
Université Abbes Laghrour Khenchela



جامعة عباس لغرور خنشلة
Faculté de Sciences et Technologie
كلية العلوم و التكنولوجيا
Département de Génie Mécanique
قسم الهندسة الميكانيكية



Mémoire

de fin d'études pour l'obtention du diplôme
Master (LMD)

Spécialité : Génie Mécanique
Option : Génie des Matériaux

Thème

**Etude et identification du procédé de moulage
non permanent, incorporé dans la chaîne de
fabrication mécanique.**

Réalisé par :

- Merah Mourad

Dirigé par : Dr. GHELANI.L

Membres de jury :

- Chitour M. / Prés.
- Himeur N. / Exam.

Année universitaire : 2018-2019

Dédicace

*Je dédie ce fruit de cette année d'étude
aux plus chères au monde :*

+ A ma mère qui soit toujours ma faveur ;

+ A mon père pour son soutien ;

+ A mes chers frères ;

+ A mon sœur ;

*+ A la seule personne qui a cru en moi mon bien-aimé
Wissam.*

Merah Mourad

Remerciements

Au nom de Dieu clément et miséricorde Dieu le grand merci lui revient, pour son aide et la volonté qu'il nous a donné pour surmonter tous les obstacles et les difficultés durant cette année d'études et de nous avoir éclairé notre chemin afin de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont permis de mener à bien notre projet de master tant sur le plan scientifique que sur le plan personnel.

Nos remerciements s'adressent tout d'abord à notre directeur de thèse Monsieur : Dr. GHELANI Laala pour son aide et son encadrement sans faille et qui nous a permis de vivre une expérience très enrichissante à tous les niveaux, sans oublier ses judicieux conseils et son soutien constant tout au long du projet, Merci pour tous Mr.

Nous remercions vivement nos enseignants de département de Génie Mécanique.

Nous tenons fortement à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et pour leur temps qu'ils ont consacré pour évaluer ce travail.

Nous adressons aussi toutes nos gratitude au doyen de la faculté : Dr : Abboudi Abdelaziz pour son aide et ses conseils judicieux ;

Il nous est également important de remercier les différentes personnes que nous ont pu côtoyer durant cette année passée au département de Génie Mécanique et qui ont créé une ambiance chaleureuse et amicale.

Nos remerciements s'adressent également aux personnes chargées de l'administration.

A tous les professeurs et cadres qui ont contribué à notre formation de près au de loin ;

Sans oublier nos amis et collègues de la promotion 2018/2019.

Merah M.

Table des matières

Liste des Figures

Index des tableaux

Introduction générale

Introduction générale	1
Chapitre I / Différents procédés de fabrication mécanique.	2
I.1 Généralité.....	3
I.2 Technique de fabrication mécanique.....	3
I.2.1 Obtention par enlèvement de matière	3
I.2.1.1 Tournage.....	3
I.2.1.1.1 Différents types d'opérations.....	4
(a) Tournage extérieur.....	4
(b) Tournage intérieur.....	5
I.2.1.1.2 Tournage de pièces métalliques.....	6
I.2.1.1.3 Principaux usinages réalisables sur un tour.....	6
(a) Chariotage.....	6
(b) Dressage.....	7
(c) Chanfreinage.....	7
(d) Centrage	7
(e) Le perçage.....	8
(f) Alésage.....	8
(g) Rainurage.....	9
(h) Tronçonnage.....	9
(i) Filetage et taraudage.....	9
(j) Tournage de forme.....	10
(k) Détalonnage.....	10
I.2.1.2 Fraisage.....	11
I.2.1.2.1 Principe de travail.....	11
I.2.1.2.2 Modes de fraisage.....	11
(a) Fraisage de face.....	11
(b) Fraisage de profil.....	12
(1) Fraisage en opposition.....	12
(2) Fraisage en concordance ou « en avalant ».....	13
I.2.1.3 Perçage.....	13
I.2.1.4 Brochage.....	14
I.2.1.5 Rectification.....	15
I.2.1.6 Découpage.....	16
I.2.1.6.1 Découpage laser.....	16
I.2.1.6.2 Découpage par jet d'eau.....	17
I.2.1.6.3 Découpage plasma.....	17
I.2.1.7 Electroérosion.....	18
I.2.1.7.1 Usinage en plongée (enfonceage).....	18
I.2.1.7.2 Usinage par découpage à fil.....	19
I.2.2 Obtention par déformation plastique.....	20

I.2.2.1 Forgeage.....	20
I.2.2.2 Laminage.....	21
I.2.2.3 Emboutissage.....	22
I.2.2.4 Estampage.....	22
I.2.2.5 Matricage.....	23
I.2.2.6 Filage.....	24
(a) Filage direct.....	24
(b) Filage inverse.....	24
(c) Filage inverse en conteneur.....	25
(d) Filage sur aiguille.....	25
I.2.2.7 Tréfilage	25
I.2.2.8 Cintrage	26
I.2.2.9 Pliage.....	26
I.2.2.10 Extrusion	27
I.2.3 Obtention par fusion (moulage).....	28
I.2.3.1. Moulage non permanent (moulage au sable).....	28
I.2.3.2 Moules permanents.....	29
I.2.3.2.1 Moulage en coquille par gravité.....	30
I.2.3.2.2 Moulage sous pression.....	30
I.2.4 Obtention par assemblage.....	31
I.2.4.1 Soudage.....	31
I.2.4.2 Collage.....	32
I.2.4.3 Rivetage.....	32
I.2.4.4 Agrafage.....	33
I.2.5 Obtention par frittage.....	34

Chapitre II / Etude et conception du procédé de moulage non permanent des pièces métalliques.	36
---	----

II.1 Généralités.....	37
II.2 Fonderie.....	37
II.2.1 Principe de fonderie.....	37
II.2.2 Processus de fonderie.....	38
II.2.3 Vocabulaire technique utilisé en fonderie.....	40
II.2.4 Matériaux principaux de la fonderie.....	41
II.2.4.1 Aciers.....	41
II.2.4.2 Fontes.....	42
II.2.4.3 Aluminium et alliages légers.....	42
II.2.4.4 Zinc et alliages de zinc.....	43
II.2.4.5 Cuivre et alliages de cuivre.....	43
II.2.4.6 Sables	43
II.2.4.6.1 Sables de fonderie.....	43
II.2.4.6.2 Composition des sables de fonderie.....	43

II.2.4.7 Liants.....	44
II.2.4.8 Produits annexes et divers.....	44
II.2.5 Différents type de fonderie.....	45
II.2.5.1 Le moule non permanent.....	46
II.2.5.1.1 Opération d'exécution d'un moule non .p.....	47
(a) Confection de la partie inférieure du moule.....	47
(b) Confection de la partie supérieure du moule.....	47
(c) Démoulage du modèle et du mandrin.....	47
(d) Remoulage.....	48
(e) Coulée du métal.....	48
(f) Décochage.....	49
(g) Le dessablage.....	49
(h) Ebarbage.....	49
II.2.5.2 Le moule permanent.....	49
(a) Matériau du moule permanent.....	50
(b) Fabrication du moule permanent.....	50
II.2.6. Conception des modèles	50
II.2.6.1 Criques.....	51
II.2.6.2 Retassures.....	51
II.2.6.3 Masselottes.....	52
II.2.6.4 Surépaisseur d'usinage.....	53
II.2.6.5 Retrait.....	53
II.2.6.6 Dépouille.....	53
II.2.6.7 Noyau et boîte à noyau.....	54
II.2.6.8 Congés.....	56
II.2.6.9 Portées de noyau.....	56
II.2.6.10 sable de fonderie	56
II.2.6.11 composition des sables de fonderie.....	56
II.2.7 Caractéristiques du processus du moulage au sable.....	56

Chapitre III / Procédure expérimentale Application du procédé de moulage non permanent « réalisation d'une pièce quelconque ».	58
--	----

III. Partie pratique.....	59
III.1 Données de départ.....	59
III.1.1 Dessin de définition de la pièce.....	59
III.1.2 Caractéristique des matériaux utilisés de la pièce moulée.....	60
III.1.3 Sens de moulage.....	60
III.1.4 Conception du modèle et de noyaux.....	61
III.1.5 Les paramètres de la masselotte.....	62
III.1.6 Le système de remplissage.....	63

III.2 Gamme de moulage de la pièce.....	64
Conclusion	
Références bibliographiques	

Liste des figures

Chapitre I : Différents procédés de fabrication mécanique.

