الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de

Master Académique

Spécialité : **Génie des matériaux**
Filière : **Génie mécanique**

Thème

Contribution à l'étude des paramètres d'estampage à chaud des aciers

Réalisé par :
MENACER Khelifa

Encadré par :
Professeur HANNACHI Med Tahar

Mémoire soutenu le 09 / 06 / 2026 devant le jury composé de

Président	:	DIHA Abdallah	MCA	Université de Tébessa
Encadreur	:	HANNACHI Med Tahar	Professeur	Université de Tébessa
Examinateur	:	BOUNOUARA Abdelouahab	MCB	Université de Tébessa

Année universitaire 2025 / 2026

Remerciement

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

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr. Mohamed Tahar Hannachi pour son encadrement, sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité, son aide précieux et sa bienveillance afin de mener notre travail à bon port.

Tout notre respect et nos remerciements vont vers le président et les membres du jury, qui vont pleinement consacrer leur attention afin d'évaluer notre travail, espérons qu'il le sera à la hauteur de leur attente.

Nous restons persuadés que vos conseils, remarques et critiques nous permettront de parfaire ce travail.

Nous tenons à remercier tous les enseignants de département de Génie des matériaux de Tébessa.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail...

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, avec tout mon amour et ma gratitude,

À mes chers parents,
pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs prières et leur soutien permanent. Vous avez toujours été ma source de force, de courage et de motivation. Que ce travail soit le témoignage de ma profonde reconnaissance et de mon immense respect.

À ma chère épouse,
Pour sa patience, sa compréhension, son soutien moral et ses encouragements constants tout au long de ce parcours. Ta présence à mes côtés a été une source précieuse de réconfort et de détermination.

À mes chers enfants,
Qui sont ma joie, ma fierté et ma plus grande source d'inspiration. Que ce travail soit pour vous un exemple de persévérance, d'effort et de volonté.

À mes amis,
Pour leur soutien, leurs encouragements et les moments partagés durant toutes ces années. Votre présence et vos paroles m'ont toujours apporté motivation et confiance.

À toutes les personnes qui me sont chères,
Je dédie ce travail avec affection, respect et reconnaissance.

Khelifa

ملخص

في هذه الدراسة بدانا بتعريف عملية الحدادة بالختم الساخن، ثم قمنا بذكر عمليات التشكيل البارد منها والساخن. كما قدمنا العوامل ذات الطابع الحراري والميكانيكي التي تتحكم في عملية الحدادة بالختم الساخن. وختمنا هاته الدراسة بسلسلة تجريبية لتعيين الخصائص الميكانيكية للفولاذ المدروس قبل وبعد عملية الحدادة بالختم الساخن.

Abstract

In this study, we give the definitions of the process of forging by hot stamping, while indicating the forming operations by giving the thermal and mechanical parameters which govern hot stamping. Finally and in the experimental part, we were able to determine the mechanical properties of considered steel 20MC5 before and after hot stamping.

Résumé

Dans cette étude on a les définitions du procédé de forgeage par estampage à chaud. Tout en indiquant les opérations de mise en forme en donnant les paramètres qui gouvernent l'estampage à chaud a caractère thermomécaniques. Finalement, une dans la partie expérimentale dont a pu déterminer les propriétés mécanique de l'acier considéré 20MC5 avant après estampage à chaud.

Table des matière

Remerciement i
Dédicace ii
ملخص iii
Abstract iii
Résumé iii
Table des matière iv
Liste des Figure viii
Liste des tableaux x
INTRODUCTION GENERALE 11
CHAPITRE I NOTIONS DES PROCEDES DE MISE EN FORME 3
I.1. Introduction 4
I.2. Procédés de mise en forme 5
I.2.1. Le Laminage 6
I.2.1.1. Caractéristiques du laminoir 7
I.2.1.2. Types de Laminage 7
I.2.1.2.1. Laminage à chaud 7
I.2.1.2.2. Le Laminage à froid 8
I.2.2. Le Pliage 9
I.2.2.1. Pliage manuel 10
I.2.2.2. Pliage mécanique 10
I.2.3. Emboutissage 11
I.2.3.1. Type des procédés d'emboutissage 12
I.2.4. Cintrage 12
I.2.5. Le Repoussage 13
I.2.5.1. Le Repoussage au tour 13
I.2.5.2. Repoussage sur machine à former les bords 15

I.2.5.3. Outillage 15
I.2.6. Formage par explosion 16
I.2.7. Le découpage 17
I.2.7.1. Découpe par Cisaillage 18
I.2.7.2. Découpe par Poinçonnage 19
I.2.8. Forgeage 20
I.2.8.1. Type de forgeage 21
I.2.9. Estampage 21
I.2.9.1. Déformation plastique en estampage 24
CHAPITRE II : PARAMETRES INFLUENÇANT LE PROCEDE D'ESTAMPAGE A CHAUD 26
II.1. Introduction 27
II.2. Le procédé de Forgeage 27
II.2.1. Définition de forgeage 27
II.2.2. Type de forgeage 28
II.2.2.1. Le forgeage à chaud 28
II. 2.2.1.1. Forgeage libre 29
II. 2.2.1.2. Forgeage par estampage 30
II. 2.2.1.3. Forgeage par matriçage 30
II. 2.2.1.4. Forgeage par laminage circulaire 30
II.2.2.1.5. Extrusion à chaud 30
II.2.2.2. Le forgeage à froid 30
II.2.2.2.1. Type de forgeage à froid 31
II .2.2.2.1.1. Forgeage par extrusion 31
II. 2.2.2.1.2. Frappe à froid 31
II.2.2.2.1.3. Emboutissage 32
II.2.2.2.2- Propriétés des procédés de forgeage 32

II. 2.2.2.3- Avantages des procédés de forgeage 32
II. 2.2.2.4-Inconvénients des procédés de forgeage 32
II.3. Estampage 33
II. 3. 1.Généralité 33
II.3.2. Définition d'estampage 34
II.3.3. Techniques de fabrication 35
II.3.3.1. Débitage 35
II.3.3.2. Sciage 36
II.3.3.3. Cisaillage 36
II.3.4. Les paramètres influençant l'estampage à chaud 36
II.3.4.1. Paramètres de Chauffage 37
II.3.4.2. Différents modes de chauffage sont utilisés 38
II.3.4.2.1. Chauffage à la flamme 38
II.3.4.2.2. Chauffage électrique 38
II.3.4.3. Mise en forme et Comportement lors du procédé d'estampage 40
II.3.4.4. Déformation plastique lors de l'estampage 43
II.3.5. Les efforts d'estampage 44
II.3.6. Les traitements thermiques 45
II.3.6.1. Les traitements thermiques de l'acier 45
II.3.6.2. Les recuits 46
II.3.7. Les outillages 47
II.3.8. Machines utilisées durant la procédure d'estampage 49
II.3.8.1. Des machines-outils de déformation par choc (marteau-pilon) 50
II.3.8.1.1 Les marteaux pilons 'simple effet' 50
II.3.8.1.2. Les principaux avantages des pilons 50
II.3.8.1.3. Les Inconvénients des pilons 50
II.3.8.2. Les presses mécaniques 51

II.3.8.2.1. Les principaux avantages des presses mécaniques sont 51
II.3.8.2.2. Les inconvénients des presses mécaniques sont 52
II.3.8.3. La presse à vis 52
II.3.8.4. La presse hydraulique 53
CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE 55
III.1. Introduction 56
III.2. Procédures expérimentales 56
III.2.1. Choix du métal de base 56
III.2.2. Analyse chimique de l'acier 56
III.2.2.1. Composition chimique 56
III.2.2.2. Propriétés physiques de l'acier 57
III.3. Essais mécaniques 58
III.3.1. Essai de traction 58
III.3.2. Essais de dureté 66
III.3.3. Essai de Résilience (K) 71
III.4. Détermination des forces d'estampage à chaud 74
III.4.1. Effort d'estampage avec et sans frottement 74
III.4.1.1. Contrainte d'écoulement 74
CONCLUSION GENERALE 81
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES 83

Liste des Figure

Chapitre I

Figure I. 1 Mise en forme des produits 4
Figure I. 2 Les différents procédés de mise en forme et de fabrication des matériaux 5
Figure I. 3. Mise en forme par déformation plastique. 6
Figure I. 4 Procédé du laminage. 7
Figure I. 5 Laminage à chaud 8
Figure I. 6 Laminage à froid 9
Figure I. 7. Déformations plastiques localisées 9
Figure I. 8 Pliage manuel 10
Figure I. 9 Pliage mécanique 11
Figure I. 10 *(1)* Emboutissage avec serre flan (2) Limitation aux embouties de faible hauteur 11
Figure I. 11 Processus de l'emboutissage 12
Figure I. 12 Paramètres géométriques du cintrage 13
Figure I. 13 Repoussage au tour 14
Figure I. 14 Formage sur une machine à former les bords, à avance manuelle 15
Figure I. 15 a) Mandrin à extrémité interchangeable pour le repoussage de fonds bombés torisphériques, b) Machine avec galet de forme pivotant pour corriger la forme du rayon de carre]. .. 16
Figure I. 16 Formage par explosion a) en matrice fermée, b) en matrice ouverte. 17
Figure I. 17. Principe de cisaillage 19
Figure I. 18. Principe du poinçonnage. 20
Figure I. 19 de Forgeage : a) à chaud, b) à froid 21
Figure I. 20. Déroulement d'une opération d'estampage 23
Figure I. 21. Pièce composite estampée et co-injectée 24
Figure I. 22. Exemples de pièces estampées 25

Chapitre II

Figure II. 1 Le Forgeage à chaud 29
Figure II. 2 Le forgeage libre 29
Figure II. 3 : forgeage à froid d'un lopin 31
Figure II. 4 Formation de plis 32
Figure II. 5 principes de l'estampage 34
Figure II. 6 opération de cisaillage 35
Figure II. 7 Évolution de la contrainte d'écoulement d'UN acier en fonction de la température. 37
Figure II. 8 Coupe schématique de la calamine sur de fer doux sur un acier 38
Figure II. 9 principes du chauffage par induction 39
Figure II. 10 principes de fonctionnement d'une chauffeuse à induction 39
Figure II. 11 Principe du chauffage par conduction 40
Figure II. 12 Principe de fonctionnement d'une chauffeuse a conduction. 40
Figure II. 13 a) températures de surface de l'outillage en deux pions relativement proches, **b)** forgeage ouvert et fermé 42
Figure II. 14 Évolution de la ductilité, de la contrainte d'écoulement et de l'oxydation d'un acier en fonction de la température 43
Figure II. 15 Types de recuit 47
Figure II. 16 Exemple d'outillage a gravure multiple 48
Figure II. 17 Exemple d'un blocs matrices 49

Figure II. 18 Clavette et grain de centrage 49
Figure II. 19 Marteau pilon simple effet 51
Figure II. 20 Presse mécanique 52
Figure II. 21 Presse à vis 53
Figure II. 22 Presses hydraulique 54

Chapitre III

Figure III. 1. Courbe de traction conventionnelle. 60
Figure III. 2. Forme générale de l'éprouvette cylindrique. 61
Figure III. 3. Machine de traction au labo. Contrôle qualité de L'ETRAG. 62
Figure III. 4. Courbe rationnelle de traction avant forgeage par estampage. 64
Figure III. 5. Courbe rationnelle de traction après forgeage par estampage. 65
Figure III. 6. Essai de dureté Brinell 67
Figure III. 7. Dureté avant et après estampage. 68
Figure III. 8. Profil de dureté Brinell avant estampage (labo ETRAG). 68
Figure III. 9. Profil de dureté Brinell avant estampage (labo ETRAG). 69
Figure III. 10. Profil de dureté Brinell avant estampage (labo ETRAG). 69
Figure III. 11. Profil de dureté Brinell après estampage (labo ETRAG). 70
Figure III. 12. Profil de dureté Brinell après estampage (labo ETRAG). 70
Figure III. 13. Profil de dureté Brinell après estampage (labo ETRAG). 71
Figure III. 14. Type d'entaille (U ou V) 72
Figure III. 15. Essai de résilience 73
Figure III. 16 Contrainte d'écoulement en fonction de température 76
Figure III. 17. Histogramme des efforts d'estampage en fonction de la température. 77
Figure III. 18. Effort d'estampage en fonction de la température. 77
Figure III. 19. Effort d'estampage sans frottement en fonction de la température. 78
Figure III. 20. Effort d'estampage avec frottement en fonction de la température. 78

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau III. 1. Désignation de l'acier 20MnCr5 D'après EN 56
Tableau III. 2: Composition chimique du métal de base 57
Tableau III. 3: Composition chimique du métal de base d'après l'ETRAG**.** 57
Tableau III. 4: Propriétés mécaniques de l'acier 20MnCr5 57
Tableau III. 5: Propriétés physiques des aciers 58
Tableau III. 6: Symboles et désignation de l'éprouvette 61
Tableau III. 7. Données géométriques de l'essai de traction pour une éprouvette avant Estampage .. 63
Tableau III 8. Données géométriques de l'essai de traction pour une éprouvette après Estampage. .. 63
Tableau III. 9: résultat de l'essai de traction. 63
Tableau III. 10. Symboles et désignation en dureté..... 67
Tableau III. 11. Résultats des Essais de dureté avant et après l'opération Estampage. 67
Tableau III. 12. Rapport géométrique d'écrasement K_2. 75
Tableau III. 13. Contrainte d'écoulement à haute température. 75
Tableau III. 14 Force de Forgeage par estampage à chaud avec et sans frottement. 76

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La mise en forme de l'acier par déformation plastique à chaud est un procédé industriel d'obtention de pièces mécaniques, aussi appelé : forge par estampage. Il est utilisé aussi bien en petites qu'en moyennes et qu'en très grandes séries de pièces, dont la masse peut varier de quelques grammes à plusieurs centaines de kilogrammes [1].

Le formage à chaud des métaux est particulièrement important pour les constructeurs et les équipementiers automobiles. Il convient à tous les niveaux de qualité de l'acier. Les composants produits avec cette méthode sont plus légers et atteignent de meilleures valeurs aux essais de crash test.

Le formage à chaud est un procédé de mise en forme des tôles qui est également connu sous le nom d'estampage à chaud ou de trempe sous presse. Tous les processus de formage se déroulent au-dessus de la température de recristallisation du métal utilisé. Lors du formage à chaud de la tôle, le matériau se rétablit et se ramollit, permettant d'obtenir une déformation équivalente élevée malgré des forces de formage faibles [2]. Le formage à chaud comprend plusieurs procédés tels que le forgeage, le laminage à chaud et l'extrusion. La technologie de formage est réglementée par la norme DIN 8582 et permet de traiter des matériaux à haute résistance en fonction des besoins. Le processus est particulièrement adapté aux composants qui doivent supporter des charges élevées (cylindres, vilebrequins, bielles, engrenages) [3].

L'objectif de ce travail est d'évaluer des procédés de mise en forme par estampage à chaud des pièces données et de caractériser les paramètres du procédé.

Il est composé de trois chapitres :

- Le chapitre I, consiste à donner des notions générales sur les procédés de mise en forme dans ce chapitre on 'a expliqué les opérations de formage à froid et à chaud.

- Le chapitre II présente l'état de l'art sur les moyens d'obtention des pièces estampées depuis le débitage jusqu'au parachèvement. Du forgeage à chaud estampage à chaud, Il permet de prendre connaissance avec le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, le comportement du matériel en exploitation, les avantages et les coûts de perte de production, avec prise en compte les conditions et les particularités des pièces soumis simultanément à des sollicitations intenses d'origine thermiques et mécaniques.

- Le chapitre III est réservé à la procédure expérimentale et aux calculs des paramètres mécaniques**,** L'expérience est le complément indispensable de la théorie et l'argument de chaque question sur le comportement mécanique de l'acier. Dans cette étape, nous pouvons effectuer une série d'expériences (analyse chimique, traction, dureté et résilience) sur des éprouvettes cylindriques.et d'autre part, nous pouvons calculer les paramètres responsables du procédé de forgeage par estampage à chaud. Les résultats sont enregistrés et commentés.

CHAPITRE I
NOTIONS DES PROCEDES DE MISE EN FORME

I.1. Introduction

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une forme déterminée au matériau tout en lui imposant une certaine microstructure, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées. C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement les paramètres expérimentaux (composition du matériau, température, pression, vitesse de refroidissement, etc.). Les techniques diffèrent selon les matériaux (leur solidité, l'usage, etc.). Les performances mécaniques des pièces de structures dépendent fortement du matériau et de son procédé de transformation. La mise en forme des alliages métalliques s'intéressent aux matériaux lors de la transformation par déformation plastique (état solide), solidification (état liquide) ou compactage (poudre) dans tous les grand secteurs industriels (figure I.1): industrie du transport (ferroviaire, automobile aéronautique), de l'emballage, de l'énergie du nucléaire et de la santé [4].

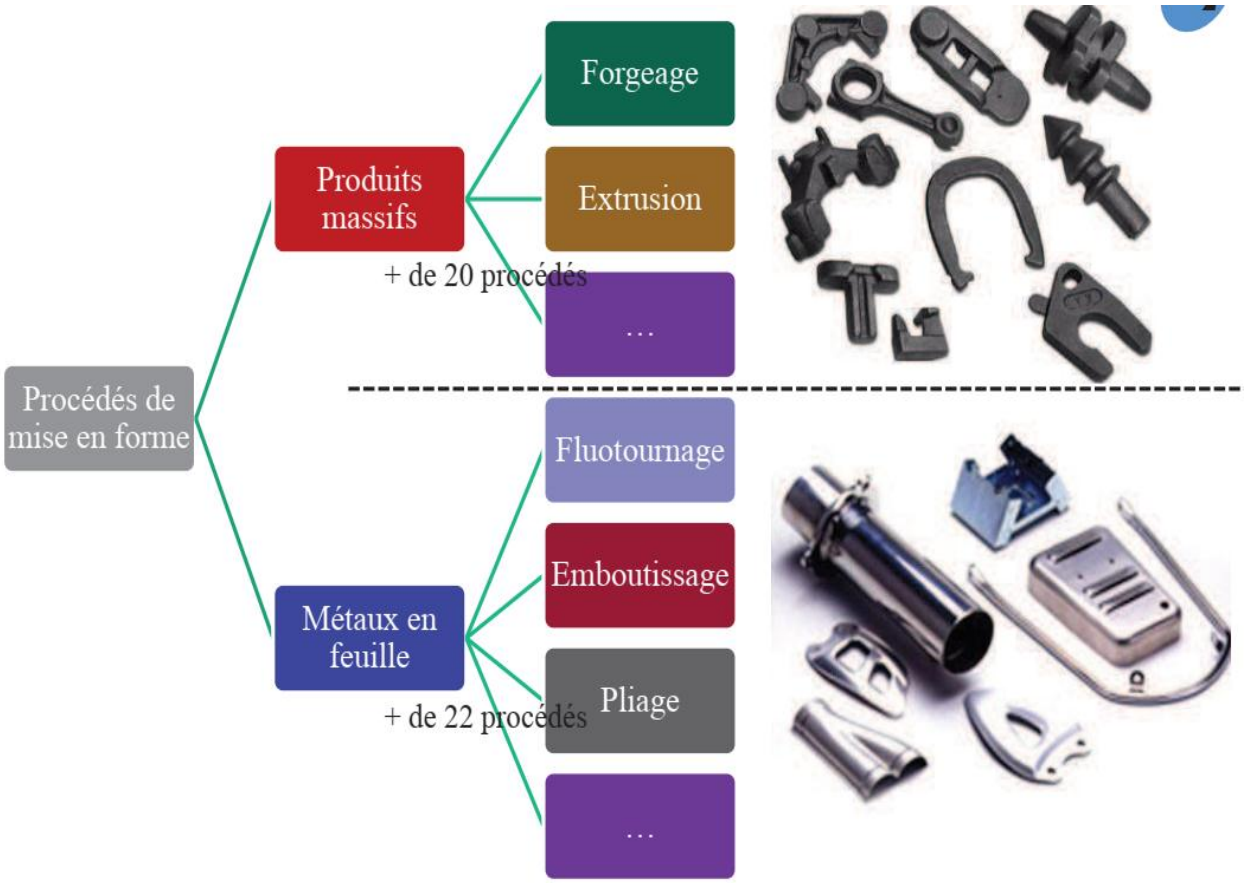


Figure I. 1 Mise en forme des produits [5].

I.2. Procédés de mise en forme

Les différentes branches de la métallurgie travaillent ces métaux pour fabriquer les pièces de machine, les mécanismes, les instruments et les outils dont ont besoin les autres industries et les différents secteurs de l'économie.
Sous leurs diverses formes, qu'il s'agisse de produits laminés (barres, bandes, profilés, tôles ou tubes) ou de produits étirés (barres, profilés, tubes ou fils), métaux et alliages servent de matière de départ pour cette fabrication. On peut citer, par exemple, les principaux procédés métallurgiques comme suis [6] :

Un procédé de mise en forme consiste à conférer à une pièce, une géométrie donnée, décrite par une forme et des directions spécifiées par le bureau d'étude (figure I.2). On met en œuvre généralement un outillage (outil + matrice), permettant de transformer la matière en pièce finale [7].

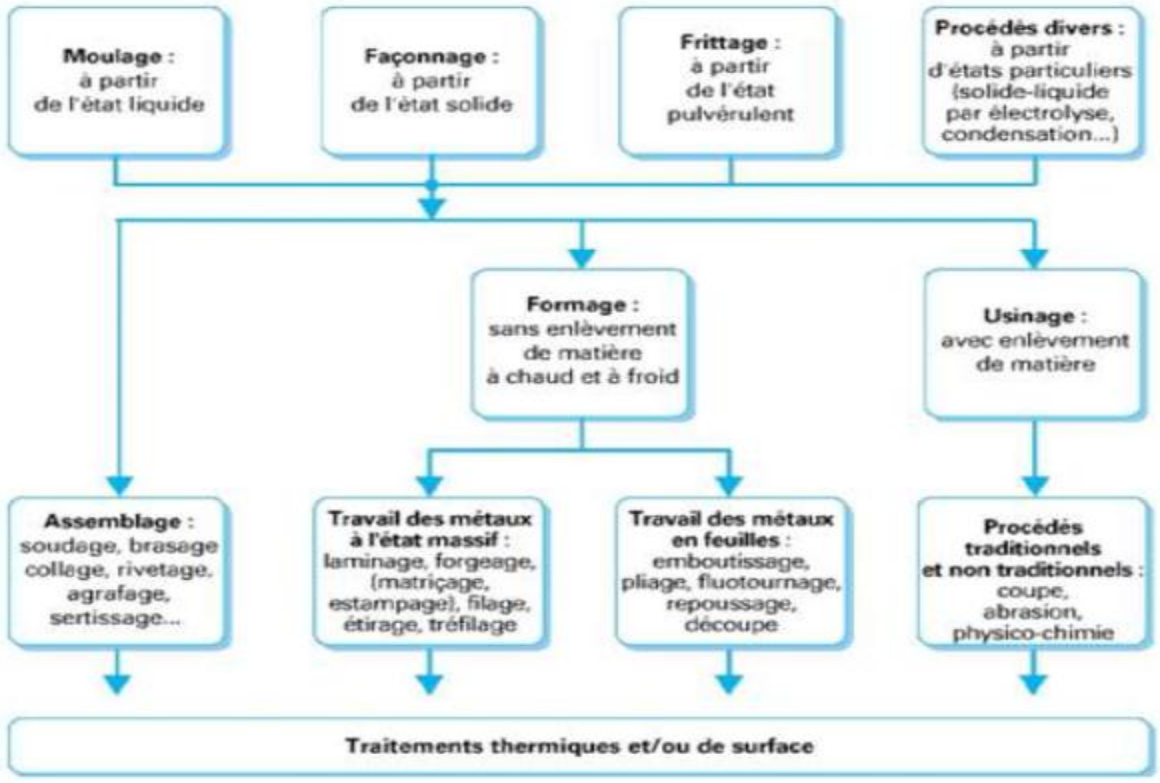


Figure I. 2 Les différents procédés de mise en forme et de fabrication des matériaux [7].

Les procédés de mise en forme impliquent divers phénomènes physiques complexes couplés [7] :

1. Grandes déformations irréversibles plastiques (figure I.3) ;
2. Chargements complexes irréversibles ;

3. Lois de comportement complexes élasto-viscoplastique ;
4. Effets thermiques ;
5. Contact avec frottement évolutif ;
6. Contraintes initiales et induites ;
7. Effets cycliques (fatigue) ;
8. Endommagement et rupture.

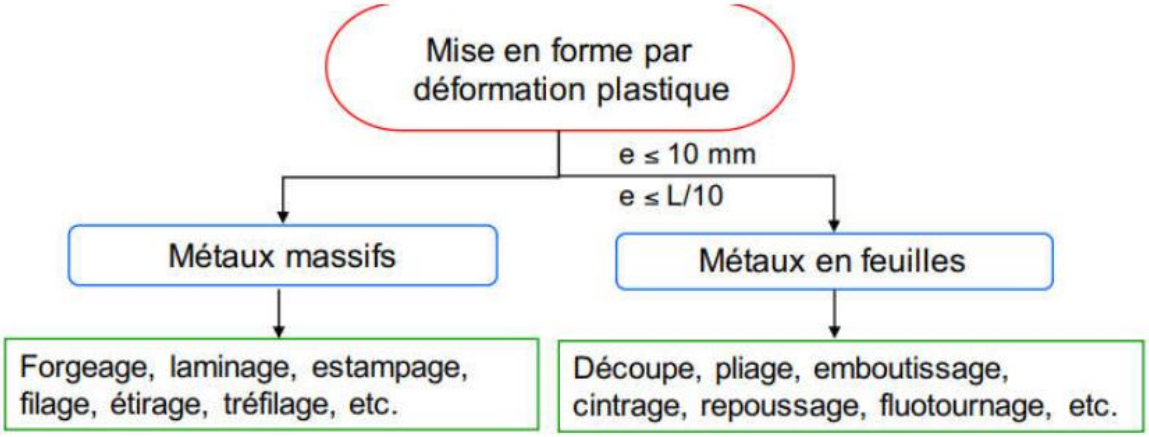


Figure I. 3. Mise en forme par déformation plastique [4].

I.2.1. Le Laminage

Dans le laminage, le métal est engagé entre deux cylindres tournant en sens inverse (figure I.4). Pour faciliter la déformation, l'opération se fait à chaud. Alors que dans le forgeage, l'élargissement est égal à l'allongement ; dans le laminage, à cause du mouvement de rotation qui produit un écoulement du métal vers l'avant, l'allongement est très supérieur à l'élargissement. L'allongement et l'élargissement dépendent :

- De la température du métal laminé : un acier chauffé à 1 000 °C s'allongera plus que le même acier chauffé à 900 °C ;

- Du diamètre des cylindres : à pression égale, plus le cylindre sera petit, plus le métal s'allongera ;

- De la réduction de section provoquée à chaque passe ;

- La vitesse de rotation joue peu. Toutefois la température augmentant avec la vitesse de travail, l'allongement augmente. La faculté d'allongement du métal dépendant de la température, il y a avantage à opérer à chaud pour obtenir de fortes déformations sans écrouissage du produit et à froid pour obtenir des produits écrouis de dimension donnée et d'épaisseur précise, d'où deux sortes de laminage : à chaud et à froid.

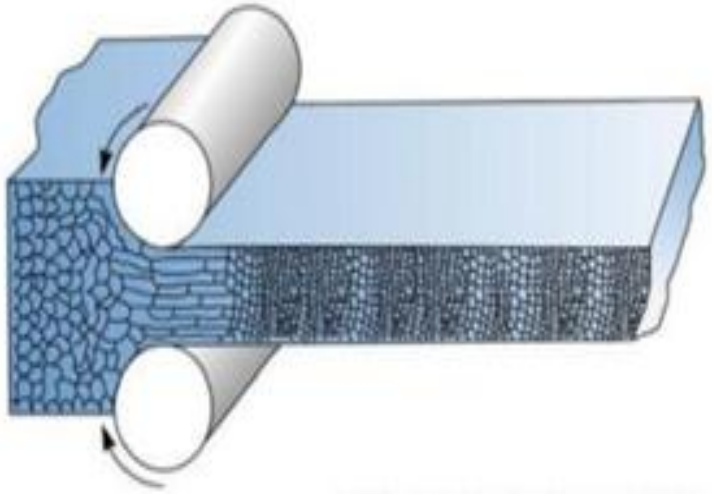


Figure I. 4 Procédé du laminage [8].

I.2.1.1. Caractéristiques du laminoir

Un laminoir est caractérisé par différents éléments : -Géométriques : dimensions des cylindres, écartements maximum -Mécaniques : force de laminage, vitesse

- Energétiques : puissance d'entrainement, couple

La force ou pression de laminage F (N) que doit supporter le laminoir par réaction durant la déformation du métal, est donnée par la formule approchée :

$$F = kl\sqrt{D(E-e)/2} \qquad \text{(I.1)}$$

Avec,

k : résistance à la déformation (N/mm^2)

l : largeur du produit (mm)

E : épaisseur du produit à l'entrée, e: épaisseur à la sortie (mm)

D : diamètre des cylindres de travail (mm)

I.2.1.2. Types de Laminage

I.2.1.2.1. Laminage à chaud

Le laminage de dégrossissage de l'acier se fait sur un « laminoir blooming ».

On part du lingot, dont le type courant correspond à une section carrée de 700 x 700 mm à l'extrémité la plus épaisse et une hauteur de 2 m à 2,3 m et qui pèse environ 6 t. Ce lingot après homogénéisation de la température au four Pits, à 1 100-1 200 °C est soumis au laminoir

blooming à une pression verticale qui à la fois l'allonge et l'élargit. Sur un laminoir blooming moderne, les cylindres ont une table de 1 m à 1,20 m de diamètre et une longueur de 2,50 à 3 m ; la vitesse de rotation est lente : 150 tr/mn ; les produits obtenus sont appelés « blooms », à section carrée, ou « brames », à section rectangulaire. Les premières cannelures du blooming comportent des saillies qui s'impriment dans le bloom et facilitent l'engagement aux passes suivantes. Les dimensions courantes des blooms varient entre 100 x 100 et 250 x 250 mm ; les brames destinées à la fabrication des tôles moyennes ont 500 x 80 mm (figure I.5).



Figure I. 5 Laminage à chaud [9].

I.2.1.2.2. Le Laminage à froid

Le laminage à froid s'applique à la fabrication des tôles minces et des feuillards en tous métaux :

Acier, cuivre, laiton, aluminium, zinc. Il tend à se faire de plus en plus en continu ; de chaque laminoir réversible, se trouve placé un dévidoir sur lequel s'enroule se déroule alternativement la bande de métal. Un système de réglage de l'écartement des cylindres permet de faire varier l'épaisseur de la bande laminée. Une traction et un freinage sont souvent exercés en amont et en aval de la bande. Le laminage à froid de l'acier nécessite des pressions considérables (figure I.6), ce qui exige des cages très robustes et des cylindres très rigides pour

éviter les flexions et obtenir une épaisseur uniforme du produit avec une tolérance pouvant atteindre ± 0,02 mm pour une épaisseur de 2 mm.



Figure I. 6 Laminage à froid [10].

I.2.2. Le Pliage

Le pliage permet l'obtention de pièces développables dont les plis sont obligatoirement rectilignes. Il est effectué par une ou plusieurs opérations successives sous l'action d'une force exercée sur la pièce. Plier une tôle, c'est relever une partie de cette tôle de façon à former un angle dont l'arête est rectiligne et plus ou moins arrondie.

Les deux plans de la tôle qui forme un angle α que l'on appelle angle dièdre. Les longueurs L1 et L2 qui portent le nom de parties droites Le pliage permet d'obtenir des déformations plastiques localisées d'un flan préalablement découpé (figure I.7).

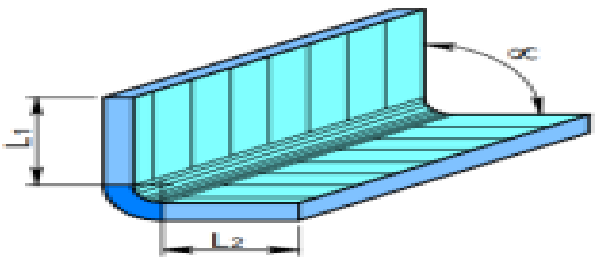


Figure I. 7. Déformations plastiques localisées [11].

Le pliage s'obtient par un effort de flexion provoquée sur toute la longueur du pli soit manuellement ou mécaniquement.

I.2.2.1. Pliage manuel

Il est réalisé à l'aide d'une plieuse universelle manuelle (figure I.8). Cette machine est utilisée pour les petites séries, elle permet des pliages assez complexes pour des tôles de dimension importantes, avec une qualité et précision moyenne.

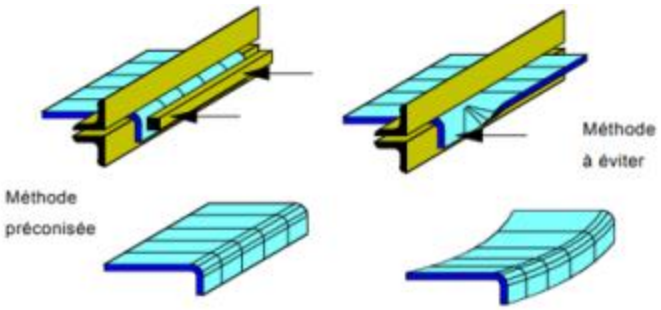


Figure I. 8 Pliage manuel [11].

I.2.2.2. Pliage mécanique

La presse-plieuse est une machine qui applique les lois de la flexion pour plier des tôles (figure I.9). Les tôles sont placées sur une matrice (ou vé), appuyée contre des butées réglées auparavant. En actionnant une pédale, l'opérateur fait descendre le poinçon (ou contre-vé) et va grâce à une force, plier la tôle jusqu'à un degré choisi. Les réglages s'effectuent en fonction de l'épaisseur, du matériau, des longueurs à plier et des outils choisis. Les limites des presse-plieuses sont surtout la longueur de pliage et la force de pliage.

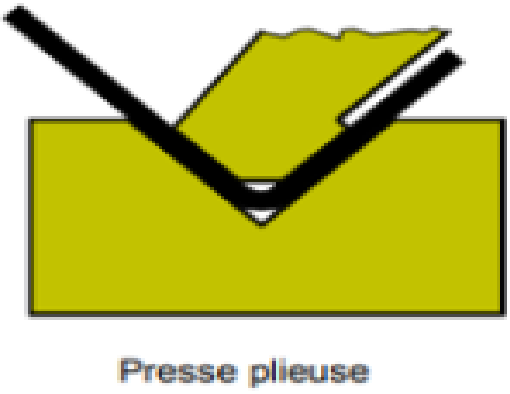


Figure I. 9 Pliage mécanique [11].

Il existe deux techniques de pliage :

- **Pliage en frappe**
- **Pliage en l'air**
-

I.2.3. Emboutissage

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique à froid des métaux (tôle). Il transforme une feuille appelée flan en une surface généralement non développable. Il est effectué sur une presse au moyen d'un outillage qui comprend deux pièces principales : le poinçon et la matrice. Le poinçon a la forme intérieure de la pièce à obtenir et la section de la matrice est semblable à celui du poinçon. Pendant l'opération d'emboutissage, le flan est exposé à la fois aux forces radiales et tangentielles ou de combinaison variable.

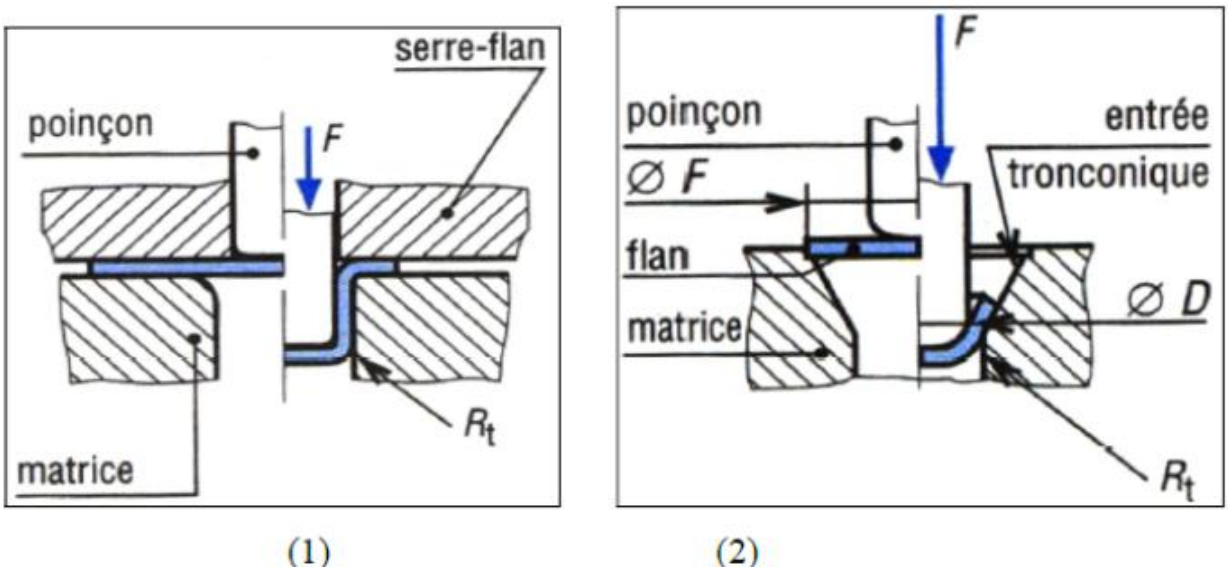


Figure I. 10 *(1)* Emboutissage avec serre flan (2) Limitation aux embouties de faible hauteur [11].

Un flan est posé sur la matrice, le Poinçon descend, l'emboutissage commence (figure I.10). Si sur le flan, on trace des lignes concentriques équidistantes, on remarque que pendant l'emboutissage chacune de ces lignes se raccourcit jusqu'à ce que sa longueur devienne égale au périmètre de la matrice. Plus les cercles concentriques, équidistants sur le flan, sont éloignés du fond de l'embouti plus la distance qui les sépare alors est grande (figure I.11.a). Cependant au cours de l'opération, les lignes tendent à conserver leur longueur initiale et à former des plis (figure I.11.b). Ces plis se résorbent si le flan n'est pas trop grand (voir F. 43 : emboutissage sans serre-flan). Si le flan est grand, les plis sont très prononcés (ils peuvent même parfois se recouvrir) et ils entraînent alors la rupture de l'embouti (figure I.11.c). Il faut donc empêcher la formation des plis : c'est le rôle du serre-flan.

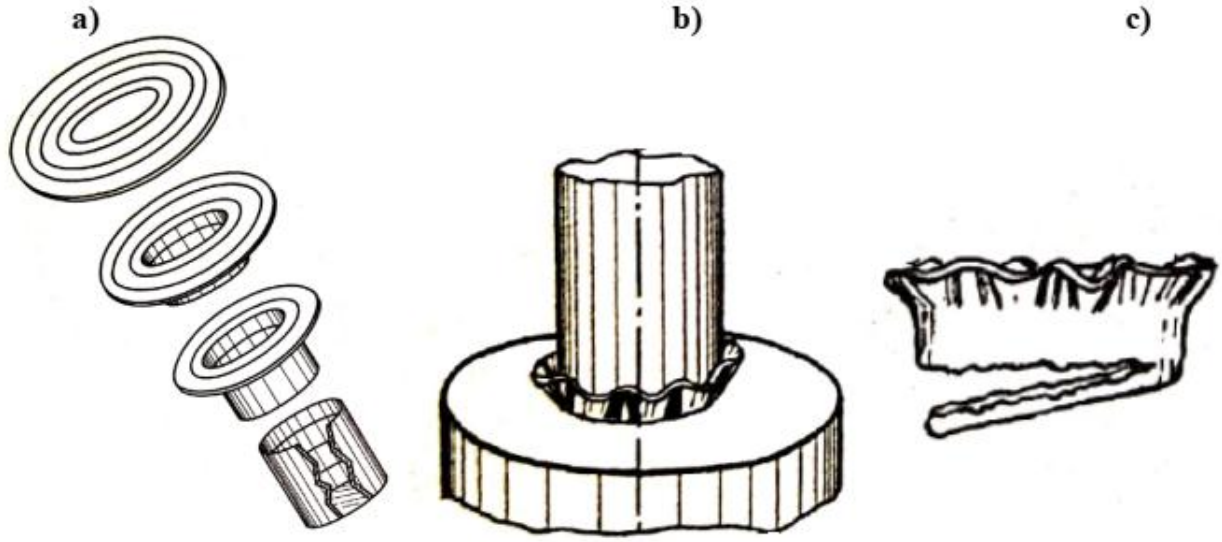


Figure I. 11 Processus de l'emboutissage [11].

I.2.3.1. Type des procédés d'emboutissage

Il existe deux procédés d'emboutissage suivant la forme de pièce à obtenir :

- Emboutissage en expansion
- Emboutissage en rétreint

I.2.4. Cintrage

Le cintrage des tôles ne nécessite pas une capacité de déformation importante. Par exemple, le cintrage d'une tôle d'épaisseur 50 mm au rayon de 250 mm engendre une

déformation maximum de 10 %. L'aptitude au cintrage ne demande pas une caractérisation particulière. Cette analyse n'est plus exacte pour les tôles de très forte épaisseur (100 à 250 mm) pour lesquelles il y a un risque de rupture brutale au cours du cintrage. La rupture s'amorce à partir de défauts existants dans l'épaisseur ou en surface de la tôle. Les bords découpés de la tôle sont des zones particulièrement dangereuses du fait de la fragilisation introduite par le découpage. Connaissant la valeur critique du facteur d'intensité de contrainte d'une tôle et les dimensions des défauts, la mécanique linéaire de la rupture permet d'évaluer le risque de rupture au cours du cintrage et de l'éviter par un formage à chaud ou à tiède par exemple.

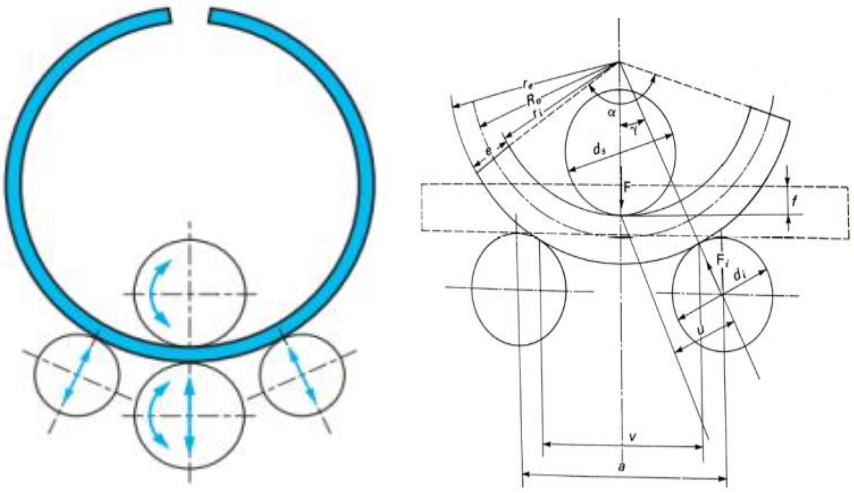


Figure I. 12 Paramètres géométriques du cintrage [11].

I.2.5. Le Repoussage

I.2.5.1. Le Repoussage au tour

Le repoussage au tour à repousser se caractérise par l'action d'un galet qui déforme progressivement un flan circulaire pour lui faire épouser la forme d'un mandrin (figure I.13). Le flan est appliqué contre le mandrin par l'action d'un disque presseur ou d'une contre-pointe. L'ensemble est entraîné en rotation. Cette opération est effectuée à froid ou à chaud. Ce procédé est employé pour le formage de pièces de révolution. L'épaisseur initiale du flan est approximativement conservée sur la pièce. Pour le formage d'une calotte sphérique ou de la salière (pôle) d'un fond torisphérique, on travaille en fluoprojection ; il y a un amincissement local tel que :

$$e_1 = e_0 \cos \alpha \quad \text{(I.2)}$$

Avec
e_0 : épaisseur initiale,
e_1 : épaisseur finale,
α angle au centre définissant la position du point considéré par rapport à l'axe de la pièce

Il faut noter que la fluoprojection est une opération de formage au galet sur un tour à repousser

muni d'un mandrin ayant la forme de la pièce à réaliser. Il s'agit d'un procédé proche du repoussage. La différence principale est le fait que la pièce soit réalisée en une seule opération (un seul coup d'outil). Contrairement au repoussage où la réalisation de la pièce à partir du flan en tôle nécessite plusieurs passes, la fluo projection (ou le fluotournage) doit être réalisée en une seule opération. L'épaisseur du flan peut être réduite volontairement pour obtenir la pièce finale. En repoussage, l'épaisseur du flan n'est pas réduite volontairement. L'épaisseur finale de la pièce dépend de la ductilité du matériau de la tôle et des déformations locales appliquées en fonction des formes géométriques réalisées. En chaudronnerie, on utilise le repoussage pour former des calottes sphériques et des fonds bombés de formes elliptique, torisphérique ou hémisphérique. Ce procédé est utilisé pour des petites et moyennes séries. L'outillage est trois à cinq fois moins complexe et moins cher que pour l'emboutissage. Le temps de formage est plus court que pour l'emboutissage au coup par coup (dans le cas où il est applicable).

L'outillage est constitué d'un mandrin et d'un galet de formage (figure I.13). Le mandrin, en acier ou en fonte, a la forme intérieure de la pièce à réaliser. Il faut un mandrin pour chaque pièce à former. Pour former des fonds torisphériques de même type et de même diamètre extérieur mais d'épaisseur variable, il est possible d'utiliser un mandrin en deux parties. Seule la partie correspondant au rayon de carre est changée pour former des épaisseurs différentes.

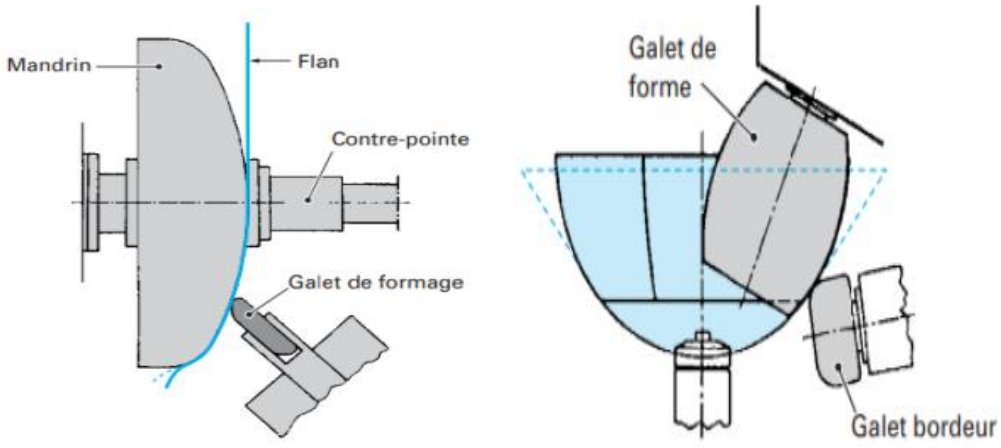


Figure I. 13 Repoussage au tour [11].

I.2.5.2. Repoussage sur machine à former les bords

Il s'agit d'une technique de formage spécifique aux pièces de révolution présentant un bord arrondi. Le bord est formé par l'action d'un galet bordeur qui vient repousser la tôle contre un galet qui a la forme du bord à réaliser (figures I.14). L'entraînement est assuré par le galet de forme. La vitesse de rotation est réglable en fonction du rayon de carre, du diamètre et de l'épaisseur de la pièce. Pour les grands rayons de carre, le formage est réalisé en plusieurs passes.

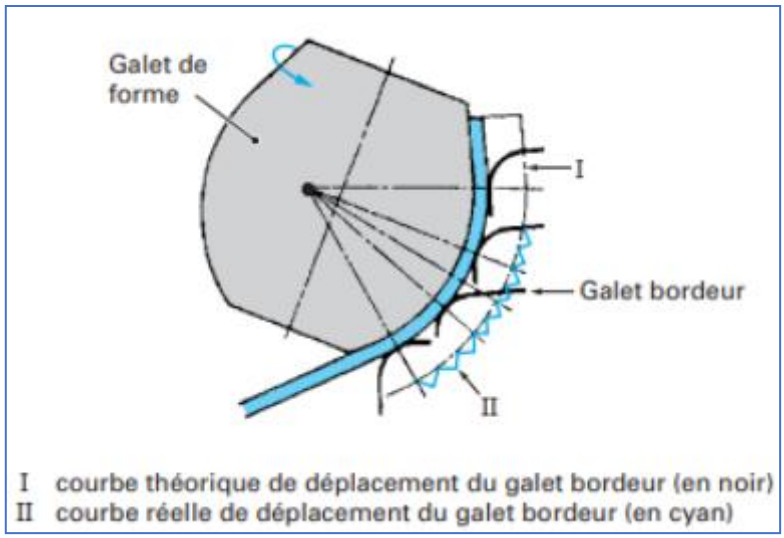


Figure I. 14 Formage sur une machine à former les bords, à avance manuelle [11].

I.2.5.3. Outillage

Il est constitué d'un mandrin et d'un galet de formage (figure I.15). Le mandrin, en acier ou en fonte, a la forme intérieure de la pièce à réaliser. Il faut un mandrin pour chaque pièce à former. Pour former des fonds torisphériques de même type et de même diamètre extérieur mais d'épaisseur variable, il est possible d'utiliser un mandrin en deux parties. Seule la partie correspondant au rayon de carre est changée pour former des épaisseurs différentes.

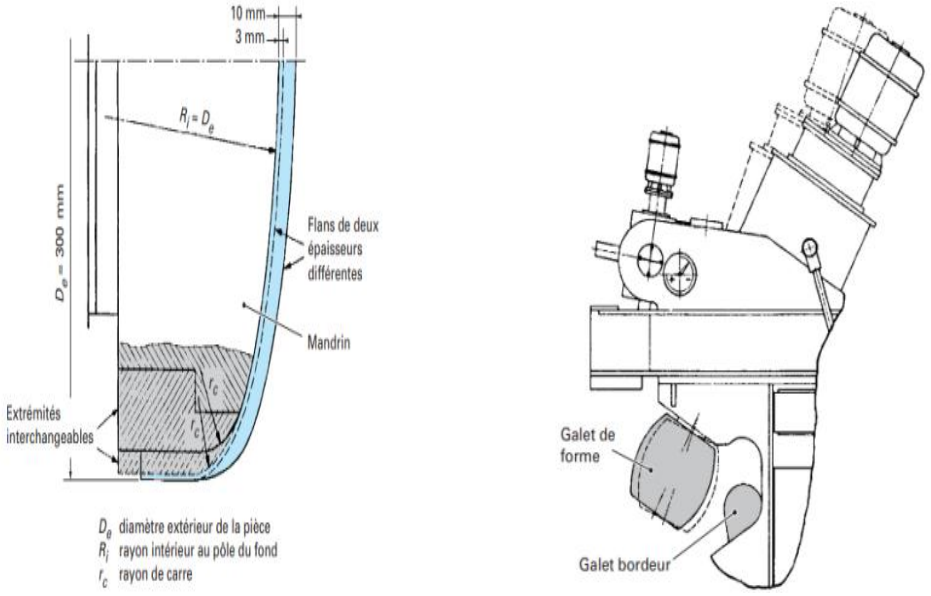


Figure I. 15 a) Mandrin à extrémité interchangeable pour le repoussage de fonds bombés torisphériques, b) Machine avec galet de forme pivotant pour corriger la forme du rayon de carre [11].

Pour former les tôles fortes, on emploie un galet libre en rotation qui limite le frottement entre

l'outil et le métal. Le galet est en acier ou en fonte alliée. Pour diminuer le marquage de l'outil sur la pièce, on peut utiliser soit des galets en matière synthétique pour former les alliages d'aluminium, soit des galets en bronze pour former les aciers inoxydables.

I.2.6. Formage par explosion

Le principe consiste à déformer une pièce en utilisant l'énergie libérée par la détonation d'une

charge explosive et transmise par un fluide. Généralement, le flan à former est monté sur une matrice avec un serre-flan, le tout étant immergé dans une fosse d'éclatement de grande dimension remplie d'eau (par exemple fosse de diamètre 12 m et de profondeur 10 m). On peut effectuer le formage en matrice fermée (fig. I.16.a), en matrice ouverte (fig. I.16.b) ou sans matrice. La pièce formée est obtenue à partir d'un flan plat, d'une préforme constituée d'éléments soudés ou d'un tube. Le calcul de la charge explosive se fait à partir du calcul de l'énergie nécessaire à la déformation du flan.

La détonation de l'explosif donne naissance à une onde de choc qui se propage dans l'eau, pénètre dans le flan et lui communique une puissante impulsion. Si l'on opère sur une matrice

fermée, la déformation de la pièce s'arrête brusquement lorsqu'elle entre en contact avec le contour de la matrice a, Avec une matrice ouverte, le mouvement de la pièce prend fin lorsque la totalité de l'énergie cinétique acquise a été consommée par la déformation.

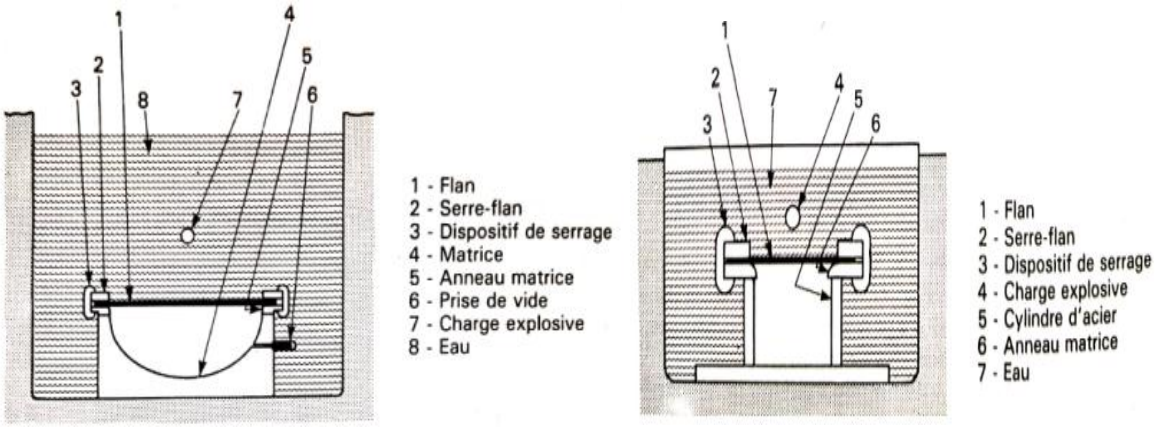


Figure I. 16 Formage par explosion a) en matrice fermée, b) en matrice ouverte [11].

Ce procédé est rentable pour les petites séries de 2 à 10 pièces. Les prix de revient à l'unité sont d'autant plus compétitifs que la série est faible et que les dimensions sont importantes. Dans ce domaine de production, on fait appel au formage par explosion lorsqu'une ou plusieurs des conditions suivantes sont remplies :

- Tolérances dimensionnelles très faibles : en matrice fermée, sur une pièce de 1 m de diamètre, on obtient une précision de 0,1 à 0,7 mm avec des alliages d'aluminium, de 1 à 3 mm avec des aciers à haute limite d'élasticité, - temps de réalisation d'un outillage plus court que pour un outillage classique, pièce de forme non normalisée ou sans symétrie axiale : tore non symétrique, forme à multiples rayons de courbure,
- métal de faible formabilité : acier réfractaire. On utilise ce type de formage dans l'industrie aéronautique, la construction navale et la chaudronnerie. Les épaisseurs formées vont couramment jusqu'à 40 mm pour les alliages d'aluminium et 15 mm pour les aciers. En construction navale, on cite dans la littérature des cas de formage de tôles jusqu'à 100 mm d'épaisseur.

I.2.7. Le découpage

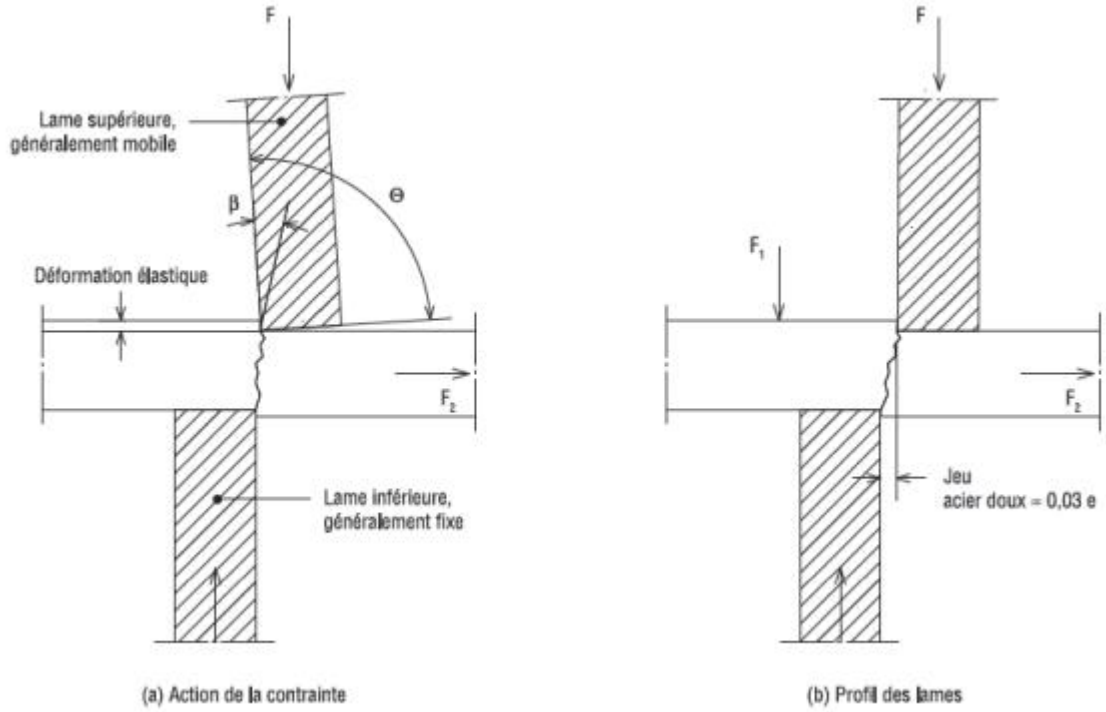
Le découpage de tôles est une opération courante réalisée par les entreprises de la mécanique pour produire des pièces métalliques à partir de tôles. Son but est de séparer partiellement ou complètement des zones de la tôle de façon à obtenir la forme voulue et/ou de les préparer pour d'autres opérations comme le pliage ou l'emboutissage. Pour les moyennes et grandes séries, le découpage à la presse est le procédé de découpage des tôles le plus ancien et

reste encore, et de loin, le plus productif. La plupart des pièces métalliques qui composent une automobile sont découpées selon ce procédé : les pièces visibles, dites d'aspect (capots, ailes, côtés de caisse, haillons...), et plus ou moins cachées de la structure (longerons, pieds milieu, charnières, colonnes de direction...). Ce procédé est également utilisé dans les secteurs de la quincaillerie (rondelles, mécanismes de portes et fenêtres...), de l'électroménager (tambours de machines à laver, capotages...), du bâtiment (caillebotis, pièces d'échafaudage...), des composants électriques et électroniques (boîtiers d'autoradios, connexions, supports de circuits imprimés...). La plupart du temps, le découpage accompagne une opération de formage comme l'emboutissage ou le pliage. Dans certains cas, c'est la seule ou la principale opération réalisée (cas des rondelles ou des pièces plates de connectique).

I.2.7.1. Découpe par Cisaillage

On réalise la séparation totale ou partielle d'un élément métallique à l'aide de deux lames dont l'une au moins est mobile (Fig. I.17). Sous l'action de la contrainte imposée par la partie active des lames, une déformation élastique se produit, puis un glissement avec décohésion du métal suivant 2 directions formant un angle. Cet angle, ainsi que la profondeur de décohésion varient suivant la nuance du métal et son état.

• $\beta = 6°$ pour les aciers doux et est légèrement diminué par l'affûtage ($50° < \theta < 90°$) suivant la dureté du métal à cisailler.



(a) Action de la contrainte (b) Profil des lames

Figure I. 17. Principe de cisaillage [11].

- **Mécanismes du découpage**

Le découpage à la presse suit un mécanisme différent de celui des autres procédés de découpage
(thermique et abrasif). C'est un procédé purement mécanique, réalisé sans apport de chaleur et engageant un mécanisme de cisaillement de la tôle. On distingue habituellement trois phases dans l'opération de découpage :

– **phase 1** : indentation du poinçon dans la tôle. Le poinçon, qui commence à pénétrer dans la tôle, crée un bombé à l'entrée du bord découpé ; – **phase 2** : cisaillement plastique. Le poinçon commence à créer une surface sur le bord découpé, parallèle au flanc du poinçon. Cette surface est d'aspect lisse ; – **phase 3** : rupture. Avant que le poinçon n'ait traversé complètement l'épaisseur de la tôle, une fissure s'initie au niveau des arêtes de coupe de l'outil. Ces fissures se rejoignent rapidement pour créer la rupture. La zone correspondante du bord découpé est appelée « zone arrachée ».

On distingue deux types de cisaillages :

- Le mode de cisaillage avec des lames parallèles ;

- Le cisaillage avec des lames obliques.

I.2.7.2. Découpe par Poinçonnage

Le poinçonnage consiste à forcer un poinçon à travers le métal. Il se détache de la pièce un morceau de forme vaguement tronconique appelé débouchure ou riblon (Fig. I.18). La forme irrégulière du trou oblige à percer à un diamètre de 1 à 2 mm supérieur au passage d'un rivet ou d'un boulon qui doit le traverser.

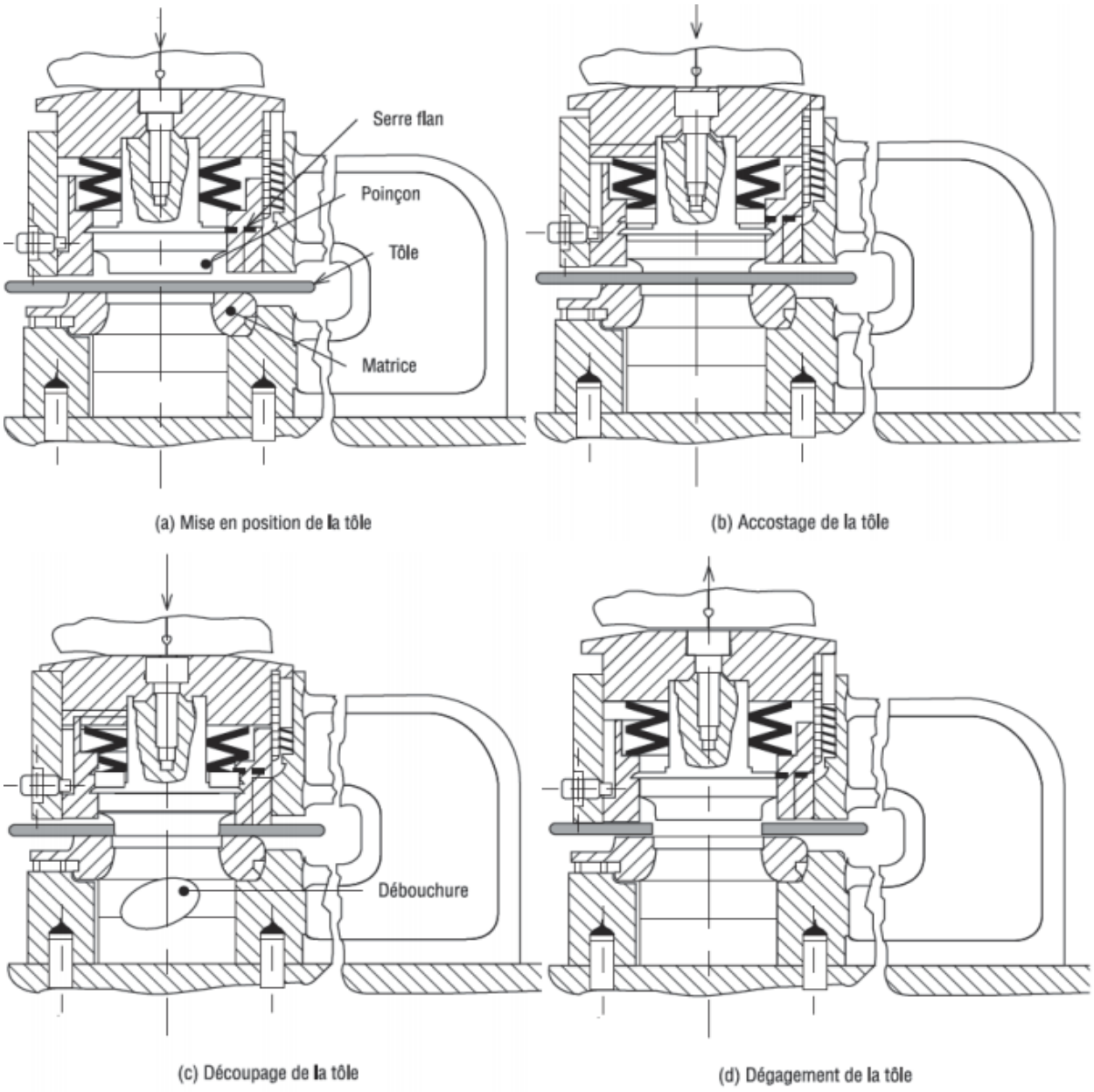


Figure I. 18. Principe du poinçonnage [11].

I.2.8. Forgeage

Consiste à déformer, par choc ou par pressage entre deux outils, une masse métallique rendue malléable par chauffage. Aussi, par définition, le forgeage est un procédé de mise en forme des métaux par déformations plastiques à chaud ou à froid. On chauffe le métal (fours) à une température convenable afin que le métal devienne malléable et forgeable. Le métal est appelé « Lopin » de volume calculé. Le forgeage manuel : C'est le forgeage traditionnel à l'enclume et l'outillage de frappé à main [12].

Le matriçage et l'estampage sont deux termes synonymes. C'est un procédé de fabrication mécanique exécuté par les presses sur lesquelles sont fixées des « matrices ». Il permet de produire des grandes séries de pièces.

I.2.8.1. Type de forgeage

Il existe deux types de forgeage qui sont le forgeage à chaud (fig. I.19.a) et le forgeage à froid (fig. I.19.b):

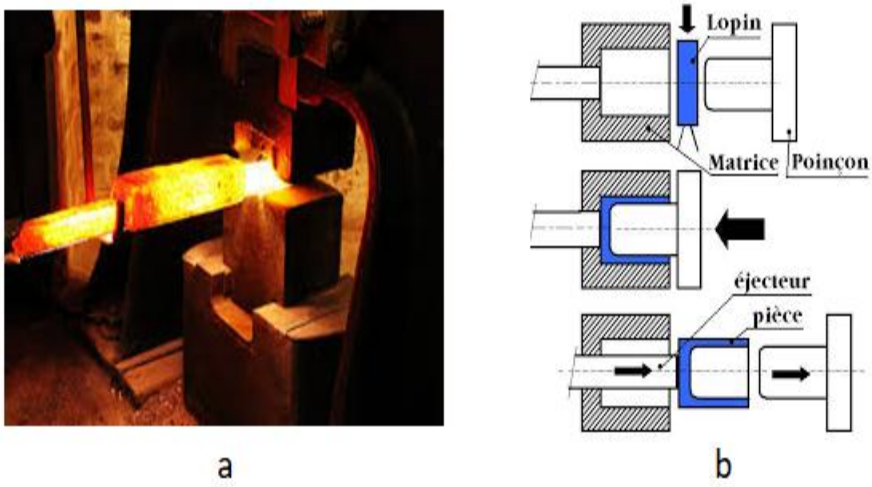


Figure I. 19 de Forgeage : a) à chaud, b) à froid [13].

I.2.9. Estampage

La mise en forme de l'acier par déformation plastique à chaud est un procédé industriel d'obtention de pièces mécaniques, aussi appelé : forge par estampage. Il est utilisé aussi bien en petites qu'en moyennes et qu'en très grandes séries de pièces, dont la masse peut varier de quelques grammes à plusieurs centaines de kilogrammes. La pièce ainsi fabriquée porte le nom « d'avant-produit », ce qui la situe entre les « demi-produits » fabriqués en sidérurgie (par exemple les blooms, les barres ou les billettes) et les « produits » prêts à être montés dans un sous-ensemble ou un ensemble mécanique (par exemple une bielle dans un moteur thermique ou un pignon dans une boîte de vitesse). La fabrication consiste à chauffer à haute température, environ 1 250 °C, un morceau de demi-produit d'une géométrie bien déterminée, appelé « lopin », puis de le placer entre des outillages appelés « matrices », dans lesquels est usinée en creux une « gravure » qui représente exactement la forme de l'avant-produit brut à obtenir. Une machine-outil d'estampage agissant par choc ou par pression exerce sur les outillages une force telle que le lopin est contraint d'épouser les formes de la gravure. Généralement, sur la périphérie

de la gravure, dans l'outillage on usine aussi un cordon de matrice qui va former à la périphérie de la pièce estampée, un « cordon de bavure ». Cette bavure permet la maîtrise de la géométrie de la pièce finie et le cordon, qui ceinture la pièce, est ôté, le plus souvent à chaud, par cisaillage sur une machine-outil annexe appelée « presse d'ébavurage ». La pièce brute ébavurée peut subir un traitement thermique qui lui est appliqué en fonction des caractéristiques mécaniques à obtenir. Le parachèvement est souvent composé d'un grenaillage et d'un calibrage à froid.

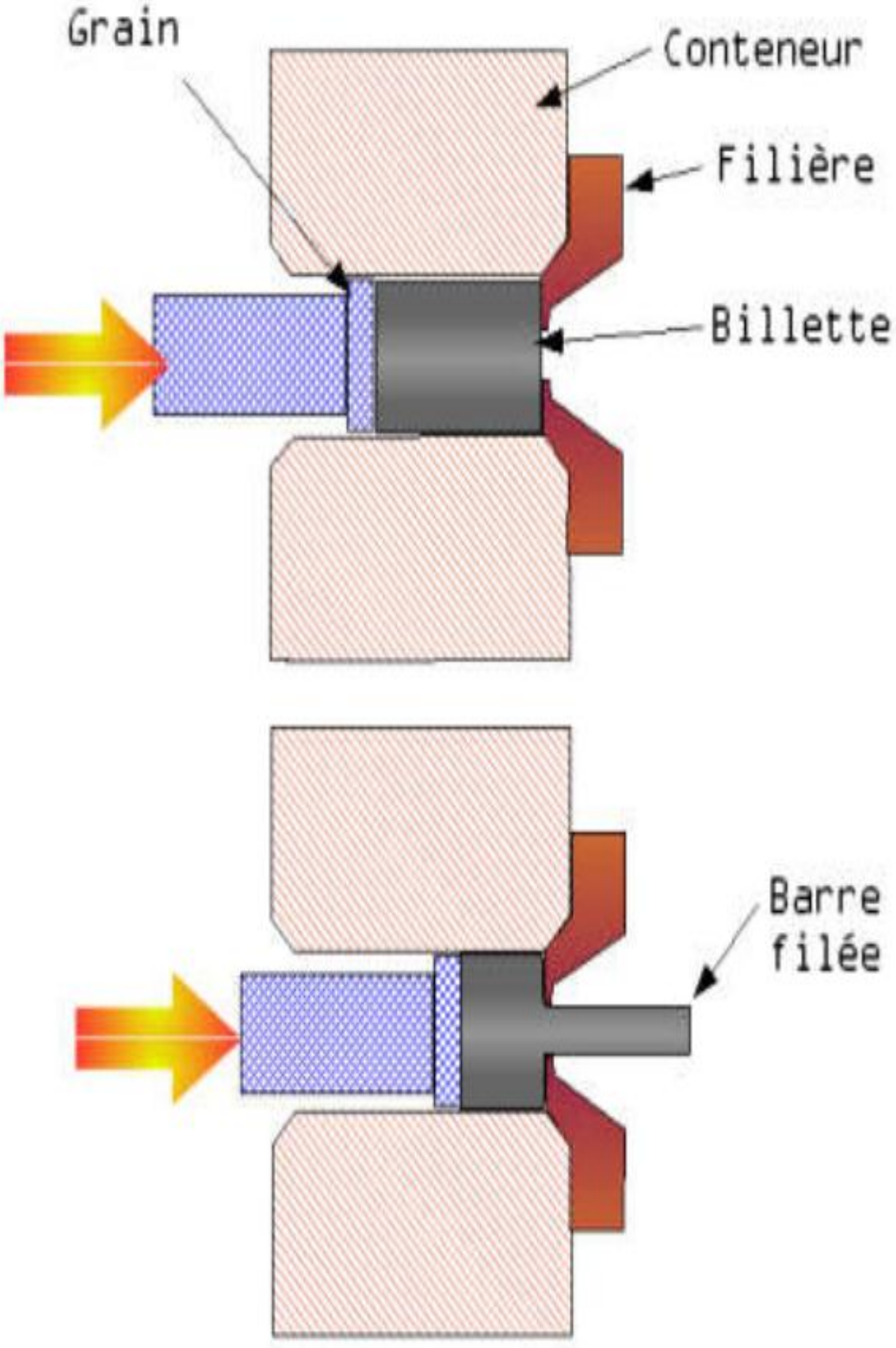


Figure I. 20. Déroulement d'une opération d'estampage [14].

I.2.9.1. Déformation plastique en estampage

Pour faire de la déformation plastique, il faut que l'effort exercé sur le lopin engendre dans la pièce un état de contrainte vérifiant le critère de plasticité, à savoir que la contrainte généralisée soit égale à la contrainte d'écoulement du métal. La figure I.21, montre les pièces en composites estampées peuvent être co-injectées [14] afin de réaliser des nervures ou des surmoulages.



Figure I. 21. Pièce composite estampée et co-injectée [14].

Le lopin subit une déformation plastique plus une déformation élastique, ainsi qu'un retrait et une contraction lors de son refroidissement ; tandis que la gravure de l'outillage ne subit qu'une déformation élastique et une petite dilatation due à l'échauffement pendant le travail (300 °C environ). Il faut prendre en compte toutes ces données pour obtenir des pièces brutes aux cotes souhaitées à l'intérieur des tolérances dimensionnelles définies par les normes.



Figure I. 22. Exemples de pièces estampées [14].

CHAPITRE II : PARAMETRES INFLUENÇANT LE PROCEDE D'ESTAMPAGE A CHAUD

II.1. Introduction

Dans un système de mise en forme à chaud des pièces métalliques par forgeage. La variance et la cadence des pièces à obtenir sont très contrariantes. En effet, aussi bonne est la sûreté de fonctionnement des équipements, ils présentent une spécificité dans les outillages de production. Ces derniers ont la particularité d'être soumis simultanément à des sollicitations intenses d'origine thermiques et mécaniques. Il y a très peu d'applications industrielles qui réunissent sur un même composant des conditions de travail aussi sévères [15]. De plus pour chaque pièce à forger, Il faut concevoir, fabriquer, calibrer et aligner son outillage composé de matrices supérieure et inférieure dont lesquelles sont réalisées les empreintes de la pièce à fabriquer. Ainsi, l'outillage représente couramment 10 à15 % des coûts de fabrication des pièces et même plus quand les paramètres d'entrée de mise en forme ne sont pas respectés. Par ailleurs, la gestion de la durée de vie des outillages est un problème critique dans toutes les entreprises de forgeage à chaud, particulièrement en matriçage. Et compte tenu de l'importance des coûts des outillages, les forges sont le plus souvent dotées d'un atelier de préparation et de maintenance de ces outillages. Une bonne compréhension des difficultés auxquelles doivent faire face les forgerons ainsi que la recherche des solutions nouvelles plus performantes, nécessitent de prendre en compte :

- La nature du matériau à déformer (les propriétés chimiques et mécaniques, variance)

- La nature et le niveau des sollicitations supportées par les outils

- Les modes d'endommagement qui en résultent

- Les caractéristiques des matériaux d'outillage, des traitements et revêtements superficiels, ainsi que leur évolution avec la température de service des outils

- Les exigences de coût, de délai, de qualité, spécifiques à chaque application.

II.2. Le procédé de Forgeage

II.2.1. Définition de forgeage

Le forgeage regroupe des méthodes visant à créer une pièce mécanique en exerçant une forte pression sur un morceau de métal, à température ambiante ou élevée, pour le façonner selon la forme désirée. Il nécessite un dispositif de frappe (marteau, masse, martinet ou pilon) et un support (enclume ou matrice). Il n'offre pas la même exactitude que l'usinage, mais est employé pour des éléments nécessitant une grande solidité (boulonnerie, outillage).

Cependant, les pièces montrent une bien meilleure résistance aux efforts mécaniques, car la déformation de la matière engendre des phénomènes physiques bénéfiques, tant à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique.

Ce processus permet de transformer une pièce de formes géométriques simples (souvent un billet provenant de laminage) en une pièce aux formes géométriques externes complexes.

Dans la majorité des techniques de forgeage, la matière de la pièce est chauffée à l'état chaud. D'après les procédés de forgeage, la plage de température varie entre 650°C (pour prévenir l'apparition de fissures pendant les déformations) et 1100°C (température en dessous de celle de fusion).

Les particularités du forgeage sont :

Le matériel déformé ou lopin subit une déformation plastique significative, entraînant un changement marquant de forme ou de section.

La portion déformée plastiquement est généralement plus importante que celle déformée élastiquement ; par conséquent, on ignore la reprise élastique après la déformation.

II.2.2. Type de forgeage

Il existe deux types de forgeage qui sont le forgeage à chaud et le forgeage à froid :

II.2.2.1. Le forgeage à chaud

Pièce de métal chauffé à haute température puis formé par compression dans un moule (figure II.1). La pièce est refroidie très rapidement pour augmenter sa rigidité.

Effectivement, les molécules encore en mouvement on encore des relations entre elles et lors du refroidissement les molécules sont figées instantanément avec encore leur liaison. La pièce forgée est ébavurée de son oxyde de fer suite à son échauffement (souvent avec du sable). La pièce est ensuite polie pour enlever toutes les imperfections.

Cependant la forge à chaud reste le seul procède de fabrication de haute qualité à même de produire des formes complexes des composants lourds et des alliages à haut rendement [16].



Figure II. 1 Le Forgeage à chaud [17].

Il existe deux types de forgeage qui sont le forgeage à chaud :

II. 2.2.1.1. Forgeage libre

L'outil est alors un marteau pilon. La pièce à l'état chaud est positionnée entre deux enclumes de matériaux ferreux ou non ferreux et frappée par l'outil (figure II.2). Ce procédé de forgeage permet une mise en forme précise, une mise au diamètre, la réalisation d'un épaulement.

Ce procédé s'applique à la réalisation de produits unitaires ou en petites séries, de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes, de forme géométrique généralement simple. Dans la mesure où les outillages de préforme sont utilisés, ils laissent à la déformation du métal deux degrés de liberté. Ce procédé qui ne nécessite pas d'outillage spécifique, est utilisé pour la réalisation des pièces à l'unité ou en très petites séries par exemples des arbres de turbines ou des cuves de réacteur [18].



Figure II. 2 Le forgeage libre [19].

II. 2.2.1.2. Forgeage par estampage

Procédé que permet de réaliser dans des amatrices reproduisant la forme recherchée à l'usinage prés de pièces on acier ou on alliage de nickel ou en alliage de cobalt.

Ce procédé s'applique à la réalisation de pièces de quelques grammes à cent kilogrammes (ou même quelquefois plus) en séries plus ou moins importantes mais suffisantes pour le lancement de la fabrication des matrices d'estampage. L'obtention de la pièce finale peut nécessiter plusieurs chocs entre les matrices [20].

II. 2.2.1.3. Forgeage par matriçage

Procédé analogue à l'estampage mais ce terme est employé de préférence dans le cas de l'aluminium, du magnésium du cuivre et de leurs alliages. Ce procédé s'applique à la réalisation de pièces de quelques grammes à quelques centaines de kilogrammes en séries identiques à celles de la forge par estampage.

II. 2.2.1.4. Forgeage par laminage circulaire

Procédé qui permet de réaliser des pièces en forme de couronnes comportant des profils pouvant être diversifié. Ces pièces peuvent être en matériaux ferreux ou non ferreux. Ce procédé s'applique à la réalisation de pièces de quelque kilogramme à quelque tonne, depuis l'unité jusqu'à la série illimitée. Le diamètre des couronnes peut varier de quelques dizaines de centimètres à plusieurs paramètres**.**

II.2.2.1.5. Extrusion à chaud

Procédé de forgeage qui permet de réaliser dans des outillages comprenant généralement un poinçon et une matrice des pièces de section non constante. Il s'applique à des pièces en acier ou en matériaux non ferreux.

II.2.2.2. Le forgeage à froid

Le forgeage à froid est un procédé par lequel on obtient une déformation d'une pièce sans chauffage préalable [21]. L'extrusion à froid encore appelée forge de précision est un procédé de forgeage à froid. Le coût des outillages et les machines très robustes imposent un usage orienté

pour la fabrication en série, dans le domaine de l'automobile, de la visserie, et de la quincaillerie en général.

Pièces creuses : s'apparente à l'emboutissage, mais à la place de tôle, on emploie des lopins qui sont des galettes en métal, généralement découpées dans un profilé cylindrique par tronçonnage ou cisaillage.

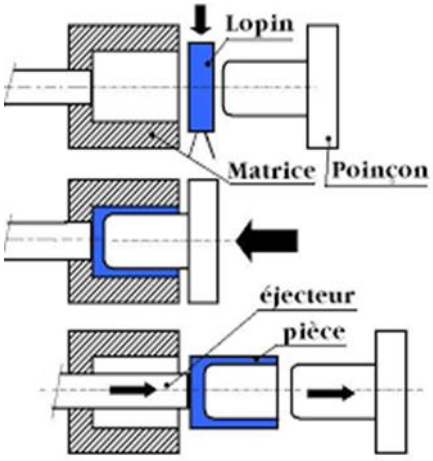


Figure II. 3 : forgeage à froid d'un lopin [22]

II.2.2.2.1. Type de forgeage à froid

II .2.2.2.1.1. Forgeage par extrusion

Procède de forgeage à température ambiante qui permet de réaliser dans des Outillages comprenant généralement un poinçon et une matrice, des pièces de section non constante. Le forgeage par extrusion s'applique à des pièces en acier ou en matériaux non ferreux.

II. 2.2.2.1.2. Frappe à froid

Procède de forgeage à température ambiante qui se distingue de l'extrusion par La nature de déformation et la vitesse d'impact (effet de choc). Ce procède s'applique pour des pièces de formes généralement cylindriques pleines ocreuses présentant un axe ou un plan de symétrie.

II.2.2.2.1.3. Emboutissage

Emboutissage, l'outil est alors un poinçon. La pièce brute, dans ce cas une tôle mince (d'épaisseur e < 10 mm), est mise en position sur une matrice et maintenue en position par un serre-flan. La déformation est obtenue par pénétration du poinçon et glissement au niveau du serre-flan.

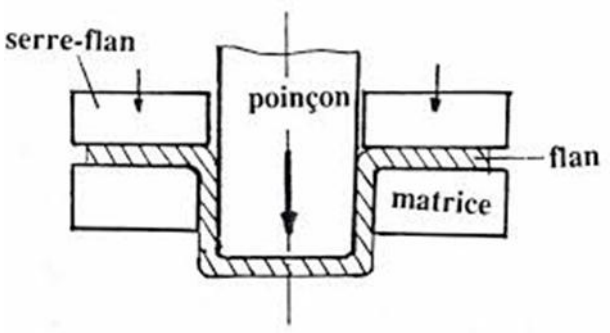


Figure II. 4 Formation de plis [22]

II.2.2.2.2- Propriétés des procédés de forgeage

Les matériaux utilisés lors des procédés de forgeage ont une bonne *ductilité.*

Cette caractéristique représente l'aptitude de l'alliage à se déformer de manière plastique. Dans le cas de l'estampage ou du matriçage, le forgeage est un 'étude

Procédé en concurrence directe avec le moulage (excepté dans le cas de pièces de formes intérieures complexes).

II. 2.2.2.3- Avantages des procédés de forgeage

- la déformation plastique engendre une orientation des fibres du matériau, (à poids égal, une pièce forgée est plus résistante qu'une pièce moulée)

- réduction des coûts d'usinage,

- gain de matière.

II. 2.2.2.4-Inconvénients des procédés de forgeage

- géométrie des formes intérieures limitée (poinçonnage uniquement),

- la qualité des surfaces obtenues (IT10 à IT8) nécessite la plupart du temps un usinage (cas des surfaces fonctionnelles),

- cas de forge libre : une grande qualification des ouvriers est requise pour la réalisation de pièces complexes,

- cas de l'estampage et de l'emboutissage : la série doit être suffisante pour justifier l'investissement des outils, l'ébavurage est nécessaire en sortie de forgeage.

II.3. Estampage

II. 3. 1.Généralité

La mise en forme de l'acier par déformation plastique à chaud est un procédé industriel d'obtention de pièces mécaniques, aussi appelé : forge par estampage. Il est utilisé aussi bien en petites qu'en moyennes et qu'en très grandes séries dépièces, dont la masse peut varier de quelques grammes à plusieurs centaines de kilogrammes. La pièce ainsi fabriquée porte le nom « d'avant-produit », ce qui a situé entre les « demi-produits » fabriqués en sidérurgie (par exemple les blooms, les barres ou les billettes) et les « produits » prêts à être montés dans un sou ensemble ou un ensemble mécanique (par exemple une bielle dans un moteur thermique ou un pignon dans une boîte de vitesse).

L'estampage industriel consiste à déformer plastiquement les aciers (sans revenir à la forme d'origine) grâce à des outillages nommés "matrices" installés sur des presses (hydraulique, mécanique, à vis) ou des marteaux pilons. Ce procédé de forgeage à chaud peut se faire en plusieurs opérations, dont les premières sont appelées ébauches, et la dernière finition.

Les ébauches permettent de répartir le métal, partant le plus souvent d'une forme cylindrique ou parallélépipédique, jusqu'à une forme se rapprochant de la finition. La dernière ébauche présente une dimension verticale plus importante et des dimensions horizontales moins importantes de quelques millimètres au maximum par rapport à la finition, permettant un forgeage sans pertes d'énergie dû au frottement sur les parois de l'empreinte. L'ébauche présente également des angles plus arrondis que la finition. En effet, les angles sont les endroits les plus difficiles à remplir de matière en forge.

La finition termine la déformation de la matière. Le résultat comprend la pièce brute et la bavure. Cette dernière est un excédent de métal que l'on retrouve tout autour de la pièce et qui assure un bon remplissage de l'empreinte. La bavure est ensuite séparée de la pièce brute grâce à

un autre procédé de forge : l'ébavurage L'estampage est suivi par divers procédés de traitement thermique, comme le recuit, la trempe et le revenu.

Le principal d'intérêt de l'estampage face à la fonderie est une mise en forme de la structure interne de l'acier, conduisant à des caractéristiques mécaniques supérieures. La fonderie ne permet pas cette déformation interne car la structure de l'acier apparaît lors de la transition entre les phases liquide et solide.

L'estampage est une technique similaire au matriçage. La différence entre ces deux procédés est l'utilisation de métaux différents. L'estampage se concentre sur le forgeage des aciers, composés principalement de fer, et le matriçage sur le forgeage des métaux non-ferreux.

La matrice inférieure est une pièce fixe, tandis que la partie supérieure est un pilon mobile qui vient frapper la pièce afin de la déformer. L'estampage peut être réalisé aussi bien à température ambiante qu'à une température plus élevée.

Semblable aux autres techniques de forge, l'estampage améliore les propriétés du matériau de la pièce finale. Machine d'estampage sont appelés des machines de chocs, les vitesses de déformations sont supérieures à 1m/s, les matrices sont jointives, les côtes sont données par l'outillage. Petites et les moyennes séries.

II.3.2. Définition d'estampage

Est un façonnage par déformation plastique d'un morceau de métal (lopin) à l'aide d'outillage (matrice) permettant de lui donner une forme et des dimensions très proches de celles de la pièce finie.

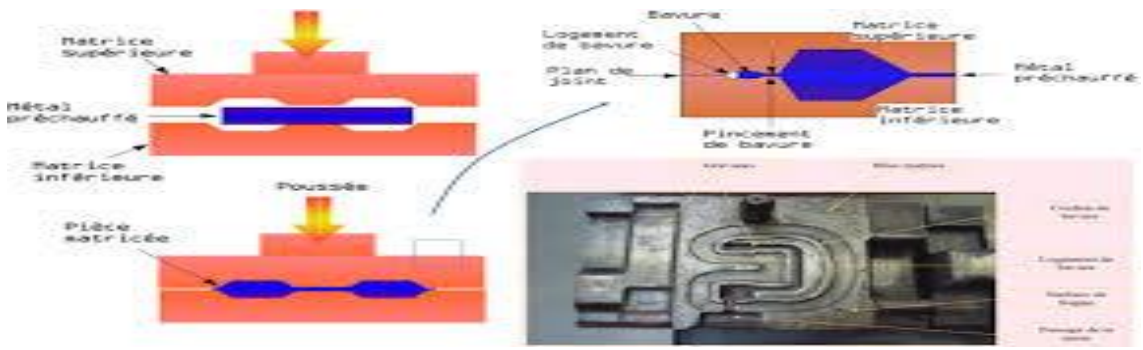


Figure II. 5 principes de l'estampage [23].

II.3.3. Techniques de fabrication

II.3.3.1. Débitage

Le volume de métal nécessaire pour faire la pièce est celui de cette dernière pièce auquel on a ajouté celui de la bavure et celui de la perte au feu. En fonction de la section du demi-produit (barres ou billettes), on calcule la longueur du lopin à obtenir. Ce dernier est généralement débité par cisaillage pour les sections inférieures à celles d'un carré de 150 mm de côté et par sciage

Pour les sections supérieures. L'opération de cisaillage (Figure .6) consiste à rompre le demi-produit qui est placé entre 2 lames, l'une fixe, l'autre mobile, coulissant l'une devant l'autre. Dans la majorité des cas, une empreinte correspondant à la forme à cisailler est usinée dans chacune des 2 lames. Le jeu entre les lames est réglable de sorte à avoir la coupe la plus perpendiculaire

Possible par rapport à l'arête du lopin. Le cisaillage présente l'avantage par rapport au sciage de s'effectuer à des cadences rapides et sans perte de métal. La précision de longueur, et donc de volume du lopin, est largement suffisante pour les opérations classiques. L'état de surface de la coupe est moins bon que celui du lopin scié, mais cela n'est pas du tout nuisible à l'obtention de pièces longues ou de pièces rondes débouchées. On peut, en prenant certaines précautions de réglage du jeu, améliorer cet état de surface, sinon il faut débiter les lopins par sciage.

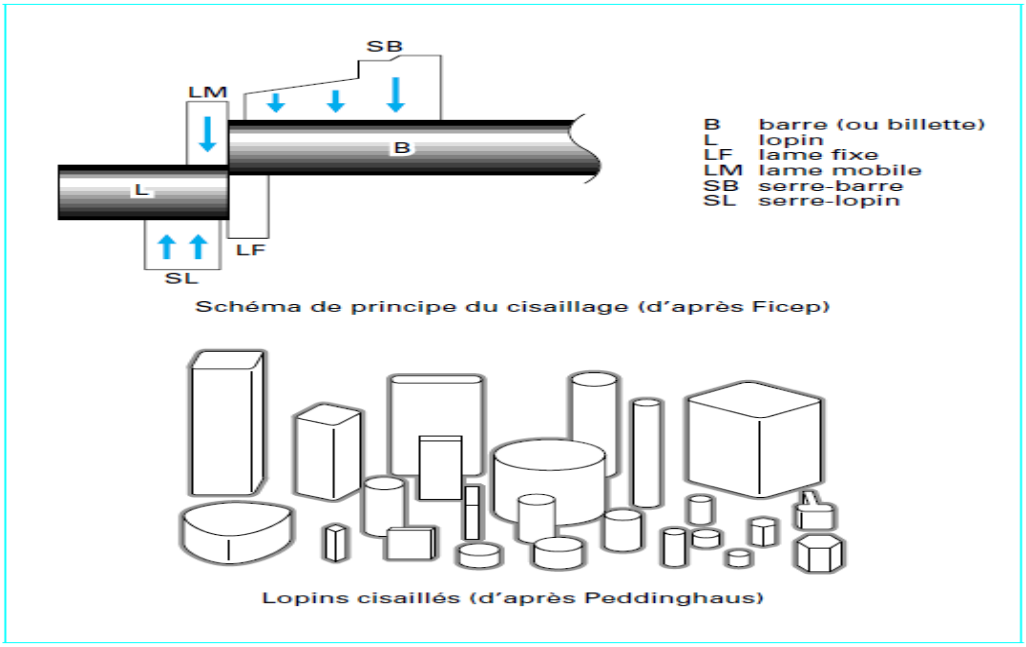


Figure II. 6 opération de cisaillage [24].

II.3.3.2. Sciage

Les rythmes de fabrication de tronçons par sciage se situent autour d'un tronçon par minute. Pour un diamètre de 6 cm. Les scies sont donc dotées de mécanismes automatiques de chargement des barres et un opérateur en manœuvre plusieurs [25,26]. Deux catégories d'outils peuvent peuvent être employés : les fraises à scie (possiblement à segments ajoutés) ou les bandes, ces derniers servant à réduire au maximum les pertes de matière (la largeur de la coupe de sciée tant, pour des lames adéquates, inférieure à 1 mm).

En raison de la hausse continue des prix des aciers, les approches destinées à réduire les pertes de métal renforcent leur compétitivité chaque année. Le découpage est principalement utilisé pour couper de grands diamètres (> 50 mm par exemple) pour lesquels les outils de découpe sont peu courants. Il est aussi employé pour les petites séries (moins de 5000).

Exemples de pièces pour lesquelles les durées de réglage des machines à cisailler.

II.3.3.3. Cisaillage

Les rythmes de fabrication se chiffrent à plusieurs milliers d'unités par heure. Selon les dispositifs (dépendant bien sûr du diamètre écoulé), et les pertes demeurent restreintes.

À chaque extrémité des barres [26]. La configuration des parcelles découpées est d'autant plus défavorable que le rapport entre la longueur et le diamètre d du Lopin est fragile. La frontière la pratique repose sur la subtilité de l'acier et son état de structure de même que des catégories d'outils utilisés : elle se situe entre 0,7 à 0,8 Paiva. De faibles niveaux de la résistance à la fracture influencent aussi de façon négative la qualité de coupe.

II.3.4. Les paramètres influençant l'estampage à chaud

Pour La mise en forme à chaud (estampage ou forgeage,), les principaux paramètres influençant l'opération sont résumés comme suit :

- Paramètres métallurgiques :

  La microstructure de l'acier avant l'opération d'estampage (taille des grains, phase de durcissement, degré de solution solide, …),
- Paramètres thermomécaniques :

- La vitesse de déformation : le comportement à chaud est sensible à la vitesse de déformation qui augmente avec la température.
- L'écrouissage diminue avec la température

- Temps d'estampage (risque de perte d'énergie et par conséquent diminution la température d'estampage),
- Les contraintes d'écoulement diminuent continuellement avec l'augmentation de la température et contribue à la ductilité pour la mise forme à chaud.
-

II.3.4.1. Paramètres de Chauffage

Afin de diminuer l'effort nécessaire à la mise en forme, il est nécessaire de chauffer. On trouvera (Figure II.3) l'influence de la température sur la contrainte d'écoulement du métal estampé. Mais au cours du chauffage, les Lopins se revêtent d'une couche dure d'oxydes appelée couramment « calamine ».

Après estampage, on constate que cette couche ne s'est pas comportée comme le métal de base. Elle est moins déformable. La calamine a toujours une épaisseur faible mais une structure et une morphologie complexes, comme le montre la (Figure .8.)

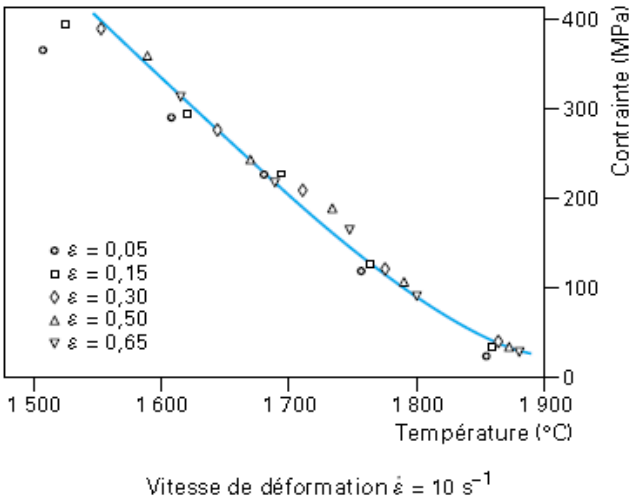


Figure II. 7 Évolution de la contrainte d'écoulement d'UN acier en fonction de la température [27].

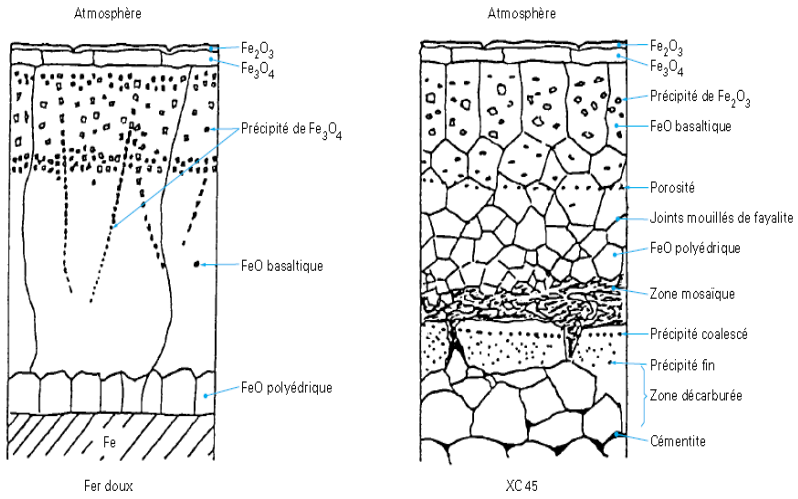


Figure II. 8 Coupe schématique de la calamine sur de fer doux sur un acier [27].

II.3.4.2. Différents modes de chauffage sont utilisés

II.3.4.2.1. Chauffage à la flamme

Les morceaux sont habituellement disposés sur la sole du four. Celle-ci est soit fixe, soit mobile, en rotation. La combustion du mélange de gaz et d'air a lieu dans la chambre. Une régulation automatique sert à compenser les arrivées de lopins froids et les départs de lopins chauds. Les délais de démarrage sont habituellement longs : plusieurs heures, car le brûleur doit réchauffer le four, qui à son tour doit chauffer les morceaux de pâte. Les performances énergétiques de ce type de four ont considérablement avancé ces dernières années, mais elles demeurent en deçà de 50 %. La rapidité de chauffe est lente.

II.3.4.2.2. Chauffage électrique

- **Chauffage Par induction**

Il consiste (Figure II.9) à induire, dans un inducteur à l'aide d'un générateur G, à la surface du métal passant dans une bobine B créant un champ magnétique alternatif, des courants qui échauffent par effet Joule la périphérie des lopins. La chaleur ainsi créée se propage vers le centre du lopin C par conduction thermique. Ce procédé permet un chauffage rapide des lopins et limite

L'épaisseur de calamine formée. Les lopins (Figure II.10) traversent à une vitesse constante de l'ordre de 0,2 à 5 m/min, l'inducteur selon son axe longitudinal. Cet inducteur est alimenté par un convertisseur de fréquence, lui-même alimenté en MT/BT. Les convertisseurs de fréquence sont

aujourd'hui statiques à thyristors. Ils sont refroidis par un circuit d'eau. Les fréquences utilisées pour les aciers varient selon la section des lopins : 2 000 à 10 000 Hz pour les diamètres inférieurs à 100 mm, 500 à 1 000 Hz pour les diamètres supérieurs à 100 mm.

Le rendement global des chauffeuses à induction varie entre 70 et 80 % selon le couplage réalisé entre la section de l'inducteur et celle du lopin.

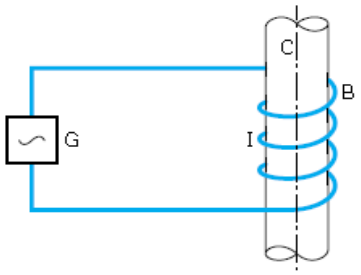


Figure II. 9 principes du chauffage par induction [24].

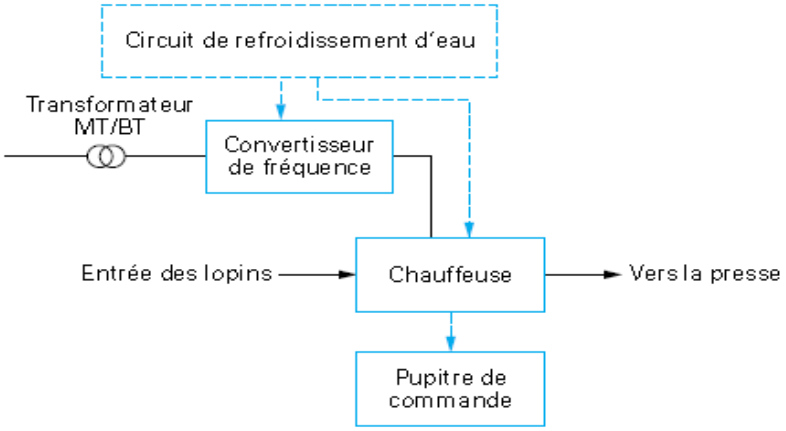


Figure II. 10 principes de fonctionnement d'une chauffeuse à induction [24].

- **Chauffage Par conduction**

Les chauffeuses par conduction d'une puissance de 10 à 1 000 kVa ont un emploi plus spécialisé. Elles sont limitées aux lopins très allongés dont le rapport diamètre/longueur est élevé : supérieur à 8. Avec un investissement relativement faible, ces matériels permettent un chauffage encore plus rapide que les chauffeuses par induction. Le principe du chauffage par conduction est celui de l'effet Joule (Figure II.11). La pièce à chauffer est placée entre deux électrodes. La chaleur ainsi produite, directement à l'intérieur du lopin, confère à ce mode de

chauffage une très grande efficacité énergétique : rendement voisin de 100 %. Les chauffeuses par conduction fonctionnent souvent à la fréquence du réseau. D'une manière schématique, elles comprennent : un transformateur BT/TBT, la chauffeuse proprement dite comprenant les électrodes d'amenée de

Courant et le système de manipulation du lopin, un système de refroidissement des électrodes et des équipements de régulation (Figure 12). [24]

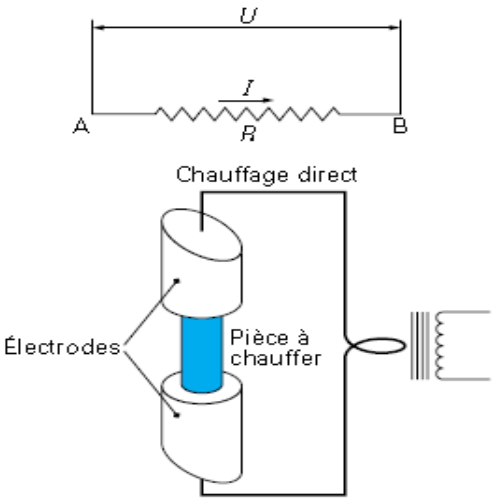


Figure II. 11 Principe du chauffage par conduction [24].

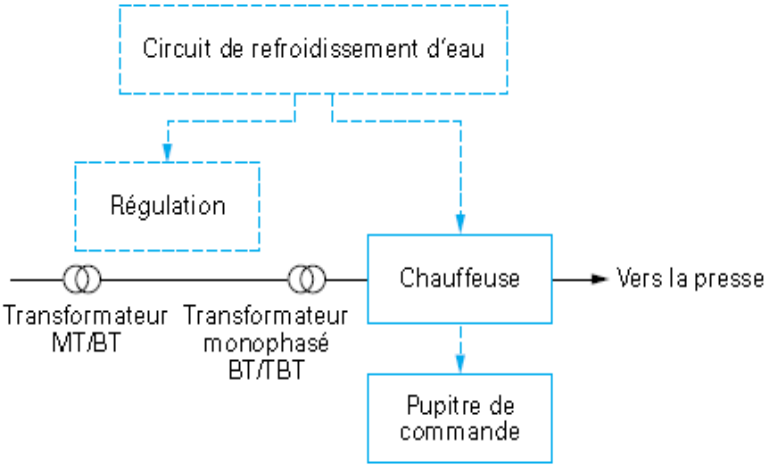
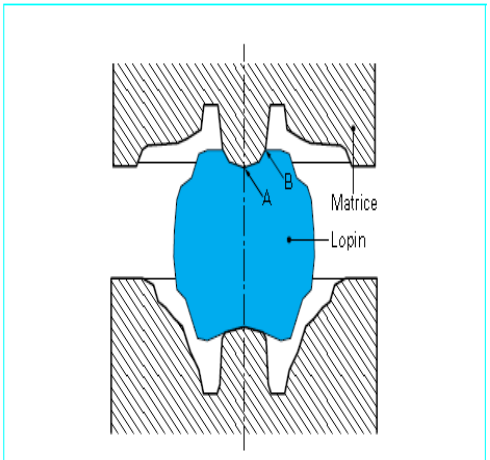


Figure II. 12 Principe de fonctionnement d'une chauffeuse a conduction [24].

II.3.4.3. Mise en forme et Comportement lors du procédé d'estampage

La fabrication consiste à chauffer à haute température, environ 1 250 °C, un morceau de demi-produit d'une géométrie bien déterminée, appelé « lopin », puis de le placer entre des outillages appelés « matrices », dans lesquels est usinée en creux une « gravure » qui représente exactement la forme de l'avant produit brut à obtenir. Une machine-outil d'estampage agissant par choc ou par pression exerce sur les outillages une force telle que le lopin est contraint d'épouser les formes de la gravure. Généralement, sur la périphérie de la gravure, dans l'outillage on usine aussi un cordon de matrice qui va former à la périphérie de la pièce estampée, un « cordon de bavure ». Cette bavure permet la maîtrise de la géométrie de la pièce finie et le cordon, qui ceinture la pièce, est ôté, le plus souvent à chaud, par cisaillage sur une machine-outil annexe appelée « presse d'ébavurage ». La pièce brute ébavurée peut subir un traitement thermique qui lui est appliqué en fonction des caractéristiques mécaniques à obtenir. Le parachèvement est souvent composé d'un grenaillage et d'un calibrage à froid. Pour faire de la déformation plastique, il faut que l'effort exercé sur le lopin engendre dans la pièce un état de contrainte vérifiant le critère de plasticité, à savoir que la contrainte généralisée soit égale à la contrainte d'écoulement du métal. Selon la mythologie, Vulcain a été le premier forgeron à découvrir que le fait de chauffer le métal facilitait sa mise en forme. Il faut bien entendu que l'effort exercé soit inférieur à la limite d'élasticité de l'outillage. C'est le lopin qui doit être mis en forme dans l'outillage et non l'inverse. Le lopin subit une déformation plastique plus une déformation élastique, ainsi qu'un retrait et une contraction lors de son refroidissement ; tandis que la gravure de l'outillage ne subit qu'une déformation élastique et une petite dilatation due à l'échauffement pendant le travail (300 °C environ). Il faut prendre en compte toutes ces données pour obtenir des pièces brutes aux cotes souhaitées à l'intérieur des tolérances dimensionnelles définies par la norme européenne EN 10 243-1 et EN 10 243-2. Lors de l'opération d'estampage, les lopins convenablement chauffés sont mis à la forme de l'avant-produit par les gravures de l'outillage qui sont portées à une température de 150° à 200 °C maximum afin d'augmenter leur ténacité, c'est- à- dire leur résistance à la propagation brutale de fissures surtout lors du travail par chocs. Une seule exception à cette règle : le forgeage dit « isotherme » pour lequel l'outillage est préchauffé à une température voisine de celle du métal à chauffer. Cette exception se justifie dans quelques cas particuliers où les matériaux forgés ont des particularités métallurgiques qui imposent cette procédure. C'est le cas des alliages réfractaires utilisés pour fabriquer les pales de la zone chaude des réacteurs d'avions ou des turbines à gaz. Dans tous les cas traditionnels, le profil thermique relevé dans les matrices dépend de la zone de l'outillage, de ses dimensions et des temps de contact lopin/matrice, comme le montre la (Figure II.13). De plus, la calamine, la

lubrification et l'état de surface de l'outillage sont des paramètres qui viennent dans la pratique perturber les considérations théoriques énoncées ci-avant [24].



Composantes du pic thermique	Point A	Point B
θ moyenne (°C)	195	170
$\Delta\theta$ contact statique (°C)	430	430
$\Delta\theta$ glissement (°C)	130	130
θ max (°C)	755	730

$\Delta\theta$ contact statique : échauffement dans l'outillage au moment du contact
$\Delta\theta$ glissement : échauffement dans l'outillage en cours de fabrication

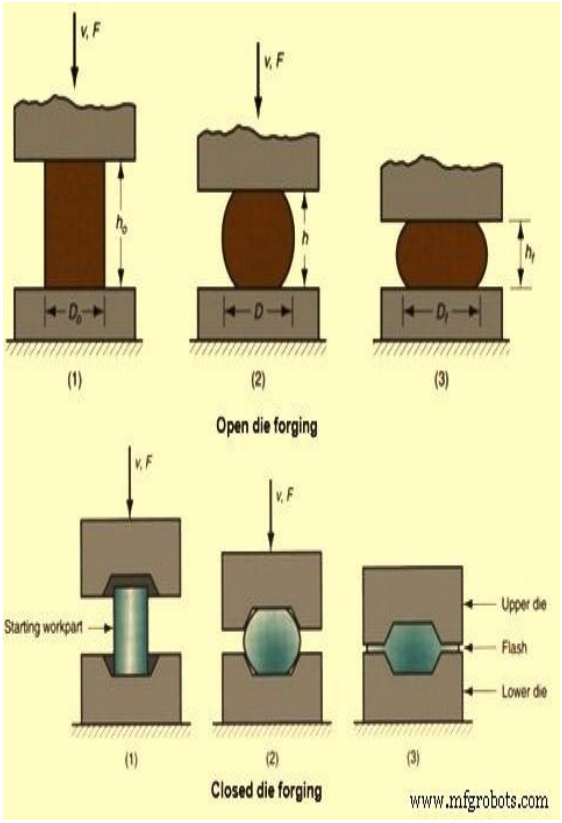


Figure II. 13 a) températures de surface de l'outillage en deux pions relativement proches, **b)** forgeage ouvert et fermé [24].

Pour faire de la déformation plastique, il faut que l'effort exercé sur le lopin engendre dans la pièce un état de contrainte vérifiant le critère de plasticité, à savoir que la contrainte généralisée soit égale à la contrainte d'écoulement du métal. Selon la mythologie, Vulcain a été le premier forgeron à découvrir que le fait de chauffer le métal facilitait sa mise en forme. La (figure II.14) montre l'évolution de la contrainte d'écoulement, de la quantité limite de déformation et de la perte au feu, en fonction de la température. Il faut bien entendu que l'effort exercé soit inférieur à la limite d'élasticité de l'outillage. C'est le lopin qui doit être mis en forme dans l'outillage et non l'inverse.

Le lopin subit une déformation plastique plus une déformation élastique, ainsi qu'un retrait et une contraction lors de son refroidissement ; tandis que la gravure de l'outillage ne subit qu'une déformation élastique et une petite dilatation due à l'échauffement pendant le travail (300 °C environ). Il faut prendre en compte toutes ces données pour obtenir des pièces brutes aux

cotes souhaitées à l'intérieur des tolérances dimensionnelles définies par la norme européenne EN 10 243-1 et EN 10 243-2.

II.3.4.4. Déformation plastique lors de l'estampage

Pour réaliser une déformation plastique, il est nécessaire que la force appliquée sur le lopin provoque dans l'élément une contrainte en vérifiant le critère de plasticité, c'est-à-dire que la tension généralisée doit être identique à la contrainte d'écoulement du métal.

La (figure 118) illustre le changement de la contrainte d'écoulement, de la quantité critique de déformation et de la perte par combustion, selon la température. Il est évident que l'effort exercé doit être en dessous de la limite d'élasticité de l'outillage. C'est le terrain qui doit être façonné. Dans les outils et non le contraire.

Le lopin subit une déformation élastique ainsi qu'une déformation plastique, en plus d'un retrait et une contraction durant son refroidissement ; alors que la gravure de l'outillage ne connaît qu'une déformation élastique et une légère expansion provoquée par la chaleur générée pendant le processus (environ 300 °C). Il est nécessaire de considérer toutes ces informations afin d'obtenir des pièces brutes aux dimensions correctes.

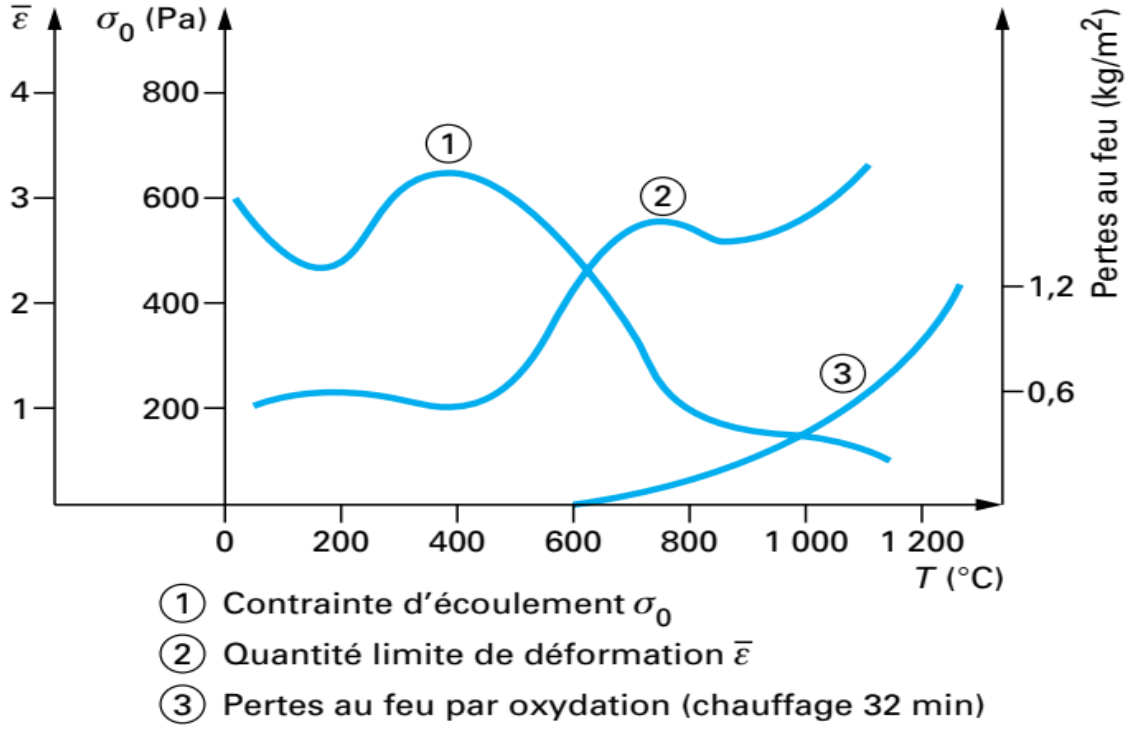


Figure II. 14 Évolution de la ductilité, de la contrainte d'écoulement et de l'oxydation d'un acier en fonction de la température [28].

La loi de comportement à chaud, représente la variation des contraintes écoulements à chaud, elle exprime que lorsque le matériau s'écoule, ces contraintes dépassent un certain seuil.

$$\boldsymbol{\sigma_0 = k_1\, \overline{\varepsilon^n}\, \dot{\varepsilon}^m (exp(-\alpha \Delta t)} \qquad \textbf{(II.1)}$$

σ_0 *contrainte d'écoulement*

K_1 : consistance

$\overline{\varepsilon^n}$: *déformation généralisée*

n : coefficient d'écrouissage

$\dot{\varepsilon}^m$: *vitesse de déformation généralisée*

m : sensibilité à la vitesse

α: *dépendance de la température*

Δt : température

Une bonne simulation nécessite que le matériau de simulation ait une loi de comportement homothétique de celle du matériau que l'on simule : les coefficients m de sensibilité à la vitesse et n d'écrouissage doivent être respectivement aussi proches que possible .il n'est pas possible de respecter également α (dépendance à la température) :

C'est une des raisons qu'impose de réaliser les essais de simulation à température constante. Pratiquement, pour les métaux, cette loi peut être simplifiée suivant la température de mise en forme.

II.3.5. Les efforts d'estampage

L'application de la force sur un lopin cylindrique de diamètre D_0 et de hauteur H_0, chauffé à une température T (voir figure II.13.b). La force évolue en fonction de la hauteur et doit vaincre :

- Résistance du matériau à sa déformation

- Le frottement du au glissement Lopin- outillage

- ***Effort de d'estampage sans frottement***

Contrainte vraie

$$\boldsymbol{F = K_2\, \sigma_0\, S_0} \qquad \textbf{(II.2)}$$

- **F :** Effort d'estampage sans frottement

- **K_2 :** rapport géométrique d'écrasement (H/D)
- **σ_0 :** Contrainte d'écoulement (dépend de la température)

➢ ***Effort de forgeage avec frottement***

$$F=\sigma_0 \pi r^2 \left(1+\frac{2\mu r}{3h}\right) \quad \textbf{(II.3)}$$

μ: Coefficient de frottement(coulomb)

II.3.6. Les traitements thermiques

La plupart des matériaux sont susceptibles de subir des traitements thermiques. C'est ainsi que l'on peut modifier les structures des matières plastique, des verres des céramique, mais ce sont les matériaux métalliques, métaux et alliages, qui offrent les plus grandes possibilités de traitements thermique.

Les modifications structurales obtenues par traitement thermique permettent, de conférer à un matériau des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation sous forme de pièce finie, ou à sa mise en œuvre dans les meilleures conditions, sous forme de demi-produit ou d'ébauche. Ces Améliorations contribuent très souvent à une diminution des couts, car elles permettent l'emploi d'alliages bon marché quand on sait les traiter convenablement, ou la diminution du nombre de nuances à utiliser pour un type de fabrication donné, en choisissant un traitement bien adapté à chaque propriété recherchée.

Les traitements thermiques, ayant but des modifications de structure d'une part, et de la morphologie de cette structure d'autre part, sont donc fondés respectivement sur les possibilités d'évolution structurale des métaux et alliages, et sur les mécanismes de ces évolutions [29].

II.3.6.1. Les traitements thermiques de l'acier

Les traitements thermiques des aciers sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

a. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- ❖ Augmentation de la résistance à la rupture et de la limité élastique Rem, Re, A% en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- ❖ Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

b. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

c. De supprimer les tensions internes(écrouissage).

En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage ; les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage [30].

II.3.6.2. Les recuits

Les recuits consistent en un traitement thermique visant l'obtention d'états proches de l'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire la restauration des propriétés originales du matériau. Ce procédé se déroule dans une atmosphère protégée pour prévenir l'oxydation de la surface métallique. Le recuit a donc pour but, séparément ou simultanément :

- ❖ De supprimer les effets sur la structure :
  - De la solidification.
  - D'une déformation plastique.
  - D'une soudure.
  - D'un traitement thermique antérieur.
- ❖ De mettre le métal dans un état adouci défini ou de le faire tendre vers un état si la structure a été perturbée par des traitements antérieurs :
- ❖ De provoquer la formation d'une structure déterminée en vue, par exemple, de réaliser un traitement thermique ultérieur ;
- ❖ D'éliminer ou de réduire les contraintes internes de la pièce ;
- ❖ D'atténuer l'hétérogénéité de la composition chimique.
- ❖ Le recuit comporte un chauffage et un maintien à une température égale ou supérieur à
- ❖ Acl, suivi d'un refroidissement généralement lent. De régénération, d'adoucissement, de détente, de sphéroïdisation, de normalisation, de recuit total, etc. [31]

Et la (fegureII.15) montre les différents types de recuit.

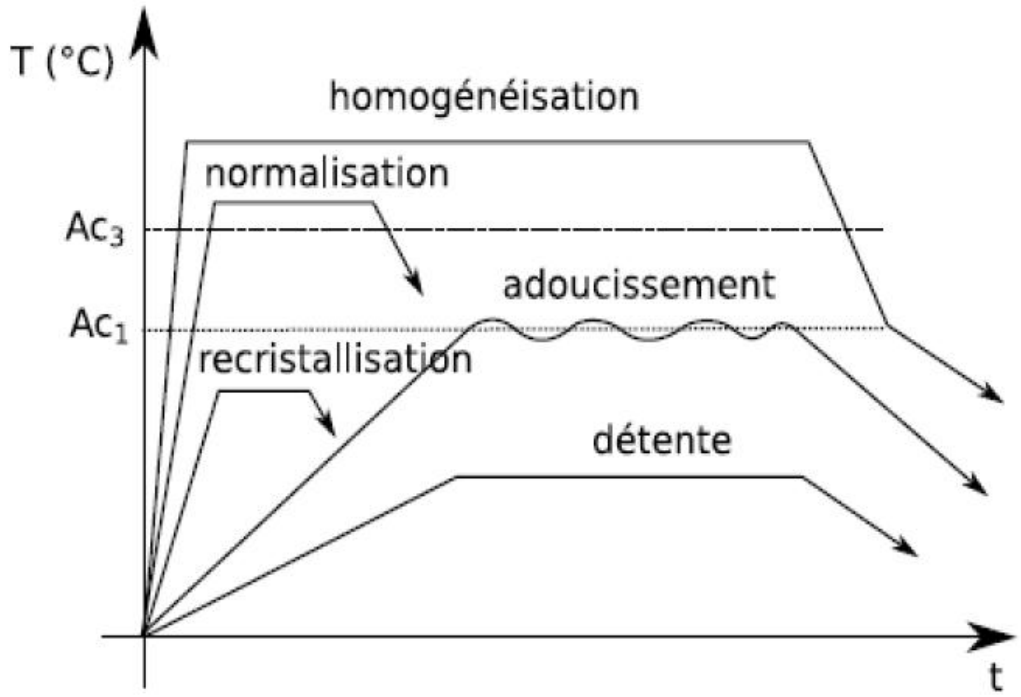


Figure II. 15 Types de recuit [32]

- **Rôle du lubrifiant**

L'estampage met en jeu au moins 3 types de lubrifiants :

— gazeux : air et vapeur d'eau contenus dans la sciure de bois ;

— solide : graphite dans l'eau ou de l'huile déposé généralement par pulvérisation ;

— fluide (visqueux) : verre fondu principalement utilisé pour les pièces en alliage de titane.

Leurs propriétés thermiques sont différentes, leurs influences aussi. Tous vont remplir les trous et les interstices existants entre pièce et matrice. Ceux qui conduisent mal la chaleur joueront le rôle d'écran thermique (verres). Au contraire, ceux qui conduisent bien la chaleur joueront le rôle de joint (produits graphites) et assureront un bon contact thermique nécessaire à une bonne évacuation de la chaleur.

II.3.7. Les outillages

La mise en forme du métal par estampage se fait dans des matrices métalliques.

Les matrices de finition (Figure II .16) représentent, en négatif, les formes définitives des de la pièce. Les dimensions des gravures sont celles de la pièce à obtenir augmentées du retrait. En fonction de la complexité de la pièce, on est fréquemment amené à créer des gravures de préparation ou gravures d'ébauches, de fores plus floues et dans lesquelles on s'efforce de faciliter l'écoulement du métal en allongeant les rayons de raccordement des différentes zones de la pièce. Une autre fonction de ces gravures d'ébauches est de supporter l'usure par l'écoulement du métal et par conséquent limiter le plus possible l'usure des matrices de finition.

Les matrices sont réalisées à partir de blocs d'aciers alliés qui doivent présenter de hautes caractéristiques de résistance aux chocs, une bonne résistance à chaud, car le contact avec le métal chaud ne doit pas provoquer des déformations permanentes, et une bonne résistance à l'usure. L'amortissement des matrices d'estampage représente un handicap certain du fait de leur prix élevé et de leur usure rapide. Il peut atteindre 15 à 20% du prix de la pièce estampée.

Une matrice est en générale utilisable pour 5000 pièces. Les blocs peuvent être usinés à l'état recuit puis traités après usinage, ou bien usinés à l'état trempé et revenu. Les moyens d'usinage sont d'une part les moyens conventionnels de tournage, fraisage, perçage, rabotage, rectification et d'autre part, l'électroérosion et l'électrochimie. On assiste aujourd'hui à l'usinage à grande vitesse, économique, précis et rapide et surtout le bloc est usiné traiter.

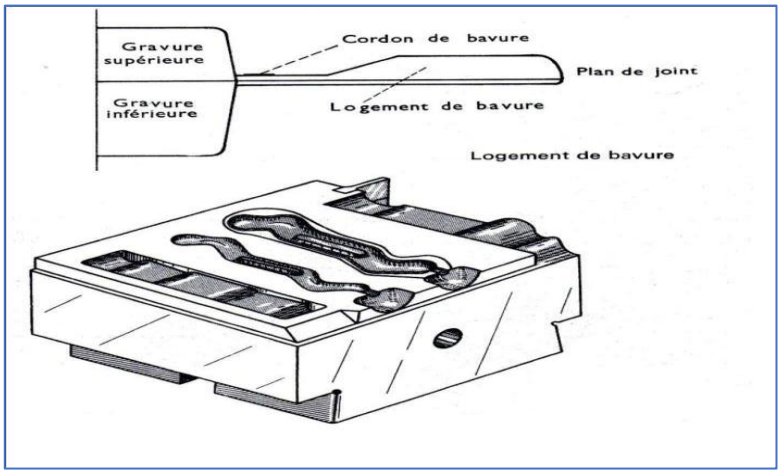


Figure II. 16 Exemple d'outillage a gravure multiple [13]

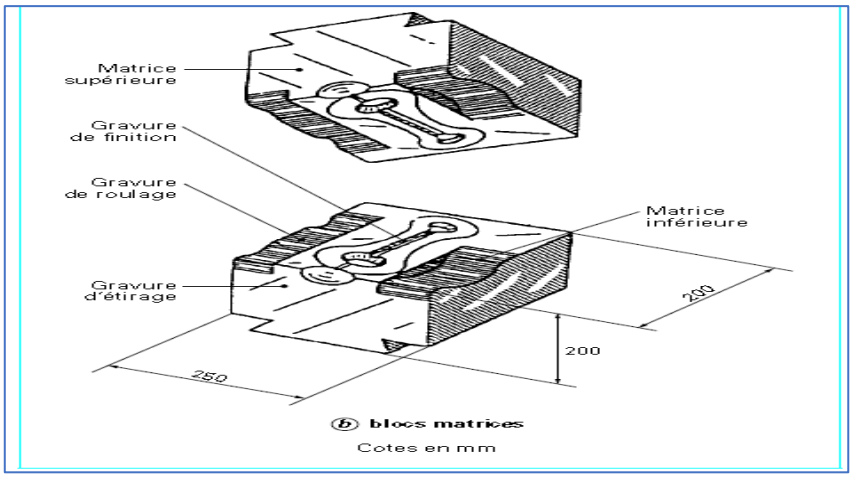


Figure II. 17 Exemple d'un blocs matrices [13].

Les blocs sont réglés en position axiale et latérale par des accessoires :

Clavettes et grains de centrage

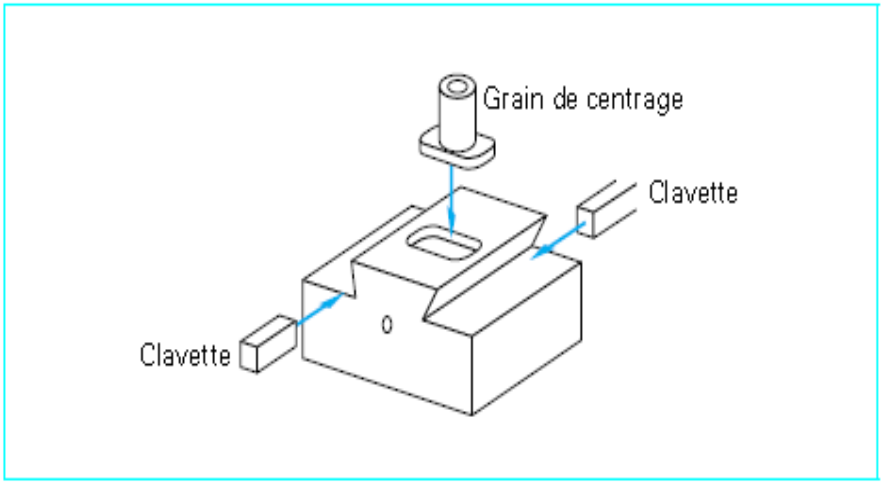


Figure II. 18 Clavette et grain de centrage [13].

II.3.8. Machines utilisées durant la procédure d'estampage

Le type de machines employées pour forger un lopin, influence toute la mise en forme.

En effet, la presse utilisée conditionne la vitesse de déformation, la température du lopin et les cadences de production. Selon qu'elles travaillent par choc, par pression ou en intermédiaire (entre choc et pression),

Il existe quatre types de machines pour la mise en forme du lopin :

- les marteaux pilons. (Figure II. 19)

- les presses mécaniques (Figure II .20)
- l- les presses à vis (Figure II.21).
- les presses hydrauliques (Figure II.23)

II.3.8.1. Des machines-outils de déformation par choc (marteau-pilon)

II.3.8.1.1 Les marteaux pilons 'simple effet'

Ce sont les machines les plus utilisées en forgeage. Ils comportent (Figure II.19)

a) **une chabotte**, masse métallique servant de table de travail et sur laquelle on fixe la matrice inférieure,

b) **un marteau**, masse tombante sur laquelle est fixée la matrice supérieure

c) **des organes de guidage**, jambages ou montants fixés sur la chabotte et portant des glissières dans laquelle la masse tombante est guidée

d) **des organes de relevage** de la masse tombante supportée par les jambages

II.3.8.1.2. Les principaux avantages des pilons

- Les pilons développent des charges importantes pour un temps de contact court entre l'outil et le lopin.
- le pilon est la machine la moins cher
- le pilon est le procédé de forgeage le plus économique, - c'est également le procédé le plus polyvalent, dans la diversité des opérations qu'il peut exécuter

II.3.8.1.3. Les Inconvénients des pilons

- les chocs subis par la matrice limitent sa durée de vie
- le contrôle métallurgique de la pièce forgée est rendu difficile par rapport aux autres procédés



Figure II. 19 Marteau pilon simple effet [22]

II.3.8.2. Les presses mécaniques

Toutes les presses mécaniques. Utilisent l'énergie d'un volant. Le système de guidage le plus employé est basé sur un mécanisme de glissière qui transforme le mouvement de rotation en translation. Ceci impose au piston vertical une longueur de frappe constante.

Dans les constructions les plus répandues les presses mécaniques comportent un bâti fermé dont la partie inférieure forme la table de travail ; elle est reliée à la partie supérieure par quatre colonnes.

Un coulisseau se déplace verticalement dans ces colonnes, actionné par un système bielle manivelle. Le vilebrequin tourillonne dans la partie supérieure du bâti et porte, à une extrémité, un embrayage pneumatique à disques et, à l'autre, un frein pneumatique à disque ou à bande. Le carter d'embrayage muni d'une couronne dentée est entrainé par l'intermédiaire d'un arbre grande vitesse portant un volant d'énergie et un pignon. L'entrainement de l'arbre grande vitesse se fait par courroies trapézoïdales. Ces presses sont équipées d'éjecteurs permettant d'extraire les pièces des matrices, et par suite réduire considérablement la dépouille sur les pièces.

II.3.8.2.1. Les principaux avantages des presses mécaniques sont

- comparées aux pilons, les presses mécaniques sont plus précises dans les tolérances géométriques des pièces forgées,

- elles autorisent une alimentation et un enlèvement automatique des lopins, ainsi les taux de production (30 à 60 frappes par minute) sont également supérieurs aux pilons.
- les presses mécaniques sont soumises à des forces de compression par opposition aux impacts, donc on peut utiliser des matrices moins massives ou en matériaux plus durs.

II.3.8.2.2. Les inconvénients des presses mécaniques sont

- le coût initial d'une presse mécanique est trois fois supérieur à celui d'un pilon de même capacité,
- du fait de la constance de la force de frappe, les presses mécaniques ne peuvent pas exécuter des opérations de mise en forme intermédiaires comme sur les pilons.



Figure II. 20 Presse mécanique [22]

II.3.8.3. La presse à vis

La presse à vis est plus productive que la presse mécanique. Elle n'est pas aussi rapide, mais elle est bien mieux adaptée à la production de pièces en titane du fait de sa rapidité et sa résistance.



Figure II. 21 Presse à vis [22]

II.3.8.4. La presse hydraulique

Haut, elle est cependant plus versatile. Sa vitesse de forgeage est ajustable, elle possède une très bonne adaptabilité à différentes formes et s'applique à tous les matériaux. Les presses hydrauliques sont largement utilisées dans la fabrication de pièces pour le secteur aérospatial. La presse hydraulique est la plus lente et la moins productive des presses verticales citées plus



Figure II. 22 Presses hydraulique [22]

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

III.1. Introduction

L'expérience est le complément indispensable de la théorie et l'argument de chaque question sur le comportement mécanique de l'acier. Dans cette étape, nous pouvons effectuer une série d'expériences (analyse chimique, traction, dureté et résilience) sur des éprouvettes cylindriques.et d'autre part, nous pouvons calculer les paramètres responsables du procédé de forgeage par estampage à chaud. Les résultats sont enregistrés et commentés.

III.2. Procédures expérimentales

III.2.1. Choix du métal de base

L'acier 20MnCr5 est un acier faiblement allié utilisé principalement pour les pièces mécaniques nécessitant une haute résistance à l'usure après traitement de cémentation. Il combine une bonne ténacité à cœur avec une excellente dureté superficielle. Il est idéal pour la fabrication d'engrenages, d'arbres et de pièces de transmission.

L'identification de la nuance l'acier : 20MnCr5, est comme suit :

C'est un acier faiblement allié contenant :

- 0,20 % de carbone.
- 5/4 = 1,25% de Manganèse
- le pourcentage de chrome (Cr) est inférieur à 1,25 %.

Tableau III. 1. Désignation de l'acier 20MnCr5 D'après EN **[33].**

Germany (DIN)	Japan (JIS) G4053	Actuel EN EN10084	France AFNOR NFA 35 551	Chine GB 3077
20MnCr5	SMnC420	20MnCr5	20MC5	20CrMn

III.2.2. Analyse chimique de l'acier

III.2.2.1. Composition chimique

L'analyse spectrale prend une part exceptionnelle à côté des examens mécaniques et chimiques. En peu de temps, elle livre des informations sur l'échantillon en déterminant avec certitude aussi bien les concentrations importantes en éléments d'alliages, que pour les petites teneurs en impuretés indésirables. Elle est l'un des moyens les plus rationnels pour le contrôle des nuances en usine [33]. La composition chimique de l'acier normalisé est indiquée dans le tableau III.1, et celle donnée par L'ETRAG (L'Entreprise des Tracteurs Agricole) utilisé (20MnCr5), dans notre étude est répertoriée dans le tableau III.3.

Tableau III. 2: Composition chimique du métal de base **[33].**

% C	% Mn	% Cr	% Si	% P	% S
0.17-0.22	1.1-1.4	1-1.30	≤ 0.25	≤ 0.005	≤ 0.035

Tableau III. 3: Composition chimique du métal de base d'après l'ETRAG**.**

% C	% Mn	% Cr	% Si	% P	% S
0.20	1.29	0.95	0.23	0.001	0.021

Les différentes caractéristiques mécaniques des aciers utilisés sont répertoriées dans le tableau. III.4.

Tableau III. 4: Propriétés mécaniques de l'acier 20MnCr5 [34].

Résistance à la traction	**Limite d'élasticité**	**Allongement**	**Résilience**
Rm (Mpa)	Re (Mpa)	A (%)	Kv (J)
600-850	350-500	10-14	>40

III.2.2.2. Propriétés physiques de l'acier

Les différentes Propriétés physiques des aciers utilisés sont répertoriées dans le tableau. III.5.

Tableau III. 5: Propriétés physiques des aciers **[35].**

Propriétés physiques	Valeur	Unité
Masse volumique 20° C	7850	Kg/m^3
Point de fusion	1400-1500	°C
Conductivité thermique	11.2-48.3	W/m.K
Conductivité électrique	**7.7**	$\Omega^{-1}.m^{-1}$
Résistivité électrique	0.13	$Q\ mm^2/M$
Coefficient de dilatation linéaire de 20 à 300°C	12×10^{-6}	$°C^{-1}$

III.3. Essais mécaniques

III.3.1. Essai de traction

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

Un matériau est dit fragile lorsque la rupture survient avant même d'entrer dans le domaine plastique. Un matériau qui présente un domaine élastique et un domaine plastique est dit ductile [34].

- **Principe de l'essai de traction**

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction de façon progressive, généralement jusqu'à la rupture dans le but de définir une ou plusieurs caractéristiques mécaniques. Un essai de traction est une expérience qui permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau quelconque [36].

- **Caractéristiques de l'essai de traction**

- **Module d'élasticité longitudinale E (MPa)**

Le Module d'Young E a la dimension d'une contrainte. Il représente la contrainte qu'il faudrait appliquer pour obtenir une d´déformation unité soit doubler la longueur initiale [37]. La loi d'élasticité est la loi de Hook :

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

E acier = 210000 Mpa

- **Limite élastique Re**

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

$$Re = \frac{Fe}{S0} \quad \text{(III.2)}$$

Avec :

Re : Limite d'élasticité apparente (Mpa)

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

S0 : section initiale (mm2).

Section d'une éprouvette plate initiale

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

- **Limite conventionnelle d'élasticité R_e 0,2 Mpa**

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

- **Limite maximale de la résistance à la rupture Rm (Mpa)**

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

$$Rm = \frac{Fm}{S_0} \quad \text{(III.4)}$$

Fm : charge maximale.

- **Allongement à la rupture**

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

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

L_f: Longueur de l'éprouvette reconstituée après rupture

L_0: Longueur initiale de l'éprouvette.

- **Striction**

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

Section finale

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

On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte. On obtient alors le graphe suivant (figure III.1) :

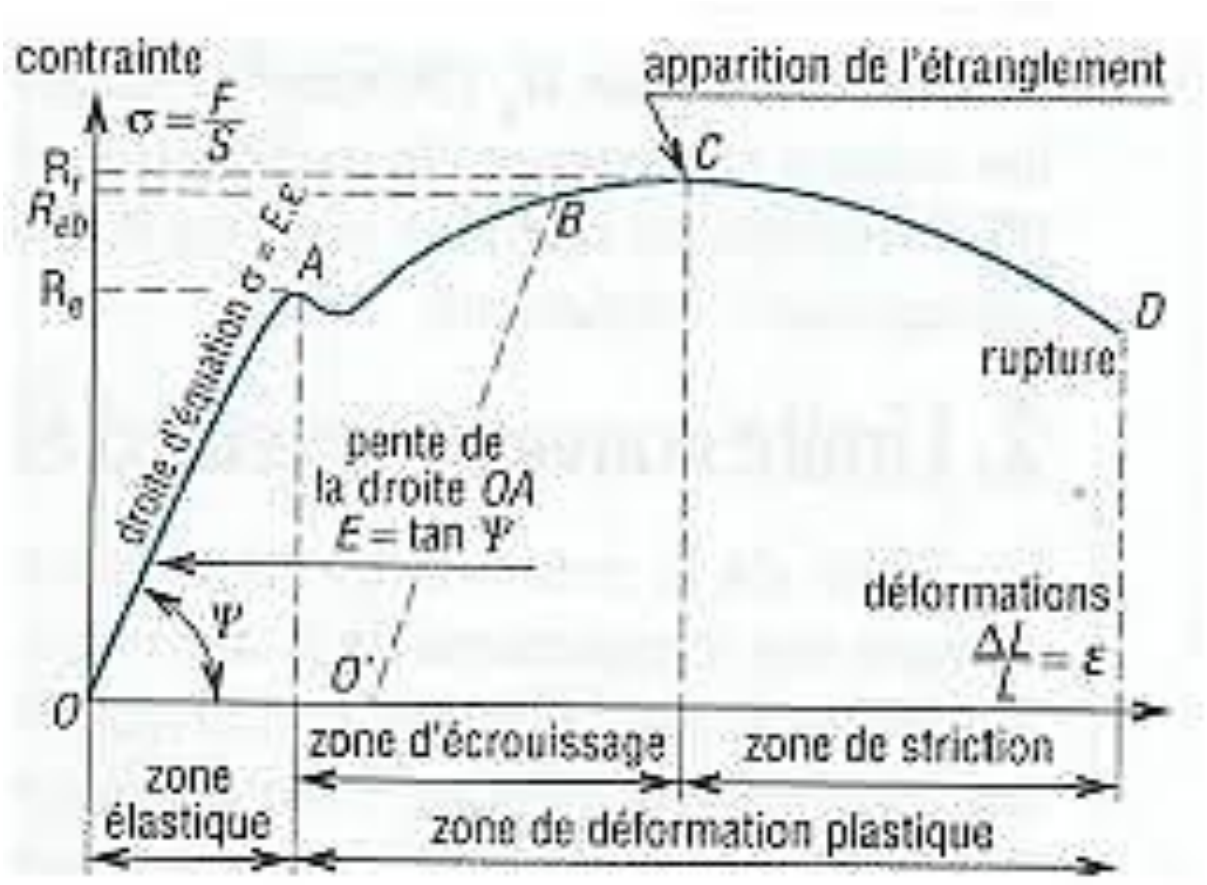


Figure III. 1. Courbe de traction conventionnelle.

- **Découpage et usinage des éprouvettes**

Les éprouvettes considérées découpée et usiner dans le laboratoire de contrôle qualité de L'ETRAG, sont de section cylindrique. Les éprouvettes comportent généralement deux têtes d'amarrage et une partie calibrée de section constante (tableau III.6), comportant deux repères distants d'une longueur L0 (figure III.2).

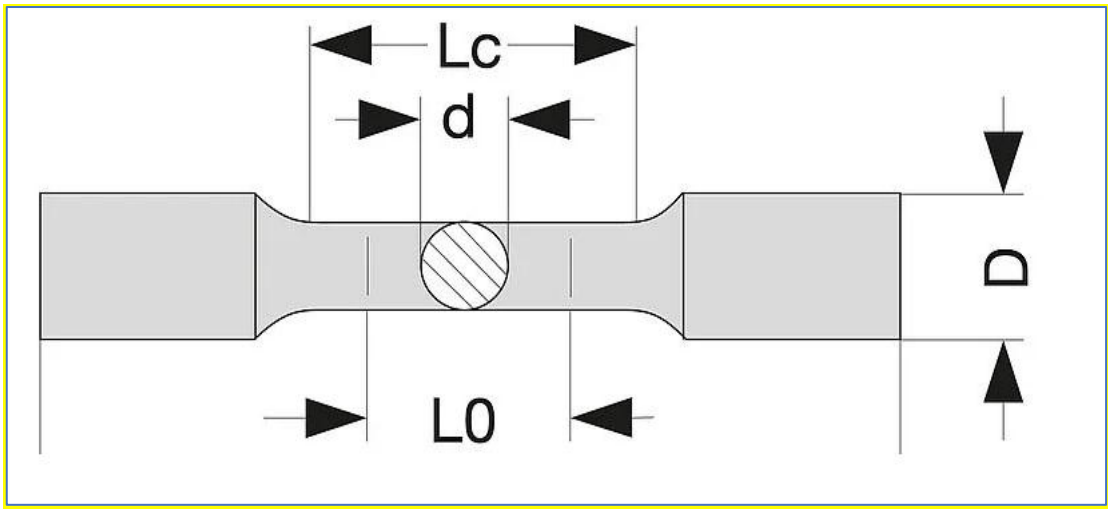


Figure III. 2. Forme générale de l'éprouvette cylindrique.

Tableau III. 6: Symboles et désignation de l'éprouvette

Symboles	Désignation	Unité
L_0	Longueur initiale	mm
L_c	Longueur calibrée	mm
d	Diamètre initiale	mm
D	Diamètre de la tête d'amarrage	mm



Figure III. 3. Machine de traction au labo. Contrôle qualité de L'ETRAG.

Tableau III. 7. Données géométriques de l'essai de traction pour une éprouvette avant Estampage

	Type d'éprouvette	Epaisseur e_0 (mm)	Largeur l_0 (mm)	*Diamètre* D_0 *(mm)*	Longueur InitialeL_0 (mm)	*Section* S_0 (mm^2)
Avant Estampage	Cylindrique	-	-	8	50	50,24
		-	-	8	50	50,24

Tableau III 8. Données géométriques de l'essai de traction pour une éprouvette après Estampage.

	Type d'éprouvette	Epaisseur e_0 (mm)	Largeur l_0 (mm)	*Diamètre* D_0 *(mm)*	Longueur InitialeL_0 (mm)	*Section* S_0 (mm^2)
Après Estampage	Cylindrique	-	-	8	50	50,24
		-	-	8	50	50,24

Tableau III. 9: résultat de l'essai de traction.

Caractéristiques mécaniques	F(N)	R_e (MPA)	Rm (MPA)	A%
Avant Estampage	37772	548,5	751,4	14.6
	36609	532,8	728,3	14.8
Après Estampage	37724	482.5	750.5	15.2
	39714	516,7	790,1	15.6

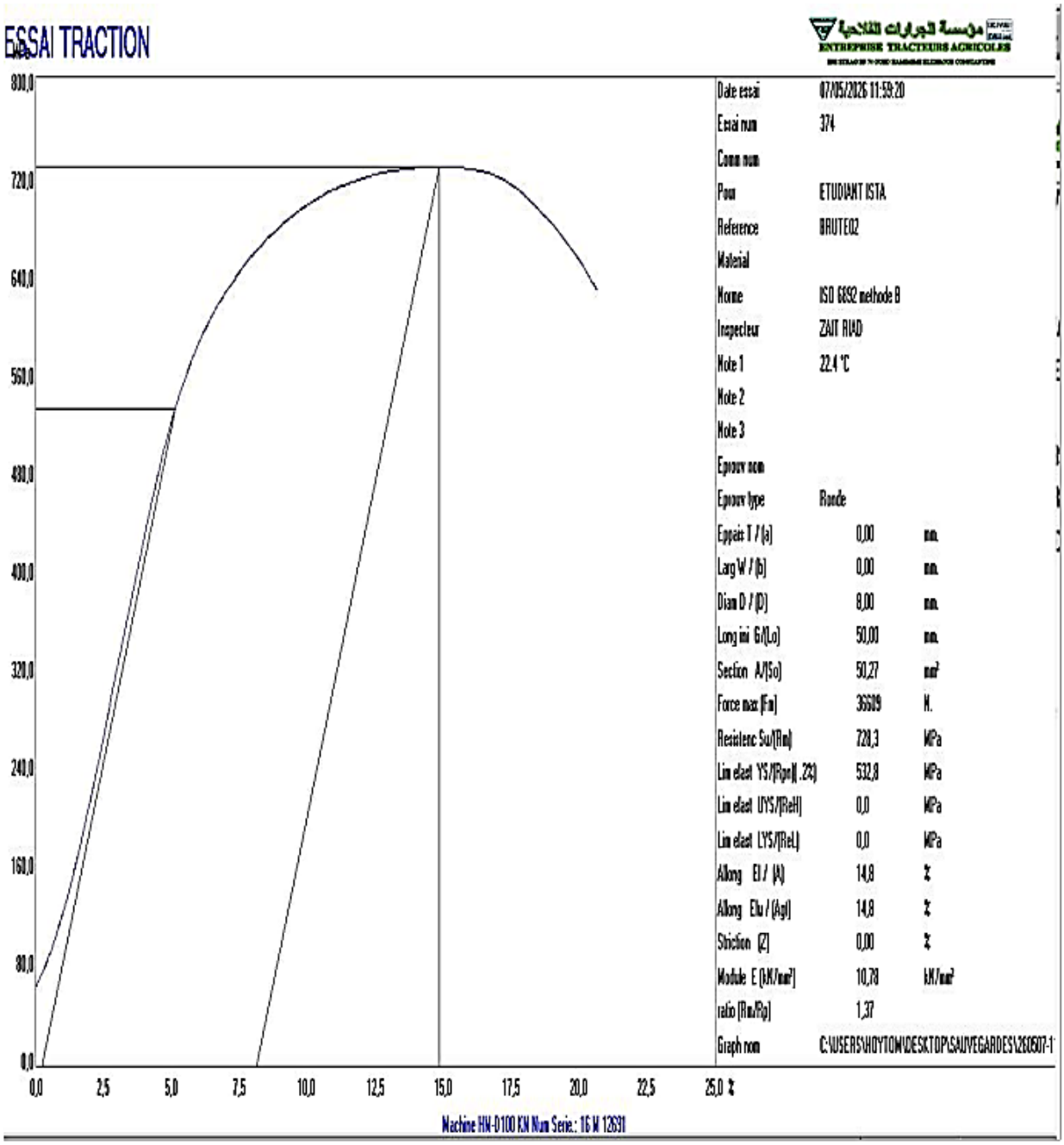


Figure III. 4. Courbe rationnelle de traction avant forgeage par estampage.

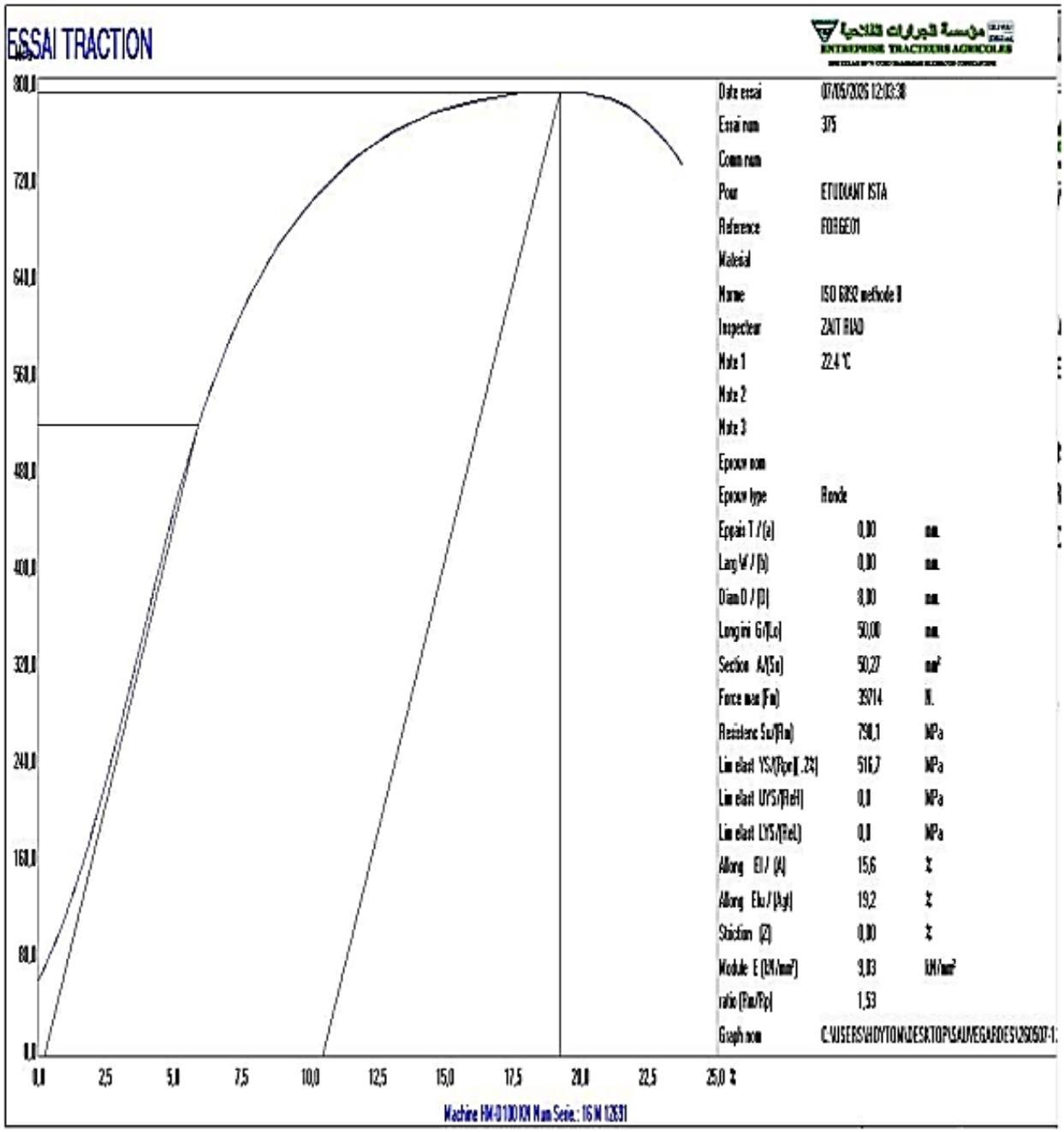


Figure III. 5. Courbe rationnelle de traction après forgeage par estampage.

III.3.2. Essais de dureté

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

Les essais les plus courants sont les essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell [**33].**

➢ Principe de l'essai de dureté

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à tester. La charge appliquée est constante et on mesure la dimension de l'empreinte. Celle-ci est d'autant plus grande que le métal est mou. La dureté H s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte 38] :

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

Avec

H : symbole de dureté (MPa)

F : charge d'essai (N)

S : surface de l'empreinte (mm2)

➢ Types d'essai

1. Essai Brinell

Il consiste à imprimer dans la pièce à tester une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F, et à mesurer le diamètre d de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge [33].

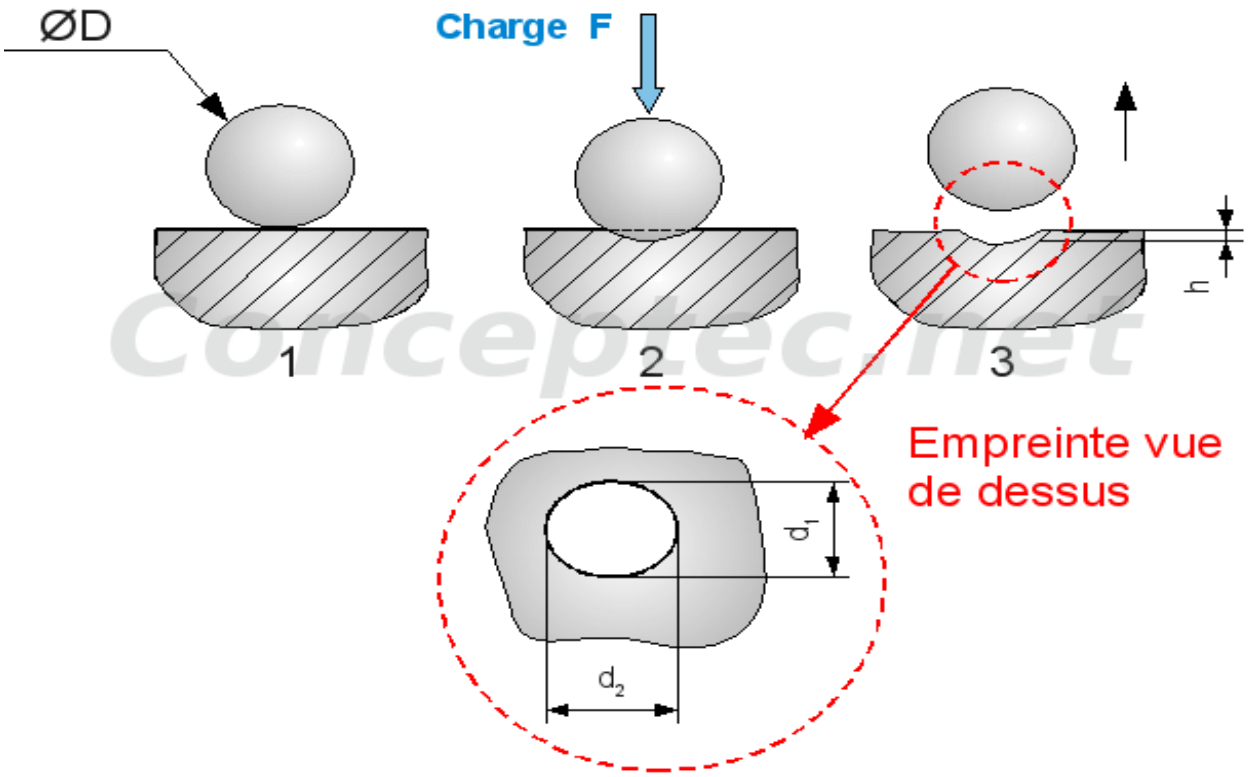


Figure III. 6. Essai de dureté Brinell [38].

La dureté Brinell est donnée par la relation suivante :

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

Tableau III. 10. Symboles et désignation en dureté.

Symboles	Désignation	Unité
P	La charge appliquée	***N***
D	Diamètre de la bille	***mm***
d	Diamètre de l'empreinte	***mm***

Tableau III. 11. Résultats des Essais de dureté avant et après l'opération Estampage.

Essai de dureté HB		
Echantillon	Avant Estampage	Après Estampage
1	213,67	233,06
2	216,57	235,24

3	219,53	236,90

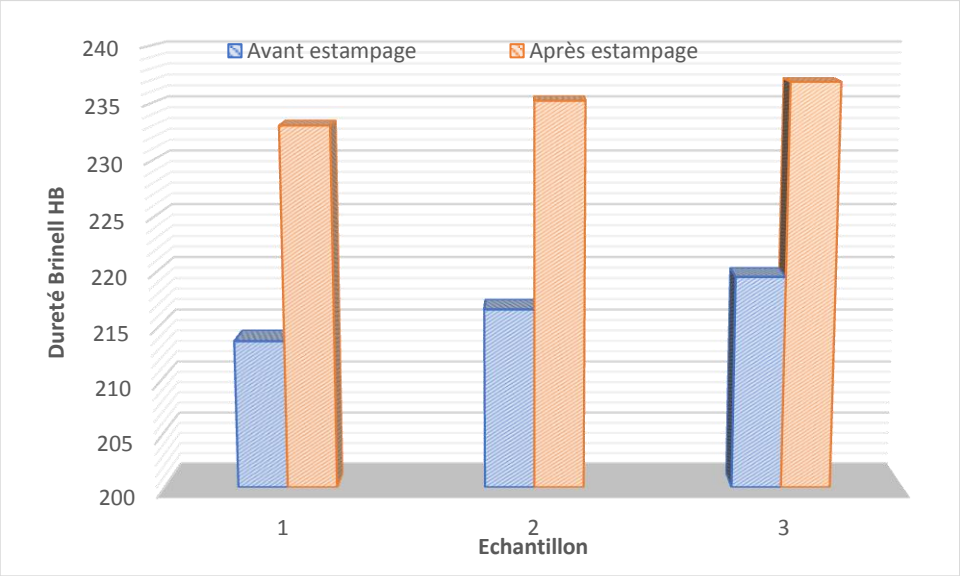


Figure III. 7. Dureté avant et après estampage.

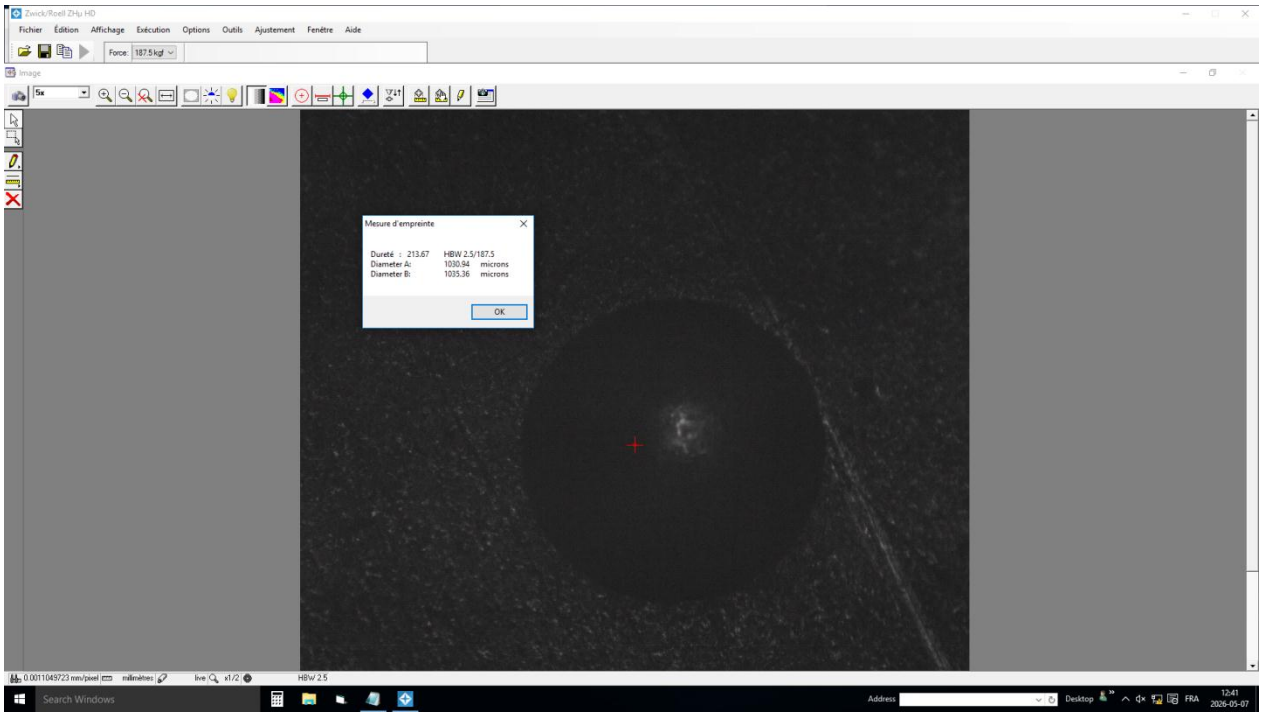


Figure III. 8. Profil de dureté Brinell avant estampage (labo ETRAG).

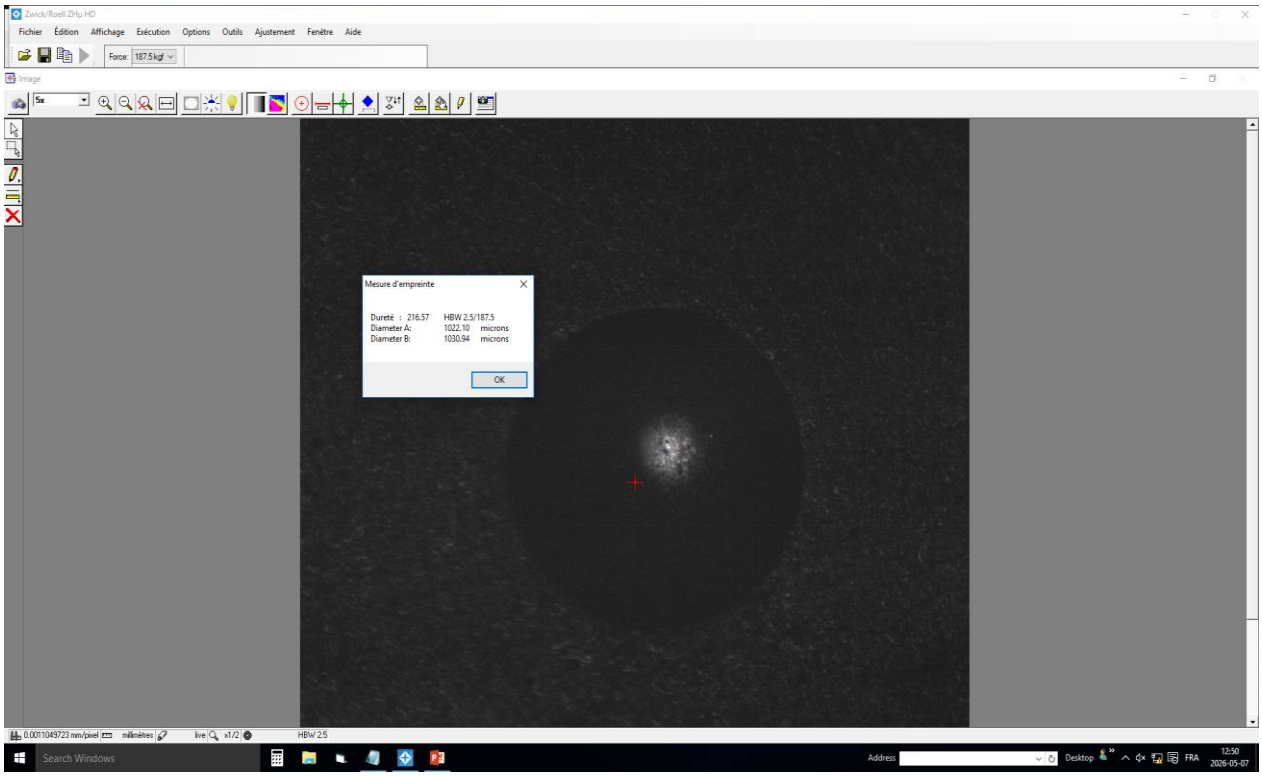


Figure III. 9. Profil de dureté Brinell avant estampage (labo ETRAG).

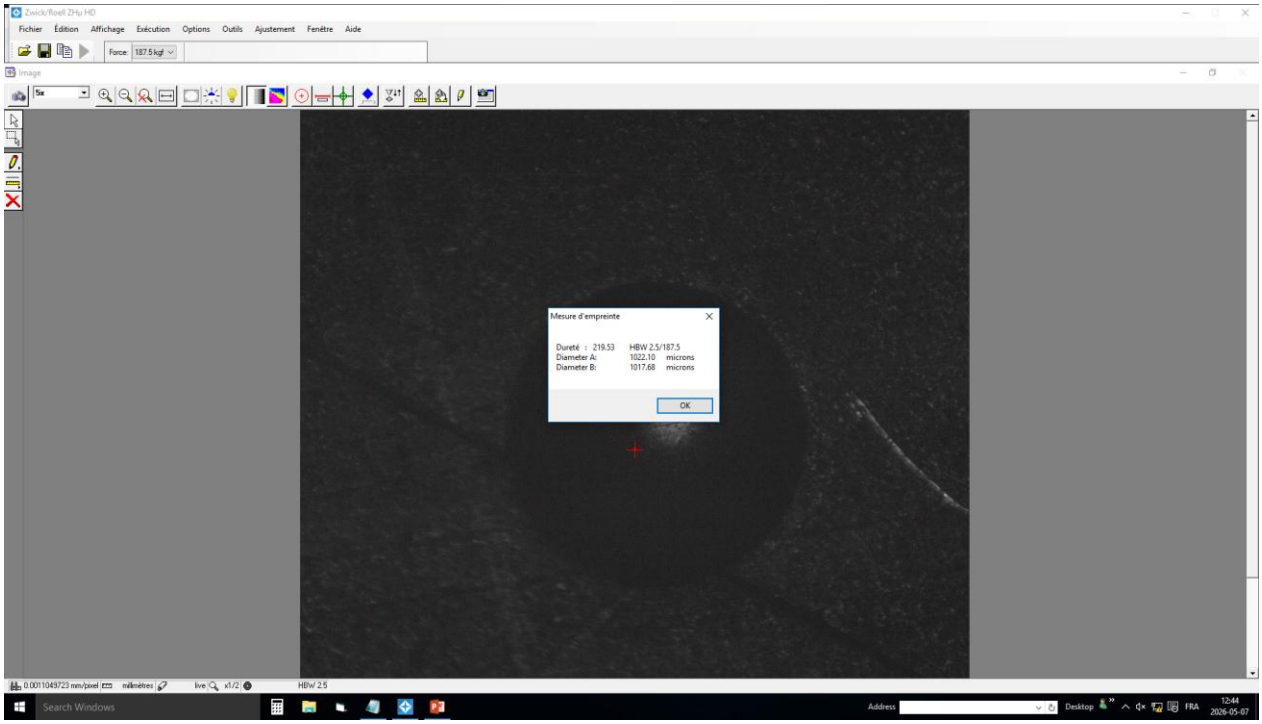


Figure III. 10. Profil de dureté Brinell avant estampage (labo ETRAG).

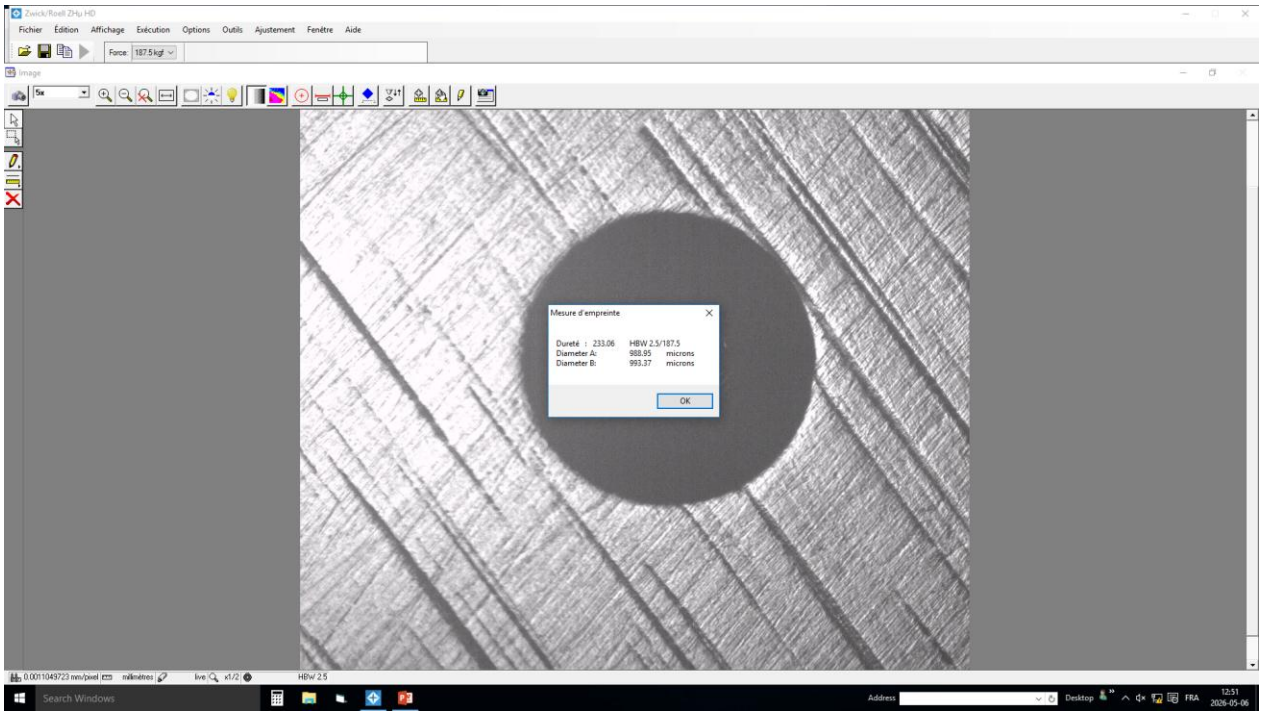


Figure III. 11. Profil de dureté Brinell après estampage (labo ETRAG).

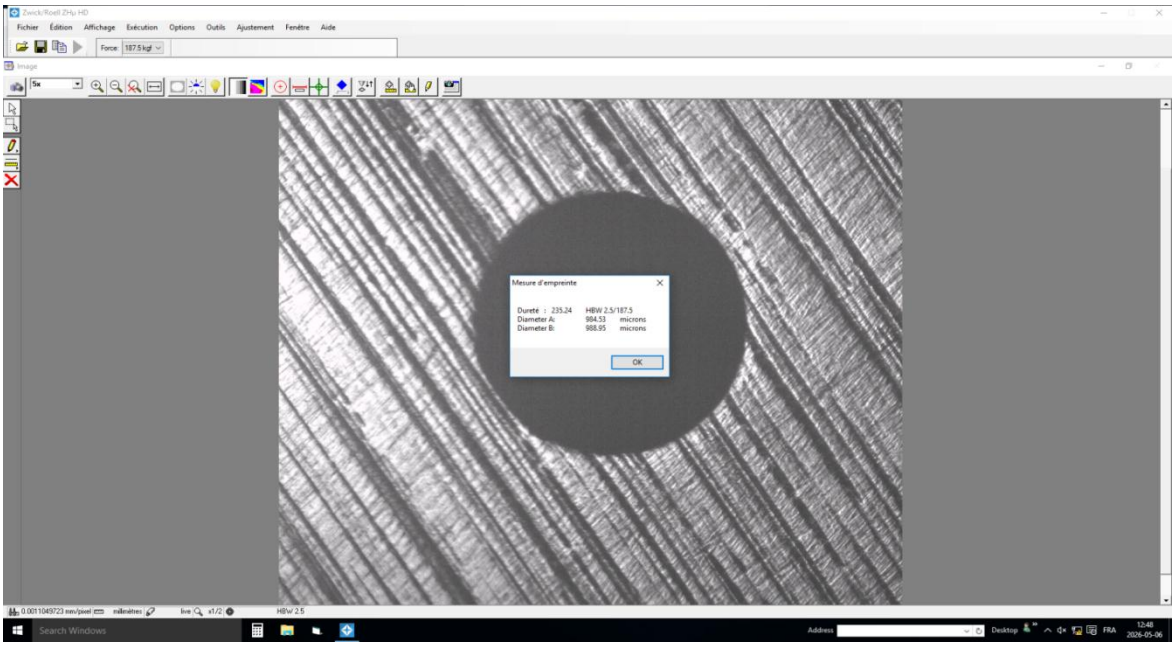


Figure III. 12. Profil de dureté Brinell après estampage (labo ETRAG).

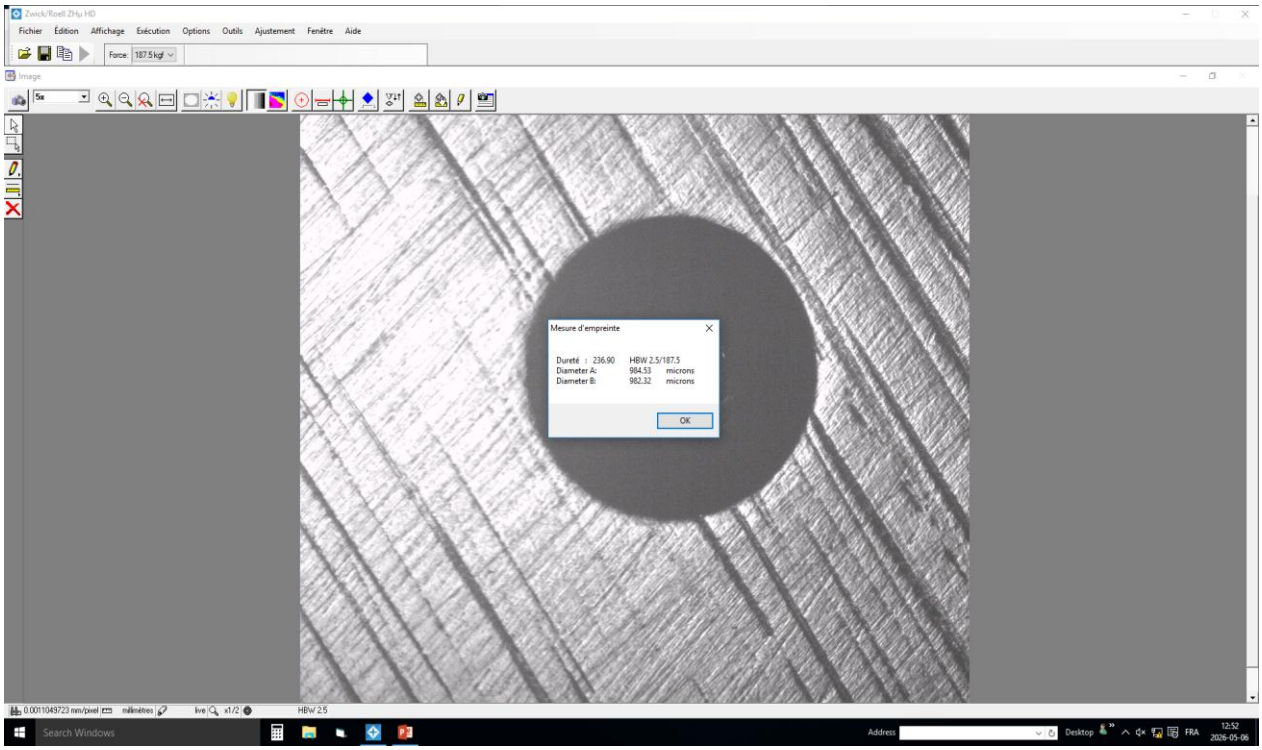


Figure III. 13. Profil de dureté Brinell après estampage (labo ETRAG).

III.3.3. Essai de Résilience (K)

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

L'essai Charpy est très utilisé industriellement pour caractériser la fragilité des matériaux et principalement des métaux. Son développement, qui a conduit à l'établissement de normes (ISO 179 pour les plastiques, ISO 1456 pour les aciers, par exemple), résulte de la facilité et de la rapidité de son exécution, mais également de la faible quantité de matière nécessaire Cet essai permet de mesurer la résistance au choc d'un matériau en présence d'une entaille dite en U ou en V, selon sa géométrie (figure III.14).

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

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

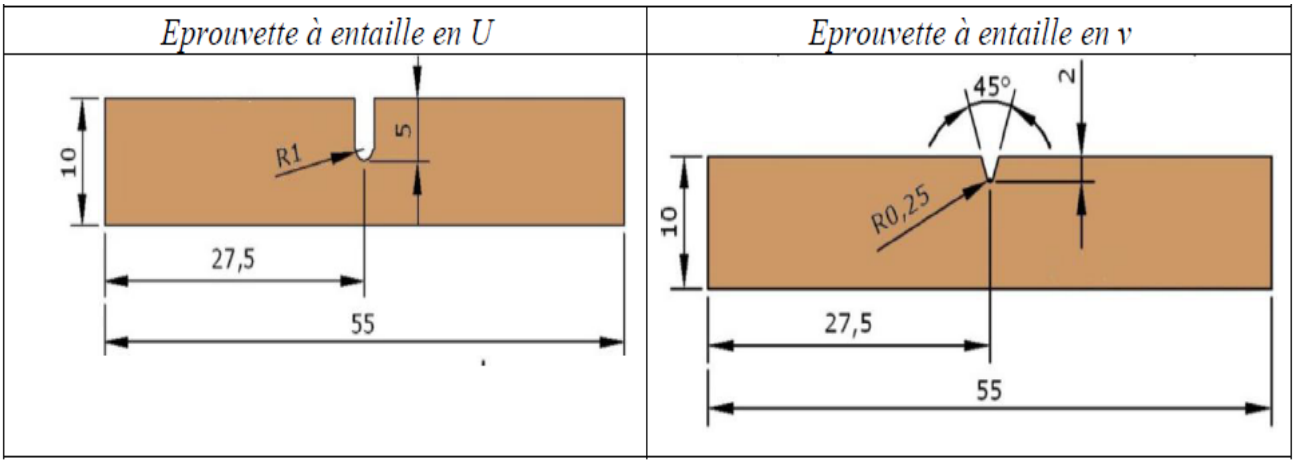


Figure III. 14. Type d'entaille (U ou V)

Elle est définie par :

$$K = \frac{W}{S} \qquad \text{(III.10)}$$

W : travaille nécessaire

S : section après entaille

L'essai de Charpy est considéré comme un essai dynamique lent, qui donne l'influence de la vitesse de déformation sur les propriétés mécanique des matériaux, et plus particulièrement la ténacité. Cette influence est le résultat de l'emploi du critère de plasticité thermiquement activé associé au critère local de rupture. Celle-ci est décrite par la variation de la distribution des contraintes dans les zones de discontinuités géométriques, compte tenu de la forme d'entaille et pour différents types d'éprouvette Charpy.

La figure (III.15): montre une représentation schématique de cet essai de Charpy : la hauteur initiale du mouton est indiquée par h0 et la hauteur finale par h1.

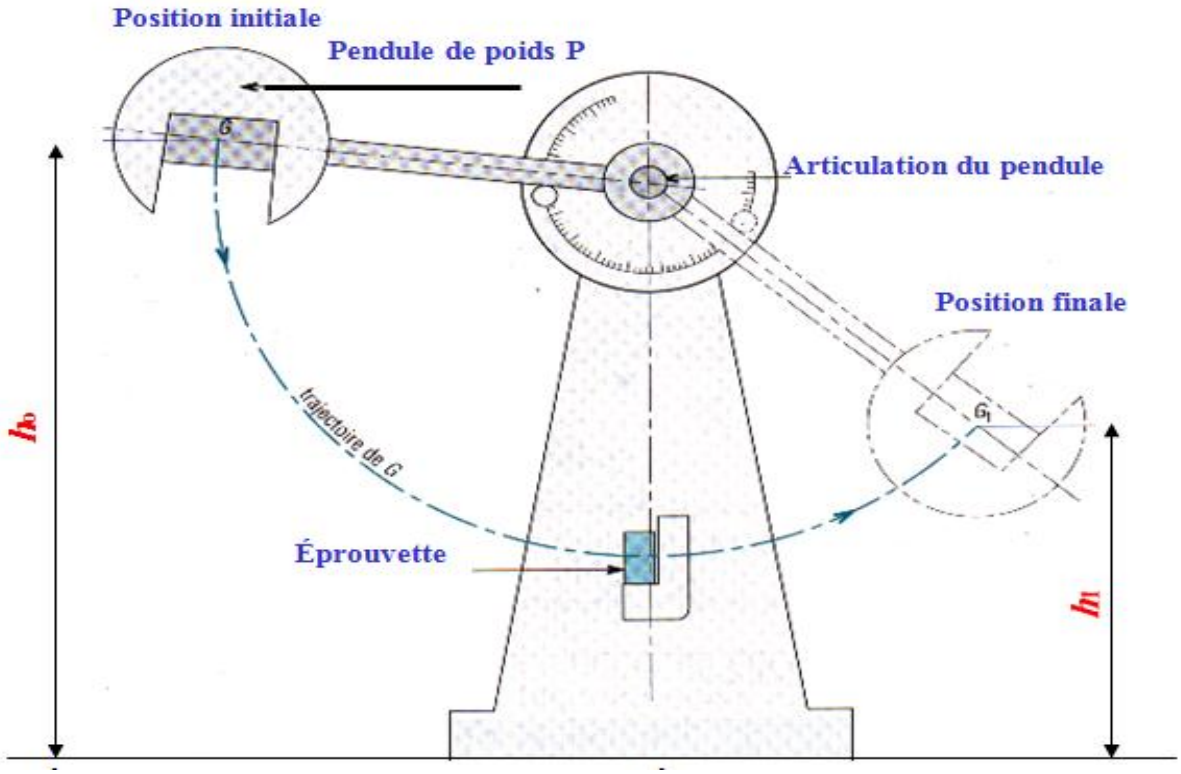


Figure III. 15. Essai de résilience

➢ **Conditions de réalisation de l'essai**

• L'essai est réalisé à une température ambiante.

• L'éprouvette doit être disposée sur les appuis du mouton de Charpy, de manière à ce que l'arrête du couteau du mouton vienne la frapper dans le plan de symétrie de l'entaille et sur la surface opposée à celle-ci.

• Pour l'essai normal, l'énergie nominale du mouton doit être de 300 joules.

• Si pendant l'essai, l'éprouvette ne se rompt pas complètement, la valeur obtenue pour larésilience est incertaine, dans ce cas il faudra mentionner : « Eprouvette non rompue par X joules », et on relèvera l'angle de rupture de la pièce

III.4. Détermination des forces d'estampage à chaud

III.4.1. Effort d'estampage avec et sans frottement

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

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

L'effort nécessaire pour estamper des pièces cylindriques dépend des diamètres et des hauteurs des pièces, du type de matériau, de la pression de compression de la machine hydraulique, de la vitesse de déformation, du jeu entre pièce-matrice avec ou sans lubrification.

III.4.1.1. Contrainte d'écoulement

Afin de diminuer l'effort nécessaire à la mise en forme, il est nécessaire de chauffer. On trouvera dans la figure III.16, l'influence de la température sur la contrainte d'écoulement du métal estampé. Dans le domaine de forgeage particulièrement le matriçage, les fours sont des équipements destinés à chauffer ou à réchauffer des pièces en métal avant de leur faire subir des déformations plastiques.

- **Détermination du rapport géométrique d'écrasement K_2**

  Est un paramètre géométrique qui consiste à appliquer sur un lopin cylindrique de diamètre D_0 et d'une hauteur h_0 en cours d'estampage. Il entre dans le calcul de l'effort d'estampage sans frottement (équation II.2)

  K_2 = Grandeur qui va diminuer /grandeur qui va augmenter

$$\mathbf{K_2 = H/D} \qquad \text{(III.11)}$$

  K, rapport géométrique d'écrasement,

  H, Hauteur du Lopin, (Grandeur qui va diminuer en fonction des frappes)

  D, Diamètre du lopin, (grandeur qui va augmenter en fonction des frappes)

Tableau III. 12. Rapport géométrique d'écrasement K_2.

H	500	480	460	440	420
D	300	320	340	360	380
K_2=H /D	1.66	1.50	1.35	1.22	1.1

Tableau III. 13. Contrainte d'écoulement à haute température.

Température (°C)	Température (K)	Contrainte d'écoulement à 3 vitesses de déformation		
		0.1 s^{-1}	0.01 s^{-1}	0.001 s^{-1}
0	273.15	962.65739	607.39575	383.24081
200	473.15	583.88122	368.40414	232.4473
400	673.15	354.14186	223.44841	140.98641
600	873.15	214.7979	135.52831	85.512583
800	1073.15	130.28151	82.202076	51.866003
1000	1273.15	79.01973	49.858079	31.458321
1200	1473.15	47.927889	30.240454	19.080436

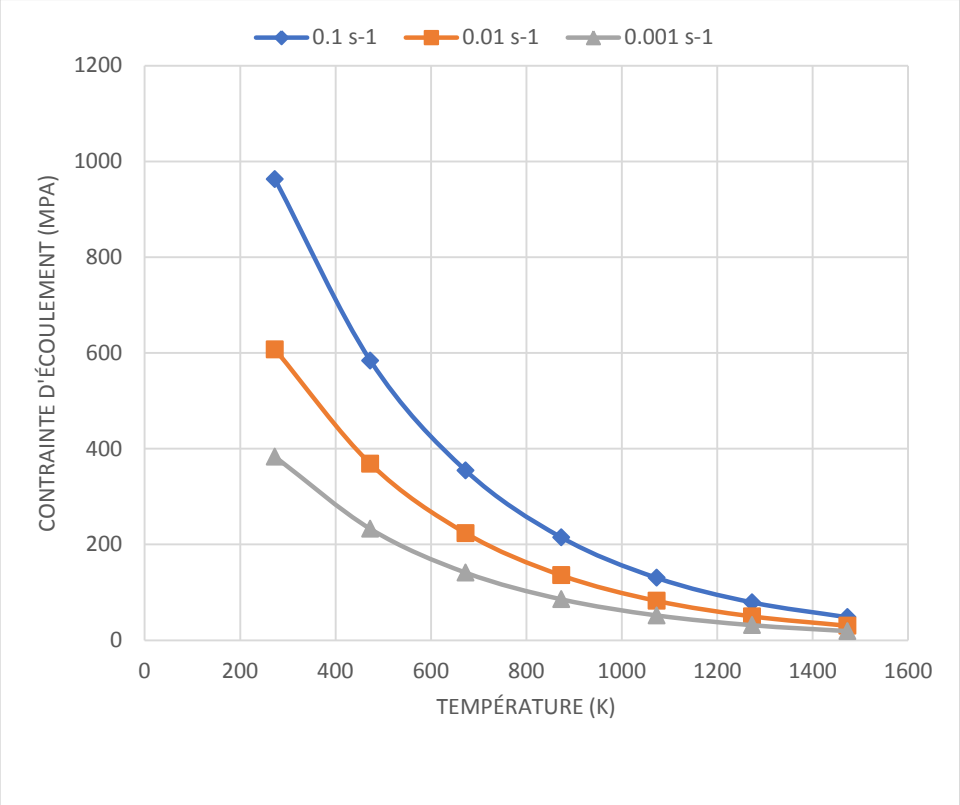


Figure III. 16 Contrainte d'écoulement en fonction de température pour trois vitesses de déformation ;

Tableau III. 14 Force de Forgeage par estampage à chaud avec et sans frottement.

Force sans frottement (N)	Force avec frottement (N)
1511372.1	1647395.6
916693.52	999195.93
556002.72	606042.97
337232.7	367583.64
204541.97	222950.75
124060.98	135226.46
75246.786	82018.997

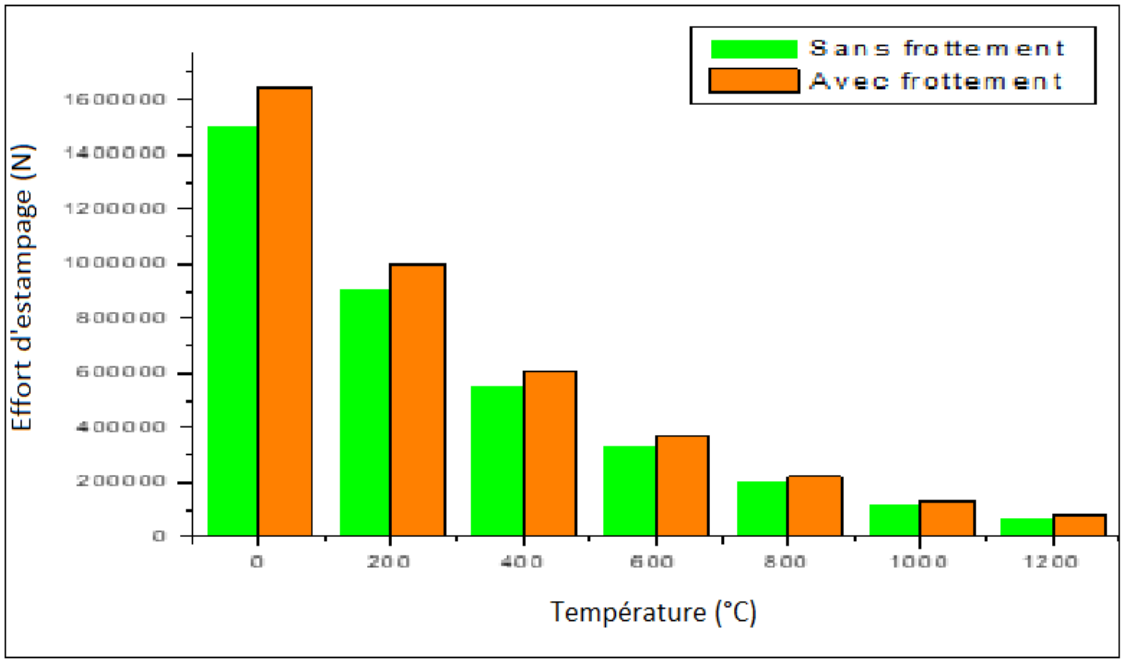


Figure III. 17. Histogramme des efforts d'estampage en fonction de la température.

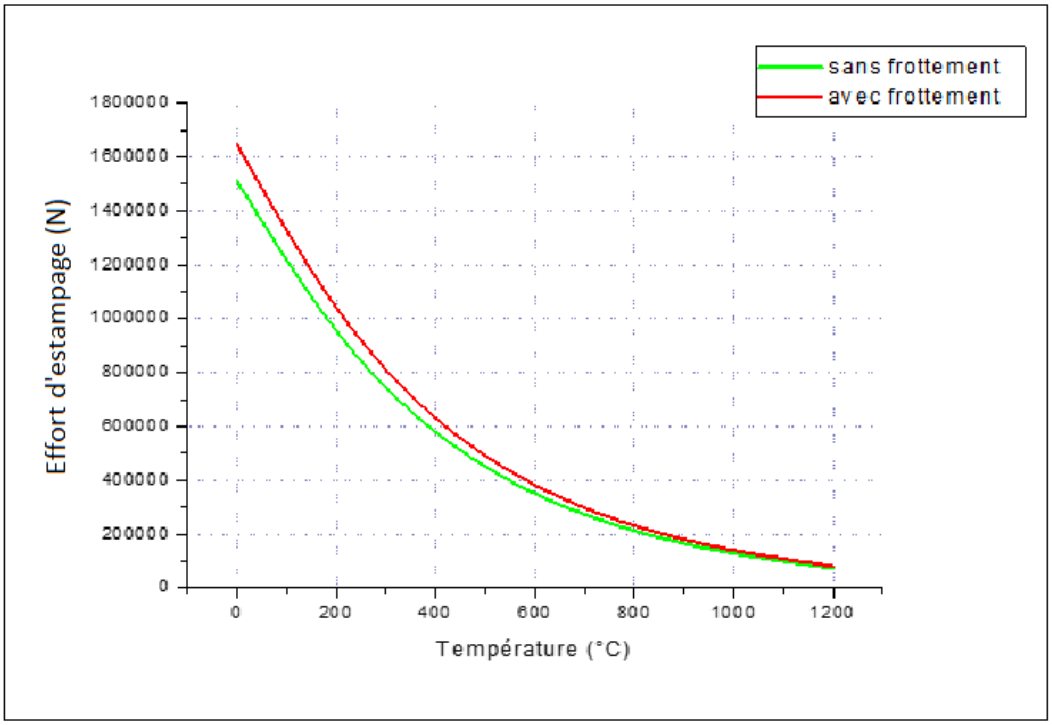


Figure III. 18. Effort d'estampage en fonction de la température.

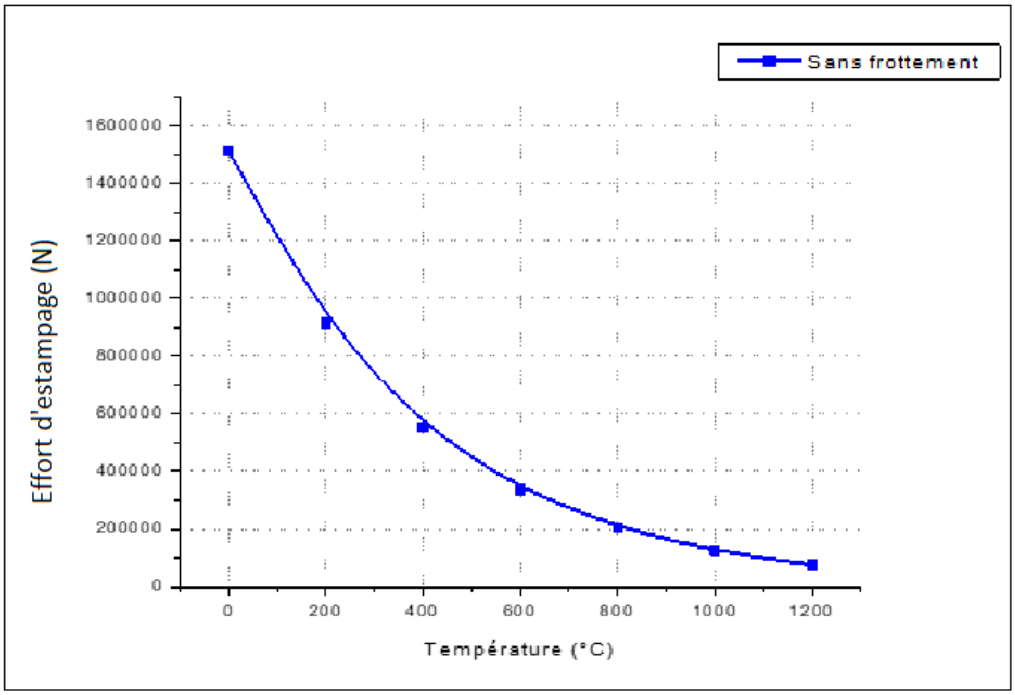


Figure III. 19. Effort d'estampage sans frottement en fonction de la température.

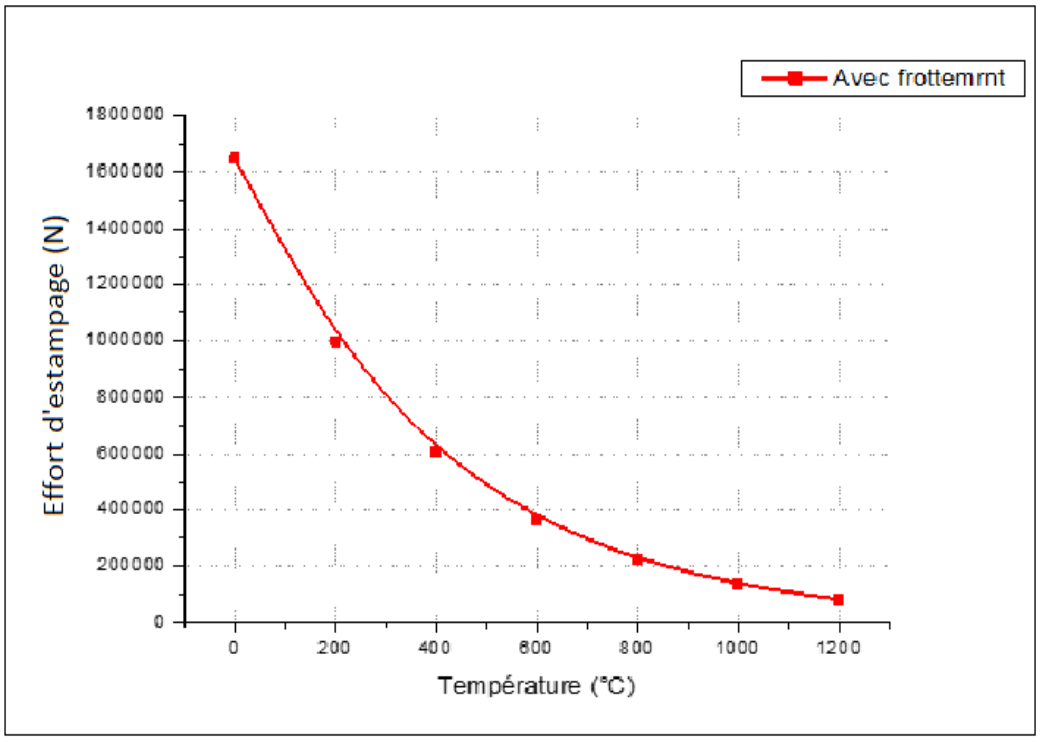


Figure III. 20. Effort d'estampage avec frottement en fonction de la température.

III.5. Analyse et discussion des résultats

Il est coutume de dire que chaque secteur industriel à les performances de ses matériaux. Le choix d'un métal pour un certain but d'utilisation, s'effectue sur la base de ses propriétés

physico-chimiques, mécaniques et technologiques. Les essais mécaniques font partie de la technique des métaux, leur but est de caractériser ou d'évaluer numériquement les propriétés du matériau. La connaissance des grandeurs caractéristiques et leur détermination sont les conditions essentielles pour les calculs des dimensions des différents éléments de construction. Les essais expérimentaux de traction (figure III.4 et III.5), de dureté (figure III.7), ont donné le comportement du matériau avant et après estampage réalisés à L'ETRAG.

Pour faire de la déformation plastique, il faut que l'effort exercé sur le lopin engendre un état de contrainte vérifiant le critère de plasticité, à savoir que la contrainte généralisée soit égale à la contrainte d'écoulement du métal.

Avant estampage l'acier présente ses propriétés de base sans déformation (figure III.19). Après estampage et avant traitement thermique, les propriétés mécaniques de l'acier dépendent principalement de sa vitesse de refroidissement (figure III.20). La pièce présente une excellente résistance grâce à l'orientation des fibres qui s'alignent selon les lignes d'effort, mais elle est généralement hétérogène, dure et difficile à usiner. L'acier est donc composé de grains et de plus ou moins d'impuretés inter-granulaires. Lors des premières opérations de mise en forme, que ce soit en Sidérurgie ou en Forge, à partir de métal issu de la coulée le plus souvent continue, on déforme les grains et les inclusions. Cet ensemble s'allonge dans le sens de la déformation. Ce sont les inclusions inter-granulaires allongées qui constituent ce que l'on appelait autrefois le « fibrage » du métal, à cause de l'analogie d'aspect entre un « métal fibré » et une planche de bois. Le fibrage est une expression uniquement qualitative qui met en évidence la déformation du métal par l'alignement des impuretés (qu'il contient). Il est donc apparu nécessaire de quantifier la déformation : on parle de « corroyage ». Le corroyage se mesure par son taux : c'est la section initiale du produit rapporté à sa section finale pour laquelle on cherche à le calculer.

Pour faire de la déformation plastique, il faut que l'effort exercé sur le lopin engendre dans la pièce un état de contrainte vérifiant le critère de plasticité, à savoir que la contrainte généralisée soit égale à la contrainte d'écoulement du métal. La (figure III.16) montre l'évolution de la contrainte d'écoulement, de la quantité limite de déformation en fonction de la température. Il faut bien entendu que l'effort exercé soit inférieur avec la température. Cette contrainte d'écoulement est la base de calcul de l'effort d'estampage en fonction de la température. Pour mettre en évidence la sensibility et l'effet du comportement de la vitesse de deformation sur les propriétés de resistances. La figure II.16, montre l'evolution de la contriante d'écoulement avec l'augmentation des vitesses de deformation, qui augmente l'écoulement avec la température.

L’allure générale de force d’estampage suit le comportement des contraintes d’écoulement en fonction de la température. L’évolution de la température à pour conséquence la diminution des propriétés de résistance et d’augmenter la ductilité. L’effort d’estampage sans frottement constitue, le meilleur compromis : simplicité technologique, efforts moindres, avec des valeurs réduites tout en tenant compte de la capacité de la presse et du temps de forgeage par estampage (figure III.19). Cela est du a l’absence de la force de frottement qui exige des pressions moins élevées, compte tenu des grandes surfaces d'appui. Par contre l’effet de frottement nettement marqué dans le cas de prise en compte de force supplémentaire (frottement) qui donne des efforts importants avec des valeurs élevées (figure III.20). Au cours du chauffage, les lopins se revêtent d'une couche dure d’oxydes appelée couramment calamine. Après estampage, on constate que cette couche ne s'est pas comportée comme le métal de base. Elle est moins déformable. La calamine a toujours une épaisseur faible mais une structure et une morphologie complexes.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

La mise en forme de l'acier par déformation plastique à chaud est un procédé industriel d'obtention de pièces mécaniques, aussi appelé : forge par estampage. Il est utilisé aussi bien en petites qu'en moyennes et qu'en très grandes séries dépièces, dont la masse peut varier de quelques grammes à plusieurs centaines de kilogrammes.

Le principal d'intérêt de l'estampage face à la fonderie est une mise en forme de la structure interne de l'acier, conduisant à des caractéristiques mécaniques supérieures. La fonderie ne permet pas cette déformation interne car la structure de l'acier apparaît lors de la transition entre les phases liquide et solide. Semblable aux autres techniques de forge, l'estampage améliore les propriétés du matériau de la pièce finale.

Un poste d'estampage à chaud est un système complexe constitue de trois sous-systèmes à considérer dans leur contexte thermique spécifique :

- Sous-système mécanique : il comporte toutes les conditions et moyens nécessaires à la réalisation de l'opération de forgeage.

- Sous-système métallurgique : il concerne essentiellement l'outil avec les choix du matériau, de son traitement thermique, des traitements et revêtements superficiels, qui permettent d'obtenir les structures et donc les propriétés recherchées.

- Sous-système tribologique : constitué de tous les paramètres qui conditionnent l'interface matériau forgé-outil

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[1] Leila. L, Tadej. M, Goran. K & Milan. T. 'Analysis of the main types of damage on a pair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms'. Elsevier. Engineering Failure Analysis 18 2011 pp 1143-1152.

[2] Baqué P., Felder E., Mise en forme des métaux, calcul de la plasticité,, edition dunod 1973.

[3] Houzard G. les grosses forges, Normandie 1980, 245.

[4] Bouteghmes Djamel, procédés de mise en forme des matériaux, Universite de batna 2, cours 2020/2021, page 3.

[5] Mise en forme des produits Vol 14B, *ASM Handbook*, ASM International, 2006, p 3–10.

[6] Adda Y., Dupouy J.M., « Eléments de métallurgie physique », Documentation Française, Paris 1976.

[7] Gupta A., Mineral processing design and operations: An introduction, Edition, Lavoisier 2008.

[8] Mohamed Karmaoui , procédés de transformation et mise en forme des matériaux, polycopie Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2019-2020, p. 68.

[9] Document Internet, Laminage à chaud: Reliance-foundry.com/wp-content/uploads/hot-rolled steel.

[10] BENGASMI Ilyes El Houari, Lamine à chaud, Mémoire Master, université Badji Mokhtar, Annaba, 2017/2018, p. 18.

[11] Bouchelarm mohammed amine, procédés de mise en forme, polycopié pédagogique département de génie mécanique, université djillali liabes de sidi bel abbes , 2021/2022,

[12] Bernard J., Michel A., Philibert J., Talbot J., « Métallurgie générale », 2ème édition Masson, Paris 1984.

[13] Boussaha khaled, Fabrication D'un Moyeu De Roue Par Estampage, mémoire de master, département de génie mécanique, université Badji Mokhtar, Annaba, 2018/2019, page 15, 31, 32.

[14] Kevin Le Meurn, Etude du procédé d'estampage de plaques composites thermo-plastiques et recherched'une méthodologie effciente pour l'analyse de la faisabilité d'une pièce complexe. These, Mécanique. INSA de Lyon, 2015. Submitted on 18 Dec 2020, page36.

[15] Dieter G.E., Kuhn H. A., Semiatin S.L., ASM international : handbook of workability and process design, 2003, p. 414.

[16] Frediric Guinot, le forgeage à chaud, Farinia groupe, p.1-3. https://www.farinia.com/forge/forge/forge-à-chaud-procédé-de-fabrication

[17] fr.dreamstime.com /photo-stok-chaine-production-chaude-piéce-forgéee-image 4346071.

[18] Anne Boniou, les services industrielles du travail des métaux, p. 171.

[19] Document Internet, www.transval.com /fr /blog /forge-pour-le-forgeage-libre.

[20] José Antonio Ares, Technique de fer forgé, Eyrolles, 2008, P. 144.

[21] Abderahmane A.R.O., Hot forging of spur gears, ph D. thesis, Birmingham university 1973.

[22] Hadjaj Ousama, usinage d'un balancier de bogie, Mémoire de master, université Badji Mokhtar- Annaba, 2020/2021, p.21.

[23] Document internet, http// ressources.unit .eu /cours/media Me f3/conception-piéce-forgees/co/principe.genraux de conceptionet de trace de piéce forge html.

[24] Marcel Gaucheron , mise en forme de L'acier par estampage , Technique d'Ingénieur M3200 ; page 2, 5, 6, 7.

[25] Machining Data Handbook. 3eéd., Institute of Advanced Manufacturing Sciences Inc., Cincinnati, Ohio (USA) (1980).

[26] Guy BOSTBARGE, Henri FAURE et Yann GOBARD , Choix de l'acier et procédés, Forgeage à froid de l'acier, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M3 085 2007.

[27] Serajzadek. S, Mirbagheri. S.M.H, Karimi Taheri. A and Zebarjad. S.M. 'Modelling of meatl flow during hot forging with regard to microstructural aspects.Elsevier. International journal of Machine Tools & Manufacture 44 2004 pp 1537-1545.

[28] P. P0UPEAU, traitements thermiques des métaux et alliages, M1105. https://www.techniques ingénieure. Fr / M1105 ;10 déc. .2003-1981.

[29] SUZUKI (H) Et xcoll. Studies on the flowstress of metals and alloys.Report of the Institute of industriel science , Université of Tokyo , 18,no 3 , Serial no 117, 102 mars 1968, P. 122.

[30] Bensaada S., D . feliach D., TECHNOLOGIE 2éme partie, office des publications universitaires, Ben-Aknoun (Alger).ISBN 996 101 023-X.

[31] Raymond langevin et al, guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique, Ben-AKnoun (Alger). ISBN 996 101 O23-X.

[32] M. COLOMBIE, Matériaux industriels, matériaux métalliques ; DUNOD, paris 2000.

[33] Bouhbila H. comportement tribologique du couple acier-acier :42CrMo4-20MnCr5

[34] Document Internet, Fiche technique de l'acier 20MC5, MDS (service) : Http : www.métauxdétail.fr/index PHP

[35] Marzougui thabet. Caractérisation du procédé d'emboutissage des tôles en acier, mémoire de master 2017/2018, page 43.

[36] Kobayashi T., Effect of strain ratios on the deforming limite of steel sheet and its application to actuel presse forming.iddrg congress, amsterdam, oct. 1972.

[37] Document Internet. Essai de traction ; principe et méthodes Elasticité (physique) ingénierie de produit.

[38] Gharbi Brahim, Généralités essai brinell/université batna2. Document Internet, staff .univ-batna2.dz/sites/defaut/files/gharbi-brahim/essais_de_durete.pdf.