outil sur la presse

Le positionnement précis des poinçons sur la matrice est indispensable pour obtenir la pièce représentée à la figure 75 La position du **nez de fixation** (partie supérieure de l'outil sous le coulisseau) dépend du **barycentre des efforts de découpage**.

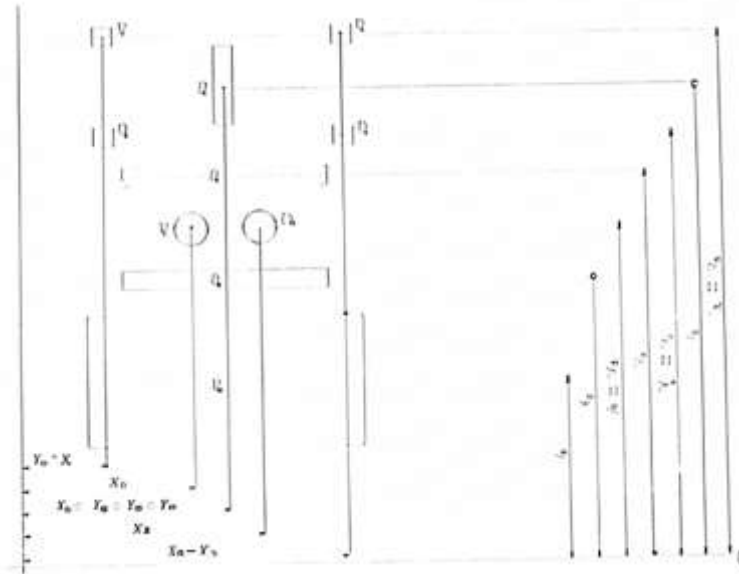


Figure 75 : Méthode analytique

Pour déterminer ce point, deux méthodes sont disponibles :

A – Méthode analytique : Les coordonnées du nez de fixation (**Xg, Yg**) sont calculées à partir des périmètres et centres de gravité des différentes zones découpées. Formules :

$$Xg = \frac{\sum(Pi \times Xi)}{\sum Pi}$$

$$Yg = \frac{\sum(Pi \times Yi)}{\sum Pi}$$

Avec :

- **Pi** : périmètre de chaque forme découpée
- **Xi, Yi** : coordonnées du centre de gravité de chaque forme

On peut organiser ces données dans un tableau :

Tableau 5 : Méthode analytique [15]

| Côtés | Périmètre (Pi) | Xi | Yi | PiXi | PiYi |
|-------|----------------|----|----|------|------|
| 1 | P1 | X1 | Y1 | P1X1 | P1Y1 |
| 2 | P2 | X2 | Y2 | P2X2 | P2Y2 |
| 3 | P3 | X3 | Y3 | P3X3 | P3Y3 |
| 4 | P4 | X4 | Y4 | P4X4 | P4Y4 |
| 5 | P5 | X5 | Y5 | P5X5 | P5Y5 |

| | | | | | |
|----|-----|-----|-----|--------|--------|
| 6 | P6 | X6 | Y6 | P6X6 | P6Y6 |
| 7 | P7 | X7 | Y7 | P7X7 | P7Y7 |
| 8 | P8 | X8 | Y8 | P8X8 | P8Y8 |
| 9 | P9 | X9 | Y9 | P9X9 | P9Y9 |
| 10 | P10 | X10 | Y10 | P10X10 | P10Y10 |

Avec :

Xg : coordonnée de la position du nez de fixation sur l'axe « OX »

Yg : coordonnée de la position du nez de fixation sur l'axe « OY »

Xi : coordonnée sur l'axe « OX » du centre de gravité pour chaque partie qui constituent la pièce usinée ou découpée .

Yi : coordonnée sur l'axe « OY » du centre de gravité pour chaque partie qui constituent la pièce usinée ou découpée .

Pi : périmètre de chaque partie.

Yi : coordonnée sur l'axe « OY » du centre de gravité pour chaque partie qui constituent la pièce usinée ou découpée Pi : Les périmètres de chaque partie de la pièce.

B – Méthode graphique : La détermination de la position du **centre de poussée** peut également se faire de manière graphique. Cette méthode repose sur la **construction dynamique du polygone des périmètres** et de sa **résultante funiculaire**. Elle permet une **vérification visuelle** de la position du centre d'application des efforts de découpage.

Voir illustration correspondante à la figure 76.

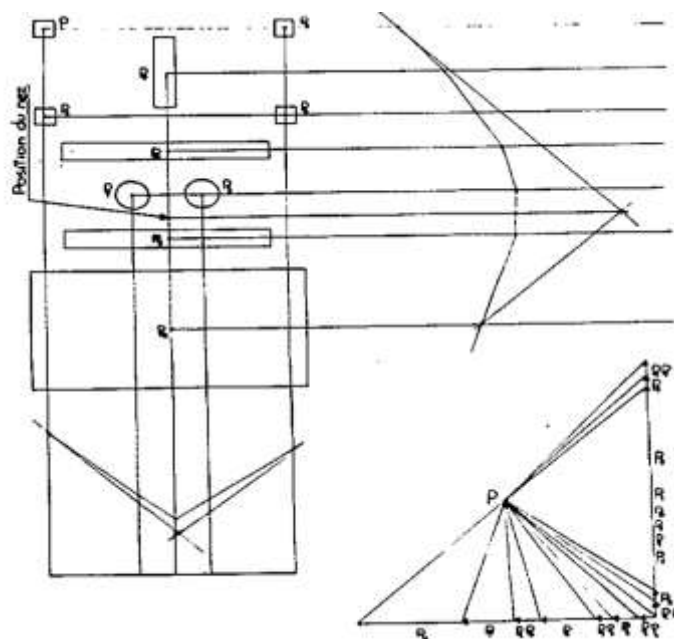


Figure 76 : Méthode graphique [17]

III.3. Le programme

Un programme a été développé en **langage C** afin de :

- **Calculer les coordonnées du centre de poussée** pour un outil de découpage,
- **Et estimer l'effort de découpe requis.**

Fonctionnement du programme :

- La saisie des dimensions de la forme à découper se fait **élément par élément** :
 - **Pour les lignes** : saisie des **coordonnées des extrémités**.
 - **Pour les arcs** : saisie des **angles de début et de fin**, des **coordonnées du centre**, ainsi que du **rayon** de l'arc.

Calcul de la force de découpe :

Pour effectuer ce calcul, l'utilisateur doit renseigner :

- **L'épaisseur de la tôle** (en mm),
- La **résistance à la rupture par traction** du matériau (exprimée en N/mm²).

Chapitre IV : _____

***Maintenance des outils et
presses de découpage***

IV.1 Introduction

L'introduction pose le décor en soulignant l'importance cruciale de la maintenance industrielle pour garantir la performance et la longévité des presses et des outils de découpage. Il ne s'agit pas seulement de réparer les choses quand elles cassent, mais d'un processus stratégique qui a un impact direct sur la rentabilité et l'efficacité globale d'une entreprise.

- **Pensez à votre voiture :** vous n'attendez pas que le moteur lâche pour faire une vidange. Une maintenance proactive permet à votre véhicule de rouler en douceur et de prolonger sa durée de vie.
- **Réduction des arrêts imprévus :** Lorsqu'une presse ou un outil tombe en panne de manière inattendue, la production s'arrête. Ce temps d'arrêt coûte cher, entraînant des retards dans les livraisons et des pertes de revenus. Un programme de maintenance bien structuré, axé sur les méthodes préventives et prédictives, permet d'éviter ces arrêts soudains et coûteux. L'objectif est de passer d'une mentalité réactive ("je répare quand ça casse") à une approche proactive ("j'empêche que ça ne casse").
- **Amélioration de la qualité des pièces :** Des outils usés produisent des pièces de mauvaise qualité. Par exemple, un poinçon et une matrice émoussés créeront des bavures sur la pièce découpée, nécessitant des opérations de finition coûteuses ou augmentant le nombre de pièces à rebuter. Une maintenance régulière, comme l'affûtage des outils et la vérification des alignements, garantit que chaque pièce produite répond aux spécifications requises dès le premier coup de presse. Il s'agit d'un lien direct entre la qualité de la maintenance et la qualité du produit fini.
- **Diminution des coûts :** Cela peut sembler paradoxal, car la maintenance a un coût. Cependant, les coûts associés aux réparations imprévues, à la perte de production et au remplacement prématuré d'outils coûteux sont bien supérieurs aux coûts d'un programme de maintenance planifié. La maintenance préventive prolonge la durée de vie des outils et des machines, réduisant ainsi la fréquence des remplacements onéreux. Par exemple, un affûtage à 500 € peut éviter d'avoir à remplacer un outil à 10 000 €.
- **Renforcement de la sécurité :** Une presse bien entretenue est une presse plus sûre. Des systèmes électriques défectueux, des fuites hydrauliques ou des composants mal alignés peuvent engendrer des situations dangereuses pour les opérateurs. Des inspections régulières et le respect des plannings de maintenance garantissent que tous les dispositifs de sécurité fonctionnent correctement, protégeant le personnel et réduisant les risques d'accidents.

En résumé, une stratégie de maintenance solide transforme la maintenance d'un "mal nécessaire" en un véritable facteur de compétitivité. Elle garantit la fiabilité des équipements, la constance de la production et la maîtrise des coûts, des éléments vitaux pour réussir dans l'industrie moderne.

IV.2. Types de maintenance appliqués

Le choix d'une stratégie de maintenance est fondamental pour optimiser la productivité et la rentabilité. Il existe plusieurs approches, souvent complémentaires, qui s'appliquent spécifiquement aux outils et presses de découpage.

IV.2.1. Maintenance corrective

Également appelée maintenance curative, cette approche consiste à intervenir uniquement après la défaillance ou la panne d'un équipement. C'est la forme de maintenance la plus simple et la plus réactive.

A. Principe : Le fonctionnement est interrompu, la cause de la panne est diagnostiquée, puis une réparation est effectuée pour remettre l'équipement en état de marche. Exemples concrets :

- Casse d'un poinçon ou fissure d'une matrice en cours de production. L'outil doit être retiré et la pièce cassée remplacée.
- Défaillance d'un capteur de sécurité sur une presse. La production est arrêtée et le capteur est remplacé.
- Rupture d'une bielle ou d'un vilebrequin. Il s'agit d'une panne majeure nécessitant une intervention lourde.

B. Avantages : Coût initial faible car il n'y a pas de planification ou d'investissement préventif.

C. Inconvénients : Très coûteuse à long terme en raison des arrêts de production imprévus, des coûts de réparation souvent élevés (interventions d'urgence) et des risques de dommages collatéraux sur l'équipement. Cette méthode est peu recommandée pour des équipements critiques.

IV.2.2. Maintenance préventive

Cette stratégie vise à prévenir les pannes en effectuant des interventions planifiées et régulières. Elle se base sur des critères prédéfinis (temps, nombre de cycles, etc.) pour anticiper l'usure des composants.

A. Principes : Les actions de maintenance sont réalisées selon un calendrier ou un compteur de production, indépendamment de l'état apparent de l'équipement. L'objectif est de remplacer les pièces d'usure avant qu'elles ne défaillent. Exemples concrets :

- Affûtage périodique des poinçons et matrices après un certain nombre de coups de presse (ex. : toutes les 80 000 pièces).
- Graissage des glissières, bielles et autres pièces mobiles de la presse à intervalles réguliers.
- Remplacement programmé des ressorts de dévêisseurs ou des bagues de guidage après une durée de vie estimée.
- Vérification de l'alignement de la presse toutes les 500 heures de fonctionnement.

B. Avantages : Réduction significative des arrêts imprévus, prolongation de la durée de vie des équipements, amélioration de la qualité des pièces produites et meilleure gestion des coûts de maintenance (planification des ressources humaines et matérielles).

C. Inconvénients : Risque de sur-maintenance (remplacement de pièces encore fonctionnelles) et nécessite un investissement initial pour la mise en place d'un plan de maintenance.

IV.2.3. Maintenance prédictive

Cette approche, plus sophistiquée, utilise des capteurs et des technologies de surveillance pour prédire les défaillances. Les interventions ne sont déclenchées que lorsque les indicateurs montrent un risque imminent de panne.

A. Principes : L'état de l'équipement est surveillé en temps réel à l'aide de capteurs. Les données collectées (vibrations, température, niveau acoustique, etc.) sont analysées pour détecter des anomalies qui préfigurent une défaillance. Exemples concrets :

Analyse des vibrations sur le vilebrequin d'une presse pour détecter un déséquilibre ou un début de roulement défectueux.

Surveillance de la température de l'huile hydraulique pour anticiper une surchauffe du système.

Analyse acoustique pour identifier des bruits anormaux (grippage, desserrage) sur les outils ou la presse.

B. Avantages : Maximisation de la durée de vie des composants (on n'intervient qu'en cas de besoin réel), optimisation des coûts de maintenance et minimisation des temps d'arrêt.

C. Inconvénients : Coût d'investissement élevé pour les capteurs et les systèmes d'analyse, et nécessite un personnel qualifié pour interpréter les données.

IV.2.4. TPM (Total Productive Maintenance)

La Maintenance Productive Totale est une philosophie de gestion qui va au-delà des types de maintenance classiques. Elle implique l'ensemble des acteurs de l'entreprise, y compris les opérateurs, dans la maintenance des équipements.

A. Principes : L'objectif est d'atteindre une disponibilité maximale des équipements grâce à une implication collective. Les opérateurs sont formés pour effectuer les tâches de maintenance de base (nettoyage, graissage, petites vérifications) et signaler les anomalies.

Exemples concrets :

- L'opérateur de la presse est responsable du nettoyage quotidien et du graissage des zones accessibles.
- Il effectue une liste de contrôle visuelle en début de poste pour s'assurer que l'outil est bien en place et que les sécurités sont actives.
- Il signale immédiatement un bruit suspect ou une bavure anormale au service maintenance.

B. Avantages : Forte implication du personnel, responsabilisation, détection précoce des problèmes, amélioration de la communication entre la production et la maintenance.

C. Inconvénients : Nécessite une culture d'entreprise forte et des investissements en formation.

IV.3. Maintenance des outils de découpage

La maintenance des outils de découpage, qui sont au cœur du processus de production, est essentielle pour garantir la qualité des pièces et optimiser la durée de vie de l'outillage. Une attention particulière doit être portée à chaque composant de l'outil, en se concentrant sur les points suivants :

IV.3.1. Affûtage régulier des poinçons et matrices

A. Principe : L'affûtage consiste à enlever une fine couche de matière sur les surfaces de coupe des poinçons et des matrices pour restaurer la netteté des arêtes. C'est l'action la plus critique de la maintenance préventive des outils de découpage.

B. Méthodologie : L'affûtage est généralement réalisé sur une machine à rectifier. Il est crucial de respecter des paramètres précis (vitesse de passe, profondeur de passe, lubrification) pour éviter d'endommager l'outil par échauffement. Le nombre d'affûtages possibles sur un outil est limité par la hauteur disponible sur le poinçon et la matrice.

C. Impact : Un affûtage effectué au bon moment (avant que le jeu n'augmente trop) prévient l'usure excessive, réduit les bavures sur les pièces, diminue les efforts de découpage sur la presse et prolonge significativement la durée de vie de l'outil. À l'inverse, un affûtage trop tardif peut nécessiter une rectification plus profonde et accélérer l'usure de l'outil.

IV.3.2. Contrôle du jeu poinçon/matrice

A. Principe : Le jeu de découpage est l'espace entre le poinçon et la matrice. Il s'agit d'une tolérance critique, dimensionnée selon l'épaisseur et le type de matériau à découper.

A. Méthodologie : La vérification du jeu se fait à l'aide de piges de contrôle ou de cales d'épaisseur. Ce contrôle doit être effectué régulièrement, en particulier après un affûtage, pour s'assurer que le jeu est toujours dans la plage de tolérance spécifiée par le concepteur de l'outil. Une usure excessive ou un jeu non conforme peut entraîner des bavures, des casses de poinçons et une détérioration rapide de l'outil.

B. Impact : Le maintien du jeu optimal garantit une coupe propre et de haute qualité, limite l'usure prématurée des arêtes de coupe et réduit les contraintes mécaniques sur l'ensemble de l'outil et de la presse.

IV.3.3. Vérification de la dépouille et des états de surface

A. Principe : La dépouille est la pente conique ou la courbure des parois internes de la matrice, conçue pour faciliter l'évacuation des pièces découpées ou des l'évacuation des déchets. Les états de surface des éléments de guidage (colonnes et bagues) et des zones de frottement de l'outil (flancs des poinçons, surfaces des dévêtisseurs) influencent directement la performance et la durée de vie de l'outil.

B. Méthodologie : La dépouille doit être vérifiée visuellement et par mesure pour s'assurer qu'elle n'est pas obstruée ou usée. Une dépouille insuffisante peut entraîner un blocage des pièces dans la matrice. Les états de surface doivent être inspectés pour détecter des rayures, des grippages ou des signes de surchauffe. Un polissage peut être nécessaire pour restaurer la surface et garantir un mouvement fluide.

C. Impact : Un bon état de surface et une dépouille correcte sont essentiels pour le bon fonctionnement de l'outil. Ils préviennent le coincement des pièces, réduisent les frottements et l'usure, et garantissent une éjection fiable.

IV.3.4. Lubrification pour limiter l'échauffement

A. Principe : La lubrification est indispensable pour réduire le coefficient de frottement entre le poinçon et la matrice, ainsi qu'entre l'outil et la tôle.

B. Méthodologie : La lubrification se fait soit manuellement par l'opérateur, soit via des systèmes automatisés (pompes à huile, graissage centralisé). Le choix du lubrifiant dépend du matériau travaillé, des efforts de découpage et des spécifications de l'outil.

C. Impact : Une lubrification adéquate prévient l'échauffement excessif, l'adhérence (soudage à froid) de la matière sur les arêtes de coupe, les grippages et les déformations thermiques de l'outil. Elle prolonge la durée de vie des composants et améliore la qualité de coupe.

IV.3.5. Suivi des déformations et des usures

A. Principe : Il s'agit d'une inspection continue de l'outil pour identifier tout signe de déformation, de fissure ou d'usure anormale.

B. Méthodologie :

- Inspection visuelle : L'opérateur et le maintenancier doivent être formés pour détecter des signes de fatigue (micro-fissures, écailles) sur les arêtes de coupe, en particulier dans les zones de forte contrainte.
- Contrôle métrologique : Des mesures précises (dimensionnelles, de planéité) sont effectuées périodiquement ou après une panne pour vérifier que l'outil est toujours dans les tolérances. Cela peut inclure la vérification du parallélisme entre le poinçon et la matrice.

C. Impact : Ce suivi permet de détecter des problèmes à un stade précoce et d'intervenir avant qu'une défaillance majeure ne survienne, comme une casse du poinçon ou une déformation irréversible de la matrice. Il est un élément clé de la maintenance préventive et prédictive.

IV.4. Maintenance des presses

La presse de découpage est le "moteur" du processus. Son bon fonctionnement et sa précision sont fondamentaux pour la sécurité de l'opérateur, la qualité des pièces et la longévité des outils. La maintenance de la presse, qui est un équipement plus complexe que l'outil, se décline en plusieurs points clés.

IV.4.1. Inspection mécanique

Cette inspection vise à vérifier l'état des organes mécaniques qui assurent le mouvement de la coulisse de la presse. La vérification des glissières ou colonnes de guidage de la coulisse est primordiale, car elles doivent être inspectées pour détecter toute usure excessive, rayure ou jeu anormal. Un graissage régulier et adapté est indispensable. Un jeu excessif peut entraîner un désalignement de l'outil et causer une usure prématurée du poinçon et de la matrice. Le contrôle des bielles et vilebrequins est également critique, car ces composants subissent d'énormes contraintes. Il faut vérifier l'absence de fissures, de desserrage de boulons ou de roulements défectueux. L'inspection des roulements et paliers est souvent réalisée par analyse des vibrations (maintenance prédictive). Le bon fonctionnement du système d'équilibrage, qui compense le poids de la coulisse et de l'outil, doit aussi être vérifié. Une inspection mécanique régulière garantit le mouvement précis et stable de la coulisse, ce qui protège l'outil, prolonge sa durée de vie et assure la qualité de la production.

IV.4.2. Système hydraulique/pneumatique

Les presses peuvent utiliser des systèmes hydrauliques ou pneumatiques pour le serrage de l'outil, le contrôle de la course, la lubrification ou les systèmes de sécurité. Le contrôle de l'étanchéité est essentiel pour rechercher toute fuite de fluide hydraulique ou d'air comprimé au niveau des vérins, des raccords et des joints. Une fuite peut entraîner une perte de puissance et un risque de contamination de l'environnement.

La vérification de la pression de fonctionnement des systèmes est cruciale et doit être contrôlée régulièrement à l'aide de manomètres. Une pression incorrecte peut affecter la force de frappe de la presse ou la bonne activation des sécurités. Pour les systèmes hydrauliques, la qualité du fluide (niveau, propreté, absence de contamination) doit être contrôlée et les vidanges doivent être effectuées selon les recommandations du fabricant. Un système hydraulique ou pneumatique en parfait état assure la puissance nécessaire au découpage, le bon fonctionnement des dispositifs de sécurité et prévient les pannes majeures.

IV.4.3. Système électrique et de commande

Ce système gère l'ensemble des commandes de la presse, de la mise en marche aux dispositifs de sécurité. L'inspection des capteurs (présence de la tôle, fin de course, surcharge, barrières immatérielles) est fondamentale pour garantir leur bon fonctionnement. Les automates et les circuits de sécurité doivent être vérifiés pour s'assurer que les logiques de commande et d'arrêt d'urgence sont opérationnelles et conformes aux normes de sécurité en vigueur. Enfin, l'intégrité des câbles et des connexions doit être vérifiée pour prévenir les courts-circuits ou les coupures intempestives. Le système électrique est le cerveau de la presse. Une maintenance rigoureuse de ce système est vitale pour la sécurité des opérateurs et la fiabilité du processus de production.

IV.4.4. Alignement et fixation

Le parallélisme entre la table de la presse et la coulisse est crucial pour le bon fonctionnement de l'outil et la qualité du découpage. Le contrôle du parallélisme doit être effectué à l'aide d'instruments de mesure précis (comparateurs, niveaux électroniques). Ce contrôle est d'autant plus important après une panne, un remplacement de pièce ou un déplacement de la machine. Il faut également s'assurer que le serrage de l'outil sur la table de la presse est correct et que la coulisse est bien bridée. Un serrage insuffisant peut causer un désalignement, des vibrations et endommager l'outil. Un alignement parfait garantit une répartition uniforme de l'effort de découpage, ce qui limite l'usure de l'outil, réduit les risques de casse de poinçon et assure la planéité des pièces découpées.

IV.5 Méthodologie de planification

La planification de la maintenance est un pilier fondamental pour passer d'une approche réactive à une stratégie proactive, garantissant ainsi la performance et la fiabilité des presses et des outils de découpage. Au cœur de cette planification se trouve l'élaboration d'un plan de maintenance préventive. Ce plan ne doit pas être arbitraire ; il doit être basé sur des critères tangibles et pertinents, tels que le nombre de coups de presse (ou de cycles), qui est le facteur le plus représentatif de l'usure de l'outillage et des composants de la presse. En définissant des

seuils de déclenchement d'interventions (par exemple, un affûtage toutes les 80 000 pièces produites ou une inspection des glissières toutes les 200 000 coups), l'entreprise s'assure que les actions sont menées au moment optimal, avant que l'usure ne devienne critique. Cette approche ciblée évite la sur-maintenance tout en prévenant les défaillances.

Pour mettre en œuvre et suivre ce plan de manière efficace, l'utilisation d'un système de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) est indispensable. La GMAO est un outil logiciel qui permet de centraliser toutes les informations relatives à la maintenance : historiques des interventions, fiches techniques des équipements, plannings de maintenance, gestion des stocks de pièces de rechange et budgets alloués. En traçant les interventions et en enregistrant les données de production (nombre de coups de presse), la GMAO devient une base de connaissances précieuse. Elle permet de suivre l'évolution des performances, d'identifier les causes de pannes récurrentes et d'optimiser les coûts en évitant les achats de pièces en urgence. Elle transforme les données brutes en informations stratégiques pour la prise de décision.

Pour évaluer la pertinence et l'efficacité de cette stratégie de maintenance, il est crucial de s'appuyer sur des indicateurs de performance (KPI) clairs et précis. Trois indicateurs clés sont particulièrement pertinents dans le contexte du découpage : le MTBF (Mean Time Between Failures ou Temps Moyen Entre les Pannes), qui mesure la fiabilité des équipements en quantifiant la durée moyenne de leur bon fonctionnement entre deux pannes ; le MTTR (Mean Time To Repair ou Temps Moyen de Réparation), qui évalue l'efficacité de l'équipe de maintenance en mesurant le temps moyen nécessaire pour remettre un équipement en service après une panne ; et enfin, le Taux de disponibilité des équipements, qui représente le pourcentage de temps pendant lequel la presse est disponible pour la production. Le suivi régulier de ces indicateurs permet de mesurer l'impact des actions de maintenance et d'ajuster la stratégie pour atteindre une productivité et une fiabilité maximales.

IV.6. Étude de cas

L'application concrète des principes de maintenance est la meilleure preuve de leur efficacité. L'étude de cas proposée ici illustre comment une stratégie de maintenance préventive structurée peut transformer les performances d'une ligne de découpage.

L'exemple se concentre sur une presse de découpage simple, mais représentative, qui, avant la mise en place d'une nouvelle approche de maintenance, connaissait des problèmes récurrents :

- Jeu excessif entre le poinçon et la matrice, se manifestant par une usure prématurée et une qualité de coupe médiocre.
- Bavures systématiques sur les pièces produites, nécessitant une opération de finition manuelle coûteuse et chronophage.
- Casses de poinçons et de matrices, entraînant des arrêts de production imprévus et onéreux.

Face à ces dysfonctionnements, une nouvelle politique de maintenance a été mise en place. La mesure la plus déterminante a été la mise en œuvre d'un plan d'affûtage préventif. Plutôt que d'attendre l'apparition des bavures, il a été décidé d'affûter l'outil de découpage toutes les 80 000 pièces produites. Ce seuil a été déterminé en se basant sur les données historiques d'usure et les recommandations du fabricant d'outillage. Cette action, simple mais cruciale, a été intégrée au plan de maintenance de la GMAO, garantissant sa régularité.

Les résultats de cette nouvelle approche ont été mesurés de manière rigoureuse, et les améliorations ont été notables après une année complète d'application. L'impact le plus significatif a été la réduction de 20 % des arrêts non planifiés. Ces arrêts, auparavant causés par des casses soudaines ou des pannes inattendues de l'outillage, ont été presque totalement éliminés. La production est devenue plus stable et prévisible. De plus, la qualité des pièces produites a été considérablement améliorée, réduisant le taux de rebut et éliminant presque entièrement la nécessité d'opérations de finition supplémentaires. Cet exemple démontre de manière tangible que la maintenance n'est pas un centre de coût, mais un investissement stratégique qui génère un retour sur investissement mesurable, tant en termes de réduction des coûts de réparation que d'amélioration de la productivité et de la qualité.

IV.7 Conclusion

L'intégration d'une démarche de maintenance structurée représente une évolution fondamentale pour toute entreprise de production utilisant des presses et des outils de découpage. Loin d'être une simple contrainte opérationnelle, la maintenance devient un levier stratégique de compétitivité dans l'industrie moderne.

Une stratégie de maintenance bien pensée, qui combine judicieusement les approches corrective, préventive et prédictive, permet non seulement de prolonger significativement la durée de vie des outils et presses, mais aussi d'assurer une meilleure régularité dans la qualité de production. En anticipant les défaillances, on évite les arrêts de production imprévus, on réduit les coûts de réparation et on minimise le gaspillage de matière.

En définitive, la maintenance structurée transforme l'atelier de production en un environnement plus fiable, plus sûr et plus performant. Elle est un investissement qui se rentabilise rapidement par l'amélioration de l'efficacité opérationnelle et l'augmentation de la productivité. La gestion de la maintenance est ainsi un facteur clé qui distingue les entreprises durables et compétitives sur le marché.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail consacré aux outillages de déformation plastique des tôles, un premier chapitre a été dédié aux procédés fondamentaux tels que le pliage, l'emboutissage et le découpage, avec une attention particulière portée à ce dernier dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre a traité de l'organisation des découpes ainsi que du développement d'un programme de calcul du centre de poussée pour un outil de découpage, monté sur un bras automatisé. Cette partie nous a permis de constater l'importance cruciale du positionnement de l'outil durant l'usinage, influençant directement la précision et l'efficacité du processus.

Par ailleurs, ce travail nous a offert une initiation aux procédés d'usinage et à la programmation appliquée, à travers l'utilisation du langage C.

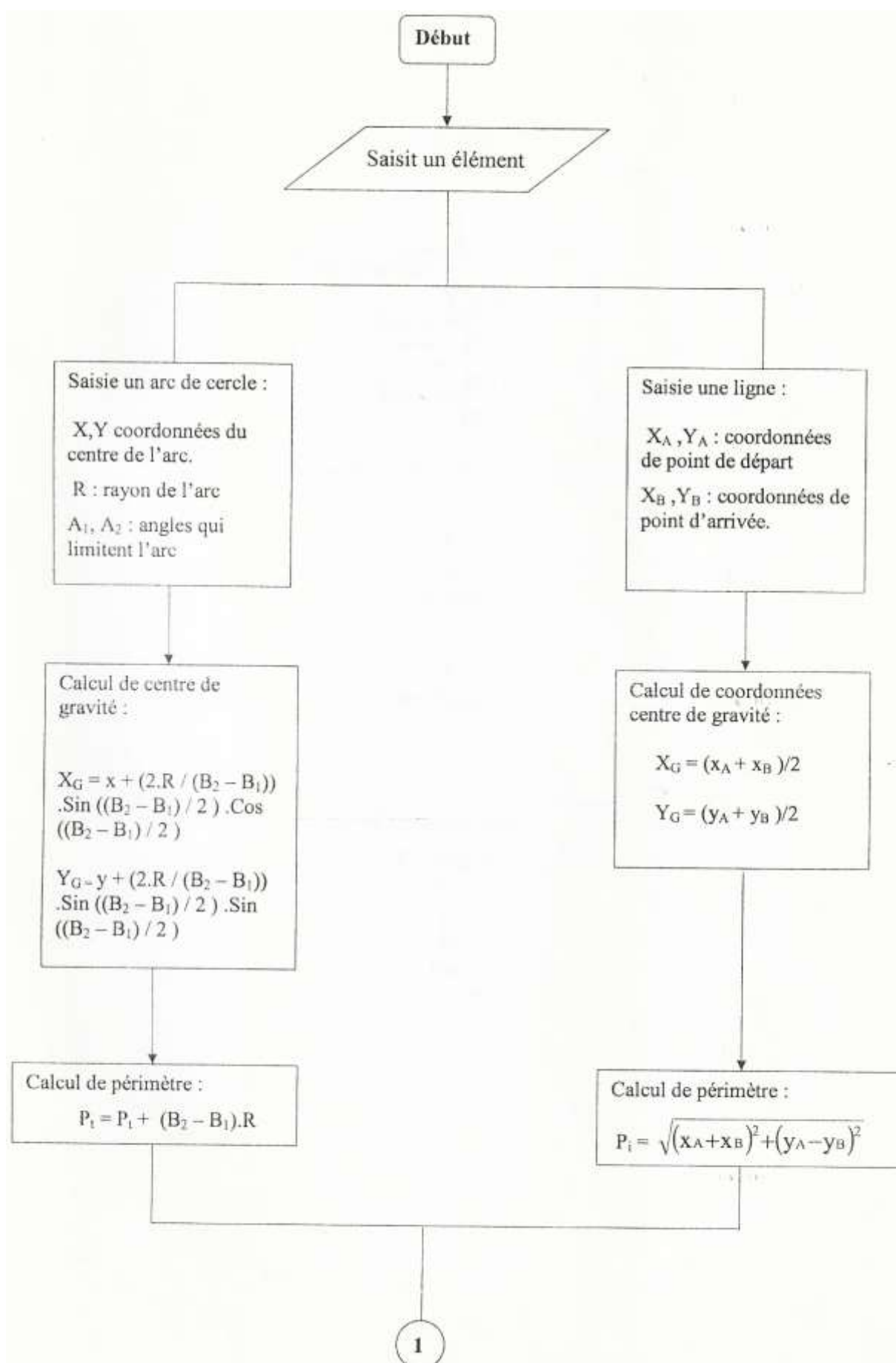
L'objectif principal était de proposer une solution au problème du centre de poussée dans les opérations de découpage. Le programme développé s'inscrit ainsi dans une démarche d'optimisation des opérations d'usinage, notamment en ce qui concerne le montage, le soudage et le perçage.

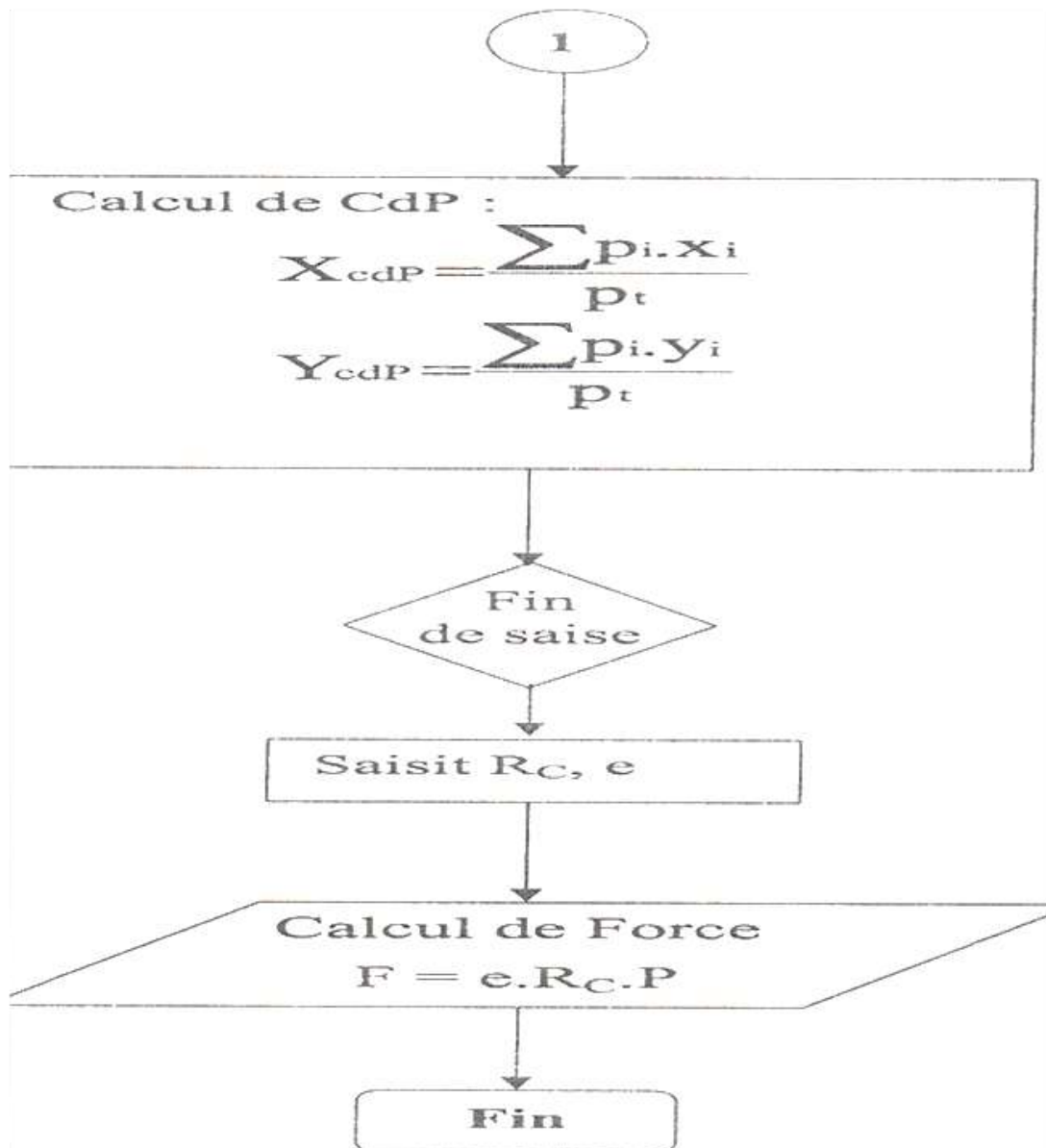
Nous espérons que ce travail constituera une base de référence utile pour les étudiants futurs, et qu'il pourra également trouver des applications concrètes dans le secteur industriel.

Bibliographies

- [01] Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek. (2020). *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill.
- [02] Gélin, J.-C., & Schmitt, C. (2007). *Résistance des matériaux : Cours et exercices corrigés*. Dunod.
- [03] Norme Française NF EN ISO 6892-1 ( quivalente à la norme internationale). Titre : « Matériaux métalliques — Essai de traction — Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante ».
- [04] Hull, D., & Bacon, D. J. (2011). *Introduction to Dislocations* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- [05] Friedel, J. (1964). *Dislocations*. Pergamon Press.
- [06] ASM International. (2006). *ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming*. ASM International. (Specifically, Section: "Fundamentals of Bending", Chapter authored by S. Kalpakjian).
- [07] T les et bandes m talliques — Vocabulaire du pliage
- [08] Schuler GmbH. (1998). *Metal Forming Handbook*. Springer-Verlag.
- [09] Mase, G. E., & Mase, G. T. (1999). *Continuum Mechanics for Engineers* (2nd ed.). CRC Press. (Chapter 3: "Deformation and Motion", Figure 3.2 or similar).
- [10] ASM International. (2006). *ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming*. ASM International. (Specifically, the section or chapter on "Press Brake Forming" or "Bending of Sheet Metal")
- [11] Tools for pressing — Cutting and forming — Part 1: Vocabulary"
- [12] Tsch tsch, H. (2006). *Metal Forming Practise: Processes - Machines - Tools*. Springer-Verlag. (Specifically, the section on "Fineblanking" or "Precision Shearing").
- [13] Outillage de mise en forme des métaux - Découpage - Jeu entre poinçon et matrice"
- [14] Dieter, G. E., & Bacon, D. (1988). *Mechanical Metallurgy* (SI Metric Edition). McGraw-Hill. (Specifically, Chapter 17: "Forging and Other Compressive Working Processes", and associated tables).
- [15] Découpage théorique des t les ( tude numérique et expérimentale)
- [16] Timoshenko, S., & Goodier, J. N. (1951). *Theory of Elasticity* (2nd ed.). McGraw-Hill. (Specifically, the chapter on "Two-Dimensional Problems in Elasticity" and the sections on the "Mohr Circle" construction).
- [17] Megson, T. H. G. (2014). *Structural and Stress Analysis* (3rd ed.). Elsevier (Butterworth-Heinemann).

Annexes





Le code en Language C

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#define PI 3.141592653589793
double PX = 0, PY = 0, PT = 0;
void ajouter_segment() {
    double xa, ya, xb, yb, d;
    printf("Coordonnees du point A (xa ya) : ");
    scanf("%lf %lf", &xa, &ya);
    printf("Coordonnees du point B (xb yb) : ");
    scanf("%lf %lf", &xb, &yb);

    if (xa == xb && ya == yb) {
        printf("Erreur : Les deux points ne doivent pas être confondus.\n");
        return;
    }

    d = sqrt(pow(xa - xb, 2) + pow(ya - yb, 2));
    PX += (xa + xb) / 2 * d;
    PY += (ya + yb) / 2 * d;
    PT += d;

    printf("Segment ajoute avec succes.\n");
}

void ajouter_arc() {
    double x, y, r, a1, a2, b1, b2, theta, m, Xg, Yg;

    printf("Centre de l'arc (x y) : ");
    scanf("%lf %lf", &x, &y);
    printf("Rayon : ");
    scanf("%lf", &r);
    printf("Angle de debut A1 (en degres) : ");
    scanf("%lf", &a1);
    printf("Angle de fin A2 (en degres) : ");
    scanf("%lf", &a2);

    if (a2 <= a1) {
        printf("Erreur : Il faut que A2 > A1.\n");
        return;
    }

    b1 = a1 * PI / 180;
    b2 = a2 * PI / 180;
    theta = b2 - b1;
    m = theta * r;

    Xg = x + (2 * r / theta) * sin(theta / 2) * cos((b2 + b1) / 2);
    Yg = y + (2 * r / theta) * sin(theta / 2) * sin((b2 + b1) / 2);

    PX += m * Xg;
    PY += m * Yg;
    PT += m;
}
```

Annexes

```
printf("Arc ajoute avec succes.\n");
}

void afficher_resultats() {
    double gx, gy, coef1, coef2, surface;

    if (PT == 0) {
        printf("Aucune donnee n'a encore ete ajoutee.\n");
        return;
    }

    gx = PX / PT;
    gy = PY / PT;

    printf("\n--- Résultats ---\n");
    printf("Longueur totale PT : %.4lf\n", PT);
    printf("Centre de gravité Gx : %.4lf\n", gx);
    printf("Centre de gravité Gy : %.4lf\n", gy);

    printf("Coefficient 1 : ");
    scanf("%lf", &coef1);
    printf("Coefficient 2 : ");
    scanf("%lf", &coef2);

    surface = coef1 * coef2 * PT;
    printf("Surface : %.4lf\n", surface);
}

void reinitialiser() {
    PX = 0;
    PY = 0;
    PT = 0;
    printf("Données réinitialisées.\n");
}

int main() {
    int choix;

    do {
        printf("\n=== Organisation des découpes ===\n");
        printf("1. Ajouter un segment\n");
        printf("2. Ajouter un arc\n");
        printf("3. Afficher les résultats\n");
        printf("4. Réinitialiser\n");
        printf("0. Quitter\n");
        printf("Votre choix : ");
        scanf("%d", &choix);

        switch (choix) {
            case 1:
                ajouter_segment();
                break;
            case 2:
                ajouter_arc();
                break;
            case 3:
                afficher_resultats();
                break;
```

Annexes

```
        case 4:
            reinitialiser();
            break;
        case 0:
            printf("Au revoir !\n");
            break;
        default:
            printf("Choix invalide.\n");
    }
} while (choix != 0);

return 0;
}
```


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences
et de la technologie



جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم: الآلية والكهروميكانيك

غرداية في 00 أيلول 2025

شعبة: الالكتروميكانيك
تخصص: صيانة صناعية

شهادة ترخيص بالتصحيح والايذاء:

انا الاستاذ بلعور عبدالرحمان

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ماستر) المعنونة بـ:

Contribution au développement d'un modèle numérique pour l'analyse des déformations plastiques

من انجاز الطالبين:

الرواني أكرم

رحماني العلمي

التي نوقشت بتاريخ: 22 سبتمبر 2025

اشهد ان الطالبين قد قاما بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا

وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

امضاء المسؤول عن التصحيح
مصادقة رئيس القسم