Fig. I.1 : Schéma d'élaboration de tournage mécanique.....	4
Fig. I.2 : Usinage externe sur tour.....	5
Fig. I.3 : Principales opération de tournage interne sur tour.....	5
Fig. I.4 : Schéma représenté l'opération de chariotage.....	6
Fig. I.5 : Schéma d'élaboration de dressage.....	7
Fig. I.6 : Opération de Chanfreinage.....	7
Fig. I.7 : Opération de centrage.....	7
Fig. I.8 : le perçage Sur une perceuse.....	8
Fig. I.9 : Schéma de réalisation d'un alésage.....	8
Fig. I.10 : Schéma montré l'opération de rainurage.....	9
Fig. I.11 : Opération de tronçonnage.....	9
Fig. I.12 : Opération de filetage, a) intérieur (taroudage),b) extérieur (filetage).....	10
Fig. I.13 : Tournage de forme.....	10
Fig. I.14 : Profil d'une fraise de forme à denture détalonnée.....	10
Fig. I.15 : Principe de fraisage.....	11
Fig. I.16 : Schéma de fraisage de face.....	12
Fig. I.17 : Fraisage de profile.....	12
Fig. I.18 : Fraisage en opposition.....	13
Fig. I.19 : Fraisage en avalant.....	13
Fig. I.20 : Schéma de perçage.....	14
Fig I.21 : Nomenclature des broches, (a) Broches de formes internes, (b) Broches de formes externes.....	14
Fig. I.22 : Principe de rectification plane.....	15
Fig. I.23 : Presse hydraulique à découper.....	16
Fig. I.24 : Machine de découpage laser.....	16
Fig. I.25 : Découpage par jet d'eau.....	17
Fig. I.26 : Découpage plasma réalisé par un robot industriel.....	18
Fig. I.27 : Principe de fonctionnement électroérosion (Enfonçage).....	19
Fig. I.28 : Principe de fonctionnement électroérosion (Robot- fil).....	19
Fig. I.29 : Schéma d'élaboration par forgeage (pièces forgées).....	20
Fig. I.30 : Cage universelle et cage refouleuse : laminage des poutrelles.....	21
Fig. I.31 : Principe d'emboutissage (pièces forgées).....	22
Fig. I.32 : Schéma d'élaboration par estampage.....	23
Fig. I.33 : Schéma d'élaboration par matriçage.....	23
Fig. I.34 : Produits filés en alliage d'aluminium.....	24
Fig. I.35 : Atelier de tréfilage.....	26
Fig. I.36 : Procédés de cintrage.....	26

Fig. I.37 : Schéma d'élaboration de pliage de tôles.....	27
Fig. I.38 : Extrusion des pièces de différentes formes.....	27
Fig. I.39 : Pièce métallique que moulée.....	28
Fig. I.40 : Moulage en sable.....	29
Fig. I.41 : Moulage en coquille.....	30
Fig. I.42 : Moulage sous pression.....	31
Fig. I.43 : Schéma d'assemblage par soudage.....	32
Fig. I.44 : Schéma d'assemblage par collage.....	32
Fig. I.45 : Schéma d'assemblage par rivets.....	33
Fig. I.46 : Schéma d'une agrafeuse manuelle professionnelle.....	34
Fig. I.47 : Schéma d'élaboration par frittage... ..	34
Fig. I.48 : Plaquette de coupe amovible pour outil d'usinage en céramique frittée.....	35

Chapitre II : Etude et conception du procédé de moulage
non permanent des pièces métalliques.

Fig. II.1 : Pièce moulée (Bloc moteur).....	38
Fig. II.2 : Technique de fonderie.....	41
Fig. II.3 : Exemple de fonderie en sable à gauche et en métal à droite.....	46
Fig. II.4 : Moulage en sable.....	46
Fig. II.5 : poches de coulé.....	48
Fig. II.6 : système de coulée.....	49
Fig. II.7 : Exemple de moule permanent.....	50
Fig. II.8 : Formation d'une crique liée à la formation d'un point chaud dans la partie massive.....	51
Fig. II.9 : Retassures externes et internes, et ajouts de masselottes limitant le phénomène.....	52
Fig. II.10 : Conception du moule avec masselottes.....	52
Fig. II.11 : Schéma de variation de volume de l'acier, depuis l'état liquide.....	53
Fig. II.12 : Illustration de l'intérêt de la dépouille lors du démoulage.....	54
Fig. II.13 : Exemples de boîtes à noyaux	54

Chapitre III / Procédure expérimentale.
« réalisation d'une pièces métallique ».

Fig. III.1 : Dessin de définition.....	59
Fig. III.2 : La pièce moulée (la bouche d'aspiration).....	60
Fig. III.3 : Plan de joint.....	61
Fig. III.4 : Préparation (Traçage) de noyau.....	61
Fig. III.5 : Boîte de noyau et noyau.....	62
Fig. III.6 : Profil des cols de liaison.....	62
Fig. III.7 : Positions des masselottes.....	63
Fig. III.8 : Coulée en chute- source.....	64
Fig. III.9 : Partie inférieure du moule.....	64
Fig. III.10 : Partie supérieure du moule.....	65
Fig. III.11 : Séparation des deux châssis.....	65
Fig. III.12 : Noyau.....	66

Fig. III.13 : demis moules de moulage (supérieur et inférieur).....	66
Fig. III.14 : La séparation de pièce.....	
Fig. III.15 : pièce moulée (obtenue).....	67

Liste des tableaux

Chapitre III : « Modélisation d'une pièce métallique ».

Tab. III.1 : Caractéristiques des matériaux utilisés de la pièce..... 60

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, la fonderie représente un secteur important de l'activité industrielle, fournissant des produits finis directement utilisables, ou des pièces venant s'intégrer dans des ensembles mécaniques une fois qu'elles sont usinées.

Suivant le type d'activité, on classe les fonderies en 3 grands secteurs :

- Fonderie pour production de moyenne et grande série : installations souvent très mécanisées et automatisées. Dans cette catégorie on distingue les fonderies intégrées appartenant à un ensemble industriel et fournissant les pièces brutes nécessaires à la fabrication du groupe, et les fonderies autonomes appelées aussi fonderies sur modèles, celui-ci étant réalisé d'après les plans du client.
- Fonderie de pièces unitaires et de petites séries : elles utilisent des procédés de moulage en sable.
- Fonderie d'art et d'ornement : elles mettent en œuvre des procédés de moulage traditionnel mais aussi le moulage en cire perdue. Ces fondeurs ont associé par leur talent le nom de la fonderie aux œuvres des plus grands artistes sculpteurs.

Ce manuscrite est divisé en trois chapitres :

- **Le 1^{er} chapitre** : donne une idée générale sur les différents procédés d'usinage mécanique ;
- **Le 2^{eme} chapitre** : est réservé à l'étude, conception des pièces à l'aide de moulage au sable à moule non permanent ;
- **Le 3^{eme} chapitre** donne une présentation générale de la gamme d'usinage de quelques pièces mécanique.

Cette recherche sera parachevée par une conclusion générale.

Chapitre I /
Différents procédés de fabrication
Mécanique.

I.1 Généralité

Ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication. Ces procédés de fabrication font partie de la construction mécanique. Les méthodes de fabrication varient de temps en temps pour augmenter et d'évoluer et de devenir la productivité beaucoup plus facile et plus rapide et une consommation réduite de matières premières, limitée à ces méthodes dans les trois grands groupes qui sont :

- (1) Obtention par enlèvement de la matière qui est l'usinage ou coupe de matière et qui occupe une place de première importance en construction mécanique;
- (2) Obtention par sans enlèvement de matière et parmi lesquelles on peut citer::
 - (a) Déformation plastique ;
 - (b) Fusion (fonderie) ;
 - (c) Assemblage (rivetage, boulonnage, soudage,...);
- (3) Obtention par frittage [1].

I.2 Technique de fabrication mécanique

I.2.1 Obtention par enlèvement de matière

Les procédés d'usinage par enlèvement de matière sont des techniques de mise en forme par arrachements de petits morceaux de matière (copeaux). Il existe de nombreux procédés d'usinage. De manière générale on appelle usinage ces procédés. On y distingue :

- Tournage ;
- Fraisage ;
- Perçage ;
- Rectification ;
- Electroérosion.... [2].

I.2.1.1 Tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme c'est le mouvement de coupe M_c . L'outil est animé d'un mouvement de translation parallèle ou oblique par rapport à l'axe de rotation c'est le mouvement d'avance M_f . Dans son mouvement, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice qui transforme la pièce en

un solide de révolution, en faisant varier le déplacement de l'outil (mouvement radial) il sera possible d'obtenir tous les solides de révolution tels que cylindre, cône, sphère, etc.

Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage. En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin ou dans une pince spécifique, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant. La combinaison de ces deux mouvements permet l'enlèvement de matière sous forme de copeaux voir (Fig. I.1) [3].

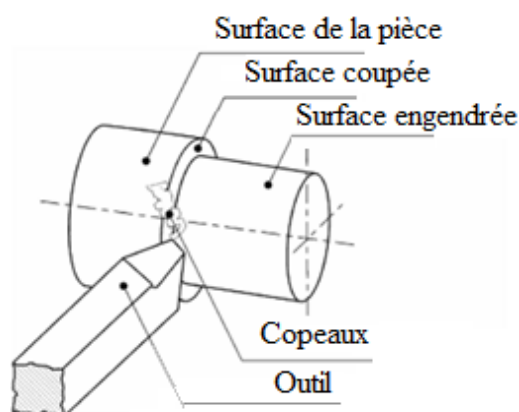


Fig. I.1 : Schéma d'élaboration de tournage mécanique.

I.2.1.1.1 Différents types d'opérations

(a) Tournage extérieur

On distingue :

- Tournage longitudinal (chariotage, axe z), réalisation d'un diamètre ;
- Tournage transversal (dressage, axe x), réalisation d'une face, d'un épaulement ;
- Tournage par profilage ou contournage, réalisé par copiage ou utilisation d'une commande numérique ;
- Tournage de gorges, dégagements ;
- Filetage, réalisation d'un pas de vis ;
- Tronçonnage.

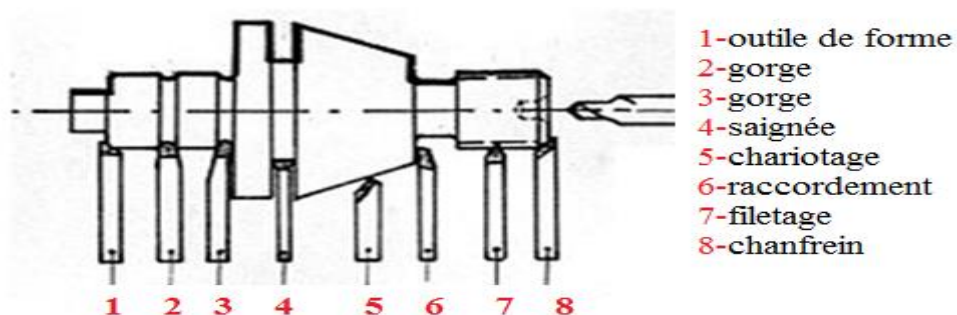


Fig. I.2 : Usinage externe sur tour.

(b) **Tournage intérieur** (Fig. I.3)

Usinage interne sur tour :

- Alésage ;
- Dressage ;
- Tournage intérieur par contournage ;
- Tournage de dégagement, gorges ;
- Taraudage, réalisation d'un filetage intérieur ;
- Chambrage.

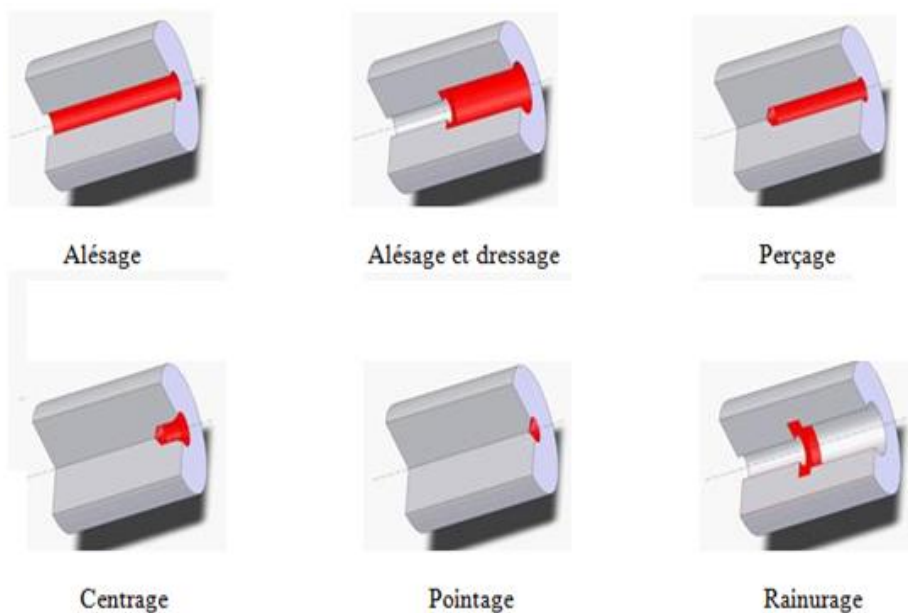


Fig. I.3 : Principales opérations de tournage interne sur tour.

I.2.1.1.2 Tournage de pièces métalliques

La fabrication d'une pièce métallique brute en tournage conventionnel se fait typiquement en cinq opérations :

- Ecroûtage du brut : on enlève la couche extérieure, qui a un mauvais état de surface et contient de nombreux défauts (calamine, corrosion, fissures, inclusions, écrouissage important, ...) ; il s'agit d'une passe d'environ 0.5 à 1 mm ;
- Contrôle du diamètre obtenu, ce qui permet de déterminer combien il faut enlever de matière pour arriver à la cote visée ;
- Passes d'ébauche d'une profondeur de plusieurs mm, pour enlever la matière ;
- Contrôle du diamètre avant finition ;
- Passe de finition, d'une profondeur inférieure à 0.5 mm mais supérieure au copeau minimum, afin d'avoir une bonne tolérance dimensionnelle et un bon état de surface.

I.2.1.1.3 Principaux usinages réalisables sur un tour

- Tournage cylindrique extérieur avec pointe et contre-pointe (entre pointes), appelé chariotage, avec passes de dégrossissage et de finition ;
- Dressage avec passes de dégrossissage et de finition ;
- Chariotage conique ou tournage conique par orientation du chariot porte outil avec passes de dégrossissage et finition ;
- Filetage, tronçonnage, perçage et tournage intérieur (alésage).

(a) Chariotage

Le chariotage donne une surface latérale cylindrique, ou conique extérieure, l'alésage, une surface intérieure cylindrique ou cambrage. (Fig. I.4) [4].

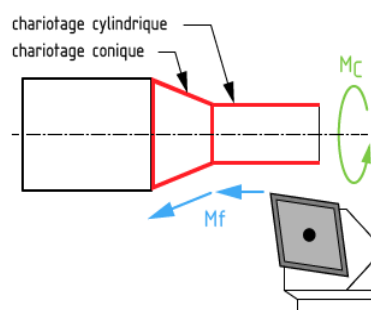


Fig. I.4 : Schéma représenté l'opération de chariotage.

(b) Dressage

Le dressage donne des surfaces planes perpendiculaires à l'axe de la broche, extérieur ou intérieur (Fig. I.5) [5].

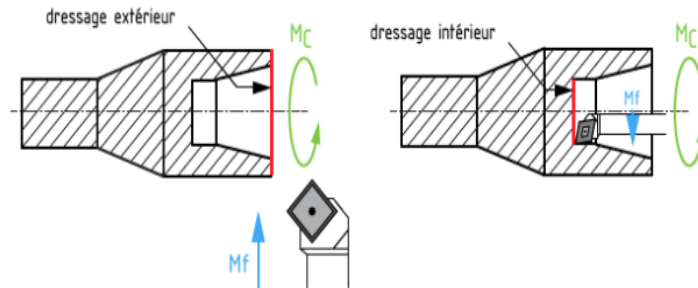


Fig. I.5 : Schéma d'élaboration de dressage.

(c) Chanfreinage

C'est une opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif (Fig. I.6) [5].

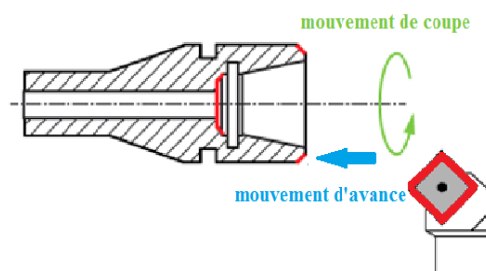


Fig. I.6 : Opération de Chanfreinage.

(d) Centrage

L'opération consiste à usiner à l'extrémité de la pièce à dresser un centre qui servira de logement à la pointe. Les axes des deux centres doivent se confondre avec l'axe géométrique de la pièce (Fig. I.7).

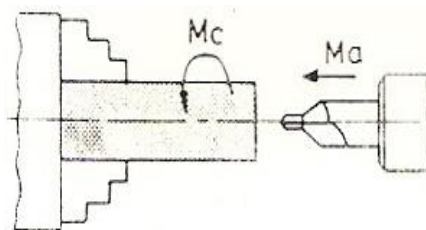


Fig. I.7 : Opération de centrage.

(d) Le perçage

Le terme de perçage regroupe toutes les méthodes ayant pour objet d'exécuter des trous cylindriques dans une pièce avec des outils de coupe par enlèvement de copeaux. En plus du perçage de trous courts et du forage de trous profonds, ce concept inclut également diverses opérations d'usinage consécutives, telles que brochage, alésage, réalésage et certaines formes de finition comme le calibrage et le galetage (Fig. I.8) [6].

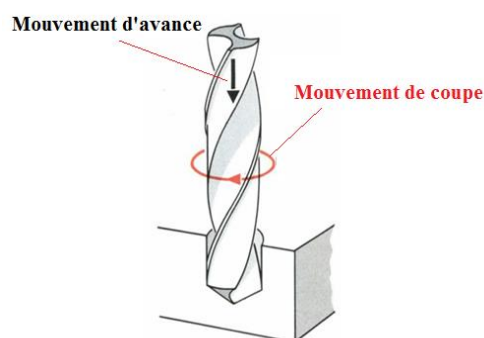


Fig. I.8 : l'opération de perçage.

(e) Alésage

C'est exécuter une forme de révolution intérieur. L'outil à aléser doit donc pouvoir pénétrer dans l'alésage. Lorsque le trou a été percé avec assez de précision, on peut calibrer au diamètre voulu avec un alésoir, ce qui est une opération rapide mais qui nécessite l'outil exactement approprié au diamètre ; cette méthode n'est en général employée que jusqu'à 20, voire 30 mm de diamètre. Sinon on utilise un grain d'alésage réglable assurant une très bonne précision du trou en position mais qui nécessite plusieurs passages, donc plusieurs porte outils: 1 ou 2 à partir d'un trou percé, 2 ou 3 pour un trou brut de fonderie. Il existe des têtes à aléser portant un seul outil réglable en diamètre soit manuellement, soit par la CN ; dans ce dernier cas, on peut réaliser des opérations de surfacage et d'alésage à différents diamètres ayant éventuellement un profil non rectiligne (Fig. I.9) [7].

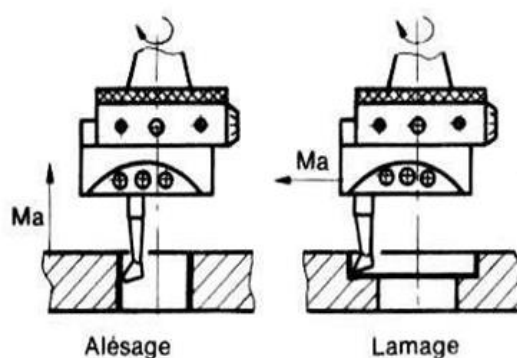


Fig. I.9 : Schéma de réalisation d'un alésage.

(f) Rainurage

Opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique par exemple (voir Fig. I.10) [5].

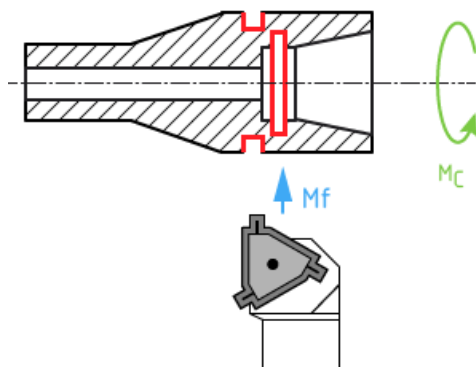


Fig. I.10 : Opération de rainurage.

(g) Tronçonnage

Le tronçonnage consiste à sectionner une barre ou à détacher la pièce du reste de la barre. Une saignée limitée en profondeur est une gorge, Le saignage consiste à usiner des gorges ou saignées sur la surface de la pièce (Fig. I.11).

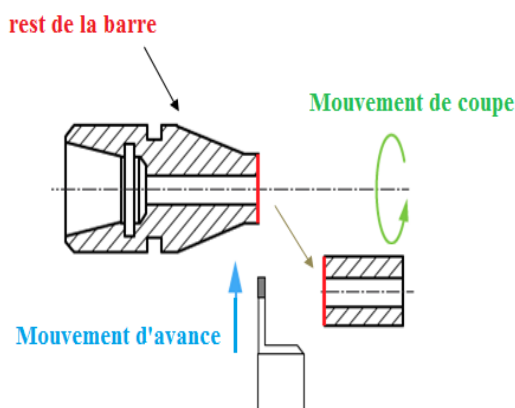


Fig. I.11 : Opération de tronçonnage.

(h) Filetage et taraudage

L'outil, dont le déplacement est longitudinal, creuse sur la pièce des rainure hélicoïdales laissant leur relief le filet, suivent la forme de l'outil on obtient un filet triangulaire, trapézoïdale, rond, carré (Fig. I.12) [8].

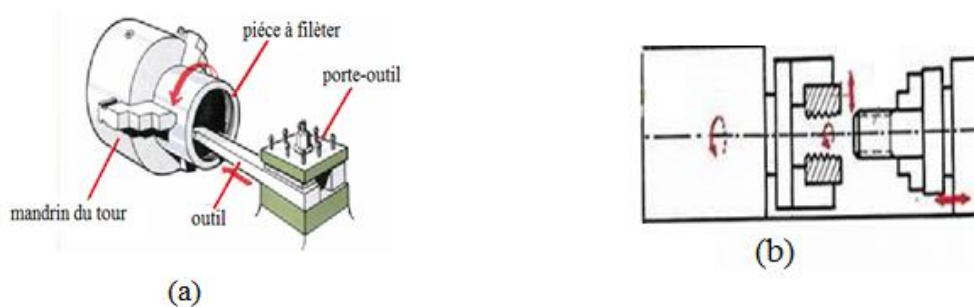


Fig. I.12 : Opération de filetage, a) intérieur (taraudage), b) extérieur (filetage).

(i) Tournage de forme

Consiste à exécuter des pièces de révolution complexe (Fig. I.13).



Fig. I.13 : Tournage de forme.

(j) Détalonnage

C'est une opération qui consiste à réaliser un angle de dépouille de la fraise et pour but de faire l'arrête de ce dernier (fraise) plus haute que le dos de la dent de façon à permettre à la fraise d'exécuter le découpage normale. Le détalonnage est plus employé pour l'usinage des fraises de forme (Fig. I.14).



Fig. I.14 : Profil d'une fraise de forme à denture détalonnée.

I.2.1.2 Fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage par enlèvement de la matière, permettant l'obtention de surfaces planes précises. Il est caractérisé par le recours à une machine-outil appelée fraiseuse et l'utilisation d'un outil de coupe spécial (à arêtes multiples) appelé fraise (Fig. I.15). La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage des surfaces plates et permet également, si la machine est équipée de commande numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes. La coupe en fraisage s'effectue habituellement avec des dents placées sur le périphérique et / ou sur l'extrémité d'un disque ou d'un cylindre [7].

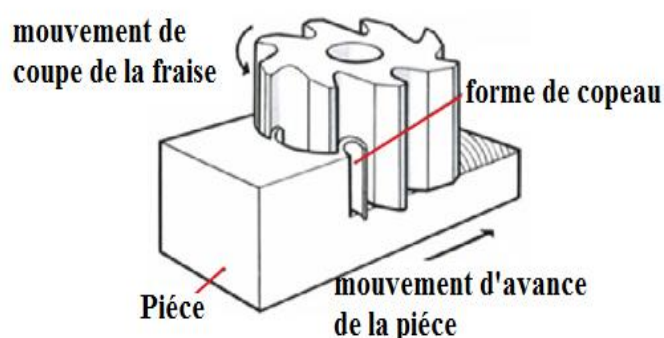


Fig. I.15 : Principe de fraisage.

I.2.1.2.1 Principe de travail

Lors d'une opération de fraisage, l'enlèvement de la matière – sous forme de copeau – résulte de la combinaison de deux mouvements : le mouvement de rotation de l'outil sur son axe d'une part et le mouvement d'avance de la pièce suivant trois axes orthogonaux d'autre part.

I.2.1.2.2 Modes de fraisage

On distingue deux modes : le fraisage de face et le fraisage de profil.

(a) Fraisage de face

Dans ce mode, l'axe de la fraise est perpendiculaire au plan fraisé (Fig.I.I6). C'est un procédé d'obtention des surfaces planes où l'on ne retrouve aucune trace de la forme de la génératrice de la fraise. La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure, Ce mode de fraisage est également appelé « fraisage en bout » [9].

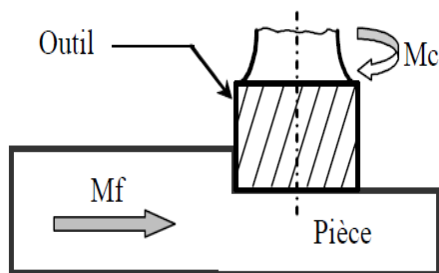


Fig. I.16 : Schéma de fraisage de face.

(b) Fraisage de profil

Dans ce mode, la génératrice de la fraise est parallèle à la surface usinée (Fig. I.17). La fraise coupe avec son diamètre. C'est un procédé d'obtention des surfaces planes où quelconques dans des positions diverses. Ce mode de fraisage est également appelé « fraisage en roulant » [9].

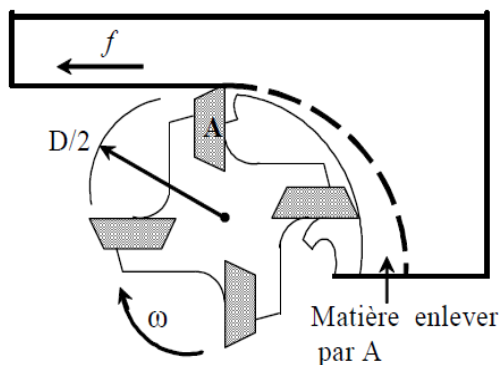


Fig. I.17 : Fraisage de profile.

Lors d'une opération de fraisage de profile et selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce, Il existe deux manières de procéder :

(1) Fraisage en opposition

La direction d'avance de la pièce est à l'opposé du sens de rotation de la fraise dans la zone de coupe. L'épaisseur des copeaux est nulle au départ, puis maximale à la fin de la passe (Fig. I.18).

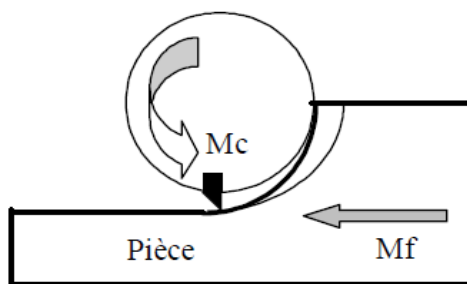


Fig. I.18 : Fraisage en opposition.

(2) Fraisage en concordance ou « en avalant »

Dans le cas de fraisage en avalant, la direction d'avance est la même que le sens de rotation de la fraise. L'épaisseur de copeau va donc diminuer jusqu'à être égale à zéro à la fin de la passe (Fig. I.19).

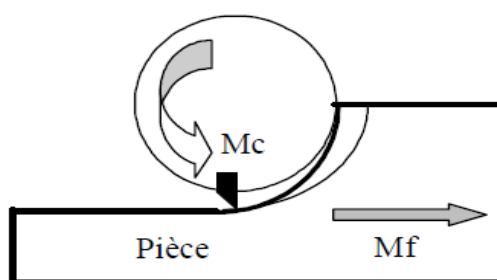


Fig. I.19 : Fraisage en avalant.

On peut également effectuer un fraisage combiné, c'est-à-dire de face et de profile en même temps.

I.2.1.3 Perçage

Le terme de perçage regroupe toutes les méthodes ayant pour objet d'exécuter des trous cylindriques dans une pièce avec des outils de coupe par enlèvement de copeaux (Fig. I.20). En plus du perçage de trous courts et du forage de trous profonds, ce concept inclut également diverses opérations d'usinage consécutives, telles que brochage, alésage, réalésage et certaines formes de finition comme le calibrage et le galetage [6].

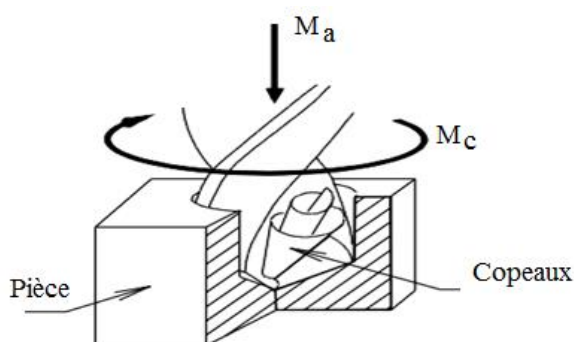


Fig. I.20 : Opération de perçage.

L'enlèvement de la matière lors de l'opération de perçage s'effectue par la combinaison d'un mouvement rotatif et d'un mouvement d'avance linéaire. Pour le perçage de trous courts sur les machines conventionnelles, ce double mouvement de rotation et d'avance est donné à l'outil. Mais l'utilisation de tours universels CN et CNC à toute fois conduite à recourir de plus en plus fréquemment à la combinaison d'une pièce en rotation et d'un foret qui ne tourne pas.

I.2.1.4 Brochage

Le brochage est un procédé d'usinage à l'aide d'un outil de forme à tranchants multiples appelé « broche ». L'outil broche possède des dents qui augmentent de hauteur progressivement, de sorte que chacune entaille plus profondément la pièce que celle qui la précède (Fig. I.21). Il est devenu une véritable opération d'usinage, destiné à la moyenne et grosse industrie, Le brochage intérieur nécessite que la broche puisse traverser la pièce. Il est donc nécessaire de réaliser au préalable un trou débouchant.

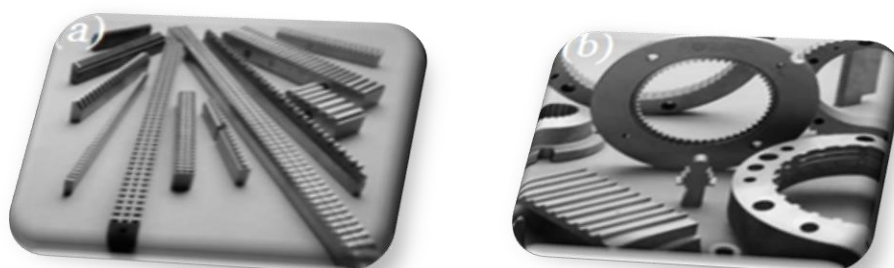


Fig. I.21 : Nomenclature des broches, (a) Broches de formes internes,
(c) Broches de formes externes.

I.2.1.5 Rectification

La rectification est bel et bien un procédé d'usinage par enlèvement de copeaux. Une meule constituée de matière abrasive vient arracher à la pièce de minuscules fragments qui sont éjectés (contrairement à l'usinage par arrachement de copeaux), les températures associées à ce procédé sont très élevées dans la zone de coupe, c'est pourquoi les copeaux ont l'apparence d'étincelles (Fig. .I.22). À la différence des autres procédés d'usinage où le nombre de lèvres de l'outil est bien défini et limité, dans le cas de la rectification, l'outil présente à la pièce un nombre très élevé d'arrête de coupe, chaque arrête étant un grain d'abrasif sur la meule. La figure ci-dessous illustre d'une manière grossière le procédé d'enlèvement de copeau associé à la rectification. De par son faible taux d'enlèvement de matière, le procédé de rectification est très lent mais produit des pièces d'une haute précision avec un excellent fini de surface. On utilise la rectification pour réaliser les usinages de précision des surfaces après trempe ou afin d'obtenir des IT (intervalles de tolérances) extrêmement serrés. Toutefois, on doit tenter de minimiser l'utilisation de ce procédé car sa faible productivité augmente de manière importante les coûts de production de la pièce associée. Il a trois types de formes principales que l'on rectifie : surfaces planes, de révolutions intérieures et extérieures [10].

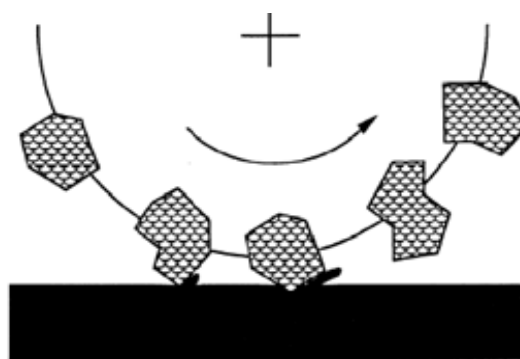


Fig. I.22 : Principe de rectification plane.

- **Avantages de la rectification**

- Possibilité de s'attaquer aux matériaux les plus durs ;
- Pouvoir atteindre des tolérances de l'ordre du micromètre (0,001 mm) ;
- Obtenir un état de surface poussé ($< 0,1 Ra$) ;
- Permet d'être plus précis sur l'usinage ;
- Usinage des matériaux les plus durs.

I.2.1.6 Découpage

Le découpage est un procédé de fabrication de pièces. C'est une sorte de cisailage sur un contour fermé. Une différence est faite sur les termes :

- Découpage, afin d'obtenir un pourtour défini selon une forme et des cotes précises ;
- Poinçonnage, afin d'ajouter une pièce (exemple : une perforation).

Le poinçon poinçonne la plaque (tôle, papier, carton, mousse, etc.) et une pièce découpée est obtenue (voir la Fig. ci-dessous).



Fig. I.23 : Presse hydraulique à découper.

I.2.1.6.1 Découpage laser

Ce procédé permet une découpe précise, nette et rapide de nombreux matériaux jusqu'à 25 mm. La découpe se fait sans effort sur la pièce et la zone affectée thermiquement (ZAT) est assez faible (de l'ordre de 0,5 mm sur les métaux) ce qui permet d'avoir des pièces très peu déformées. La réalisation de trou est facile mais leur diamètre doit être au moins égal à l'épaisseur de la tôle quand cette tôle est supérieure à 10 mm. Souvent, il est aussi possible de graver (texte, etc.) avec la même machine. La découpe s'effectue sur des plaques de matière ce qui donne généralement des objets plats une fois découpés. Certains matériaux, comme l'argent, ou le cuivre, sont toutefois plus difficiles à découper au laser à cause de leur fort pouvoir réfléchissant, dans ce cas, mieux vaut utiliser la découpe par jet d'eau haute pression (Fig. I.24) [11].

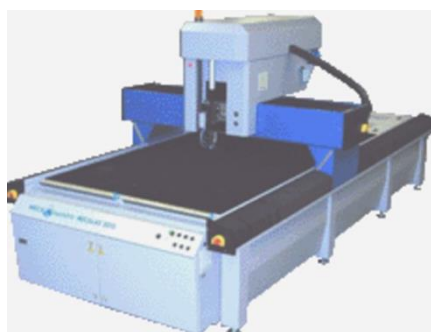


Fig. I.24 : Machine de découpage laser.

I.2.1.6.2 Découpage par jet d'eau

L'eau, ou plus exactement le fluide, peut contenir des additifs, notamment pour faciliter la coupe du matériau. Le découpage par jet d'eau permet une découpe de la plus petite pièce à la plus grande, et de la plus fine à la plus épaisse, permet la découpe de métaux, pierres, marbres, verre dans des épaisseurs allant jusqu'à 600 millimètres.

On distingue deux techniques de découpage (voir le schéma ci-dessous) :

- La découpe à l'eau pure (tous les matériaux se coupant au cutter) ; buse de coupe de 0,08 mm à 0,30 mm ;
- La découpe à l'eau chargée d'abrasif (tout matériaux) ; l'eau passe par la buse, on y adjoint le sable, l'eau et le sable passent par le canon de focalisation qui assure une cylindricité du mélange ; buse de coupe de 0,20 mm à 0,40 mm ;
- Un seul matériau ne peut être découpé au jet d'eau : le verre trempé, qui casse dès les premiers millimètres de découpe à cause des trop fortes contraintes présentes dans le matériau ;
- L'eau sous très haute pression (jusqu'à 6150 bars) sort de la buse de découpe.



Fig. I.25 : Découpage par jet d'eau.

I.2.1.6.3 Découpage plasma

Le découpage plasma diffère par les mélanges gazeux utilisés. Le jet de plasma est généré par l'arc électrique qui s'établit entre une électrode intérieure à la torche de coupage et la pièce. Le découpage au laser est un procédé thermique sans contact qui sert à séparer les matériaux. Le mélange gazeux ionisé à la sortie de la tuyère forme le plasma. Le pouvoir calorifique du jet (environ 18 000 °C) provoque une fusion quasi instantanée qui se propage dans toute l'épaisseur de la pièce. Le découpage plasma est principalement utilisé par les entreprises du secteur de la Métallerie. Il permet la découpe de tôles en métal sur des épaisseurs de 0 à 160 mm avec une précision de plus ou moins 0,2 mm (Fig. I.26).



Fig. I.26 : Découpage plasma réalisé par un robot industriel.

Sur une machine de découpe plasma, la température extrêmement élevée fait fondre instantanément le métal tandis que le gaz sous pression chasse au fur et à mesure les gouttelettes de métal en fusion. L'usage de la torche de découpage au plasma doit se faire impérativement dans des locaux spécialement ventilés ou en plein air à cause de dégagement de gaz toxiques générés par les très hautes températures de travail. Certains systèmes de découpe au plasma comprennent un apport d'eau sous forme d'un jet calibré qui, jaillissant de la torche plasma, permet de refroidir le métal sitôt après sa découpe plasma, évitant également le dégagement de ces gaz toxiques.

I.2.1.7 Électroérosion

- La pièce à usiner et l'électrode sont plongées dans un liquide diélectrique qui circule en permanence ;
- Un générateur à impulsion fournit les décharges électriques dont la durée et la tension sont réglées en fonction du matériau de la pièce qui est reliée à l'anode et l'outil qui est relié à la cathode ;
- A chaque impulsion il se produit une décharge électrique entre la pièce et l'outil qui provoque l'érosion de la pièce pour environ 99% et de l'outil pour environ 1%.
- L'électrode a la forme complémentaire de la forme à réaliser ;
- Les particules du métal brûlé sont entraînées par le liquide diélectrique.

I.2.1.7.1 Usinage en plongée (Enfonçage)

L'électroérosion met en œuvre l'énergie électrique pour enlever du métal de la surface d'une pièce, sans établir de contact avec cette pièce. Un courant électrique de haute fréquence est appliqué entre l'électrode de l'outil et la pièce, créant des étincelles qui franchissent l'intervalle et vaporisent de petites zones de la pièce (Fig. I.27).

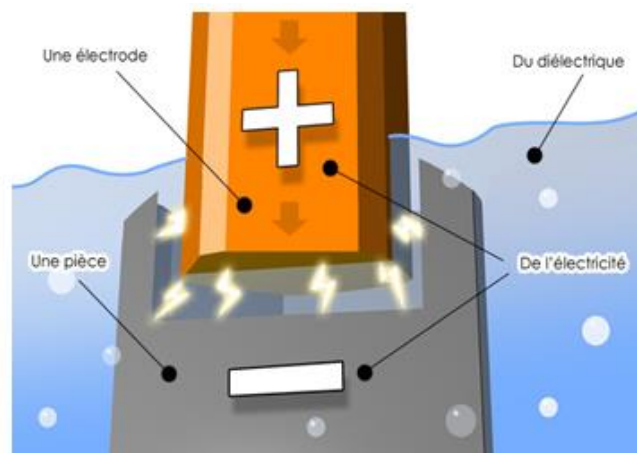


Fig. I.27 : Principe de fonctionnement électroérosion (Enfonçage).

I.2.1.7.2 Usinage par découpage à fil

L'électroérosion à fil est une autre variante très répandue. Elle consiste à utiliser comme électrode-outil un fil métallique généralement en cuivre ou bien alliage de cuivre zinc « laiton » parfaitement calibré (0.05 à 0.35) en circulation continue. Un jet de liquide diélectrique (eau dé-ionisée) permet d'enlever les débris d'usinage entre le fil et le bloc de matière à usiner. Un mouvement du fil par rapport à la pièce permet de modifier l'angle d'attaque et d'usiner des formes réglées variées. La manipulation du fil se fait à l'aide d'un système multiaxial complexe permettant d'orienter le fil de découpe pour obtenir des pièces complexes 3D (Fig. I.28). Cette technique est très utilisée pour l'obtention de micro-pièces de haute précision ainsi que pour l'élaboration des micro-outils que nous retrouvons sur les machines d'EE de fraisage ou de perçage.

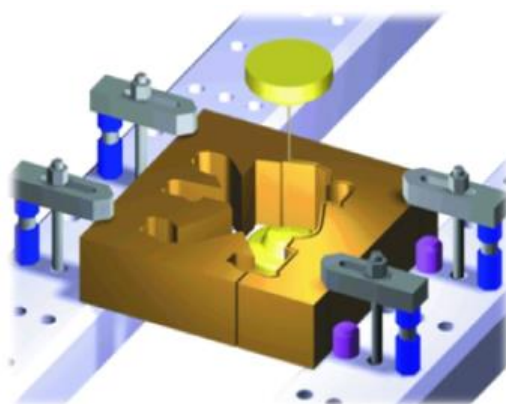


Fig. I.28 : Principe de fonctionnement électroérosion (Robot- fil).

○ **Avantage**

- Usinage possible de matériaux trempés et durs, impossibles à usiner avec les procédés par enlèvement de copeaux ;
- Usinage de formes tridimensionnelles « démoulables » (l'outil pénètre dans la pièce et y laisse sa forme complémentaire) et hélicoïdales (en donnant à l'outil un mouvement de rotation conjuguée avec son mouvement de translation) ;
- Bons états de surface ($R_a \gg 2 \text{ mm}$) et précision ($\gg 20\text{mm}$).

○ **Inconvénients**

- Ce procédé ne s'applique qu'aux matières conductrices de l'électricité ;
- Coût du matériel (spécifique à chaque forme de pièce à obtenir) et usure de l'outil électrode.

I.2.2 Obtention par déformation plastique

I.2.2.1 Forgeage

Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur un matériau, à froid ou à chaud, afin de le contraindre à épouser la forme voulue. Sous l'action d'une forte pression ou d'une succession de chocs, un bloc de métal chauffé (800 à 1200 °C) se déforme plastiquement vers les surfaces restées libres. Aucune matrice ne délimite la déformation du matériau, et la forme obtenue dépend fortement du savoir-faire de l'opérateur (Fig. I.29). L'opération peut s'effectuer avec un outillage manuel ou à l'aide d'un marteau-pilon ou d'une presse hydraulique. La forge libre permet d'obtenir des ébauches ou des pièces brutes, et n'est pas adapté au travail en série [12].

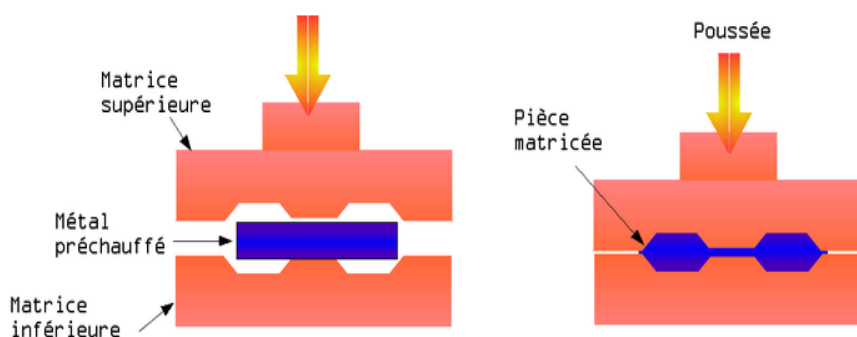


Fig. I.29 : Schéma d'élaboration par forgeage (pièces forgées).

○ **Avantages**

- Pas d'outillage spécialisé selon la pièce à obtenir ;
- Les pièces forgées ont une résistance mécanique supérieure aux mêmes pièces usinées, du fait du fibrage de la pièce consécutif au forgeage.

○ **Inconvénients**

- Nécessite beaucoup d'énergie (métal chauffé) ;
- La précision est médiocre.

I.2.2.2 Laminage

Le **laminage** est un procédé de fabrication par déformation. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelés laminoir (voir fig.1). Un laminoir est une installation industrielle ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau par **écrasement** (généralement du métal) entre les deux cylindres qui sont soit lisses (laminage plan), soit cannelés (laminage de mise en forme). (Fig. I.30) [13].

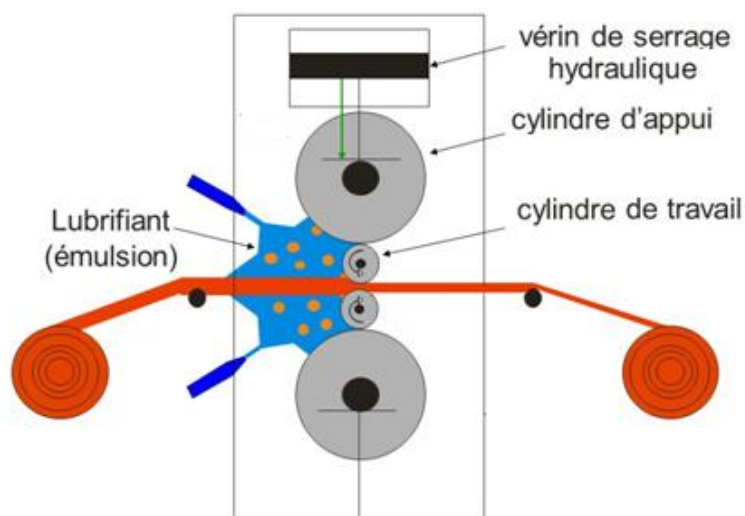


Fig. I.30 : Principe de laminage.

I.2.2.3 Emboutissage

L'emboutissage est une technique de fabrication permettant d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle plane et mince, un objet dont la forme n'est pas développable. L'ébauche en tôle est appelée « Becker », c'est la matière brute qui n'a pas encore été emboutie. La température de déformation se situe entre le tiers et la moitié de la température de fusion du matériau. L'emboutissage est un procédé de fabrication très utilisé dans l'industrie automobile, dans l'électroménager, etc. Le principe est fondé sur la déformation plastique du matériau (en général un métal), déformation consistant en un allongement ou un rétreint local de la tôle pour obtenir la forme (voir fig. I.31) [14].

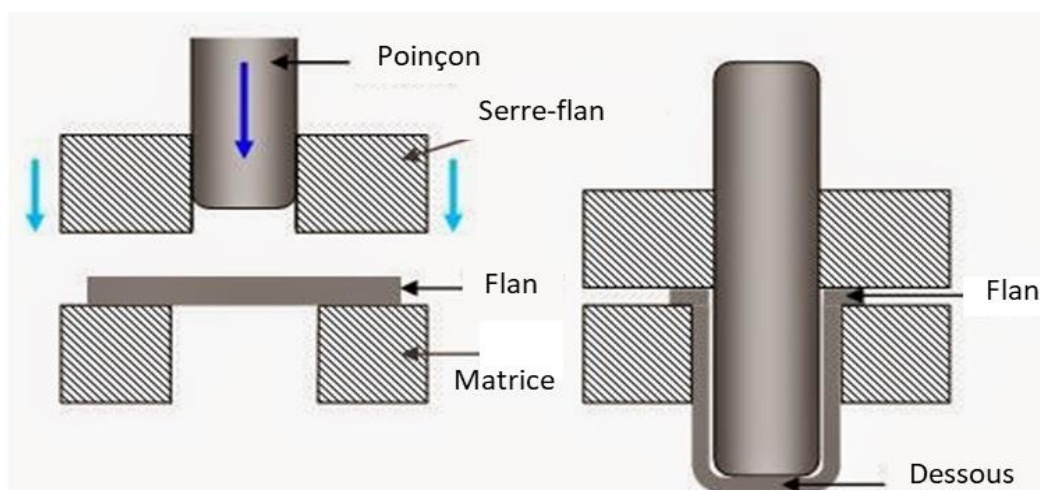


Fig. I.31 : Principe d'emboutissage .

I.2.2.4 Estampage

L'estampage est une opération de forgeage en trois coups (ébauche, finition et ébavurage). On commence par faire l'ébauche de la pièce désirée, en plaçant le lopin dans la matrice d'ébauche. Une fois celle-ci prête, on la met dans la matrice ayant la forme de la pièce voulue. Puis, on vient découper les cordons de bavures (voir schéma ci-dessous). Le matriçage, réservé aux métaux non ferreux, est une variante de l'estampage (on dit aussi « estampage de précision »). Dans ce cas, la presse hydraulique lente se substitue au marteau-pilon et la pièce est insérée par force dans un outillage (matrice) démontable. L'intérêt technique de ces procédés est la compression des molécules de matière selon la forme de la pièce d'où des résistances extrêmes aux efforts mécaniques (Fig. I.32) [15].

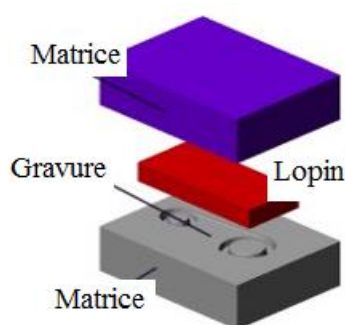


Fig. I.32 : Schéma d'élaboration par estampage.

- **Avantages**

- Les mêmes que pour le forgeage libre, avec plus de rapidité et une meilleure précision.

- **Inconvénients**

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Prix de revient élevé des matrices rapidement « usées ».

I.2.2.5 Matricage

Le matricage est une opération de forgeage qui consiste à former par déformation plastique, La forge par matricage consiste à former par déformation plastique après chauffage des pièces brutes réalisées en alliages tels que les alliages d'acier d'aluminium, de cuivre, de titane, de nickel, etc. Le matricage est effectué à l'aide d'outillages appelés des matrices (demi-matrice supérieure et demi-matrice inférieure). Les matrices portent en creux la forme de la pièce (Fig. I.33).

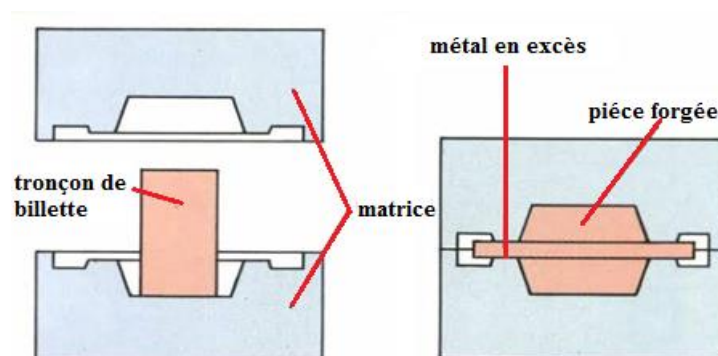


Fig. I.33 : Schéma d'élaboration par matricage.

I.2.2.6 Filage

Le filage à chaud des métaux et alliages est un procédé de transformation utilisé industriellement pour la fabrication de tubes et de barres pleines ou creuses de sections diverses (Fig. I.34). À son origine, le procédé a été utilisé pour la transformation des métaux non ferreux, puis, grâce à une invention française dans les années 1940, pour la transformation des aciers et des métaux réfractaires. Les progrès réalisés depuis la Seconde Guerre mondiale permettent aujourd'hui d'envisager l'utilisation du filage pour la fabrication de tubes en acier ordinaire, en parallèle avec les procédés classiques de laminage. Ce mode de fabrication permet d'obtenir de grandes longueurs d'un profil quelconque ou d'un tube en partant d'un bloc de métal de section circulaire ou carrée, et cela en une seule opération, alors que les autres procédés nécessitent plusieurs passages successifs du produit dans la ou les machines servant à la transformation.

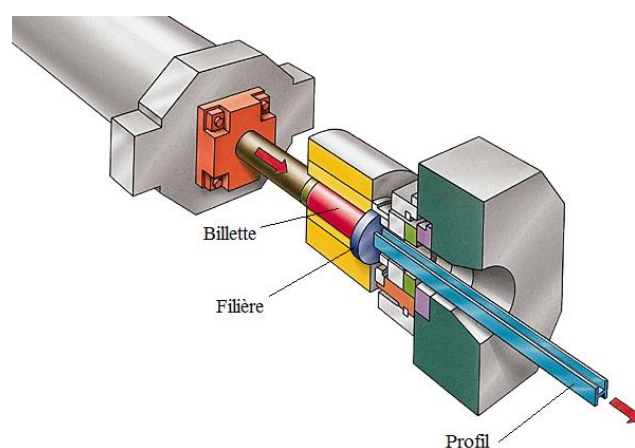


Fig. I.34 : Produits filés.

(a) Filage direct

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

(b) Filage inverse

Dans le cas du filage inverse, la filière est placée à l'extrémité d'un poinçon. La billette chauffée est placée dans le conteneur. L'on plaque une tête sur le conteneur. C'est donc l'ensemble, billette, conteneur et tête qui avance vers la filière. Le métal file à l'intérieur du poinçon. Le gros avantage de la méthode réside dans la suppression des frottements entre la

billette et le conteneur. L'effort de filage est minoré ce qui permet l'utilisation de presses de moins forte puissance. L'absence de frottement supprime une partie des échauffements ce qui permet une meilleure maîtrise de la structure métallique et limite le risque de défauts de surface. Dans le cas de l'aluminium, on peut supprimer presque complètement la zone corticale à gros grains. Il est plus facile de maîtriser les tolérances géométriques. L'inconvénient provient du poinçon qui compte tenu de sa forme creuse est plus fragile et travaille au flambage. De plus le montage des outillages est plus complexe et nécessite des alignements plus rigoureux que la méthode en direct. De plus, le nombre de formes possibles est plus limité que le filage direct.

(c) Filage inverse en conteneur

Il s'agit là d'une méthode beaucoup moins utilisée que les deux précédentes. L'objectif est différent puisque le produit obtenu est un tube avec un fond (appelé étui). Les longueurs de filage sont forcément plus courtes. Cette méthode est utilisée pour la fabrication de composants d'armement (douille d'obus, ogive), de bouteilles à gaz en acier ou en alliage d'aluminium. Les formes sont limitées. La billette chauffée ou froide et lubrifiée est placée dans une matrice fermée à une extrémité par un tasseau. Un poinçon vient pousser sur la billette qui file le long du poinçon en formant un étui. Il est éjecté grâce à une poussée sur le tasseau.

(d) Filage sur aiguille

Le filage sur aiguille permet de filer des tubes. Le matériau de départ est une billette évidée. Elle peut être évidée par perçage, usinage ou forgeage. Le poinçon est équipé d'une aiguille qui est emmanchée sur la billette creuse. En poussant dans la filière, le métal est contenu entre la filière et l'aiguille. On obtient un tube monobloc sans soudure. Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe.

I.2.2.7 Tréfilage

Le tréfilage est la réduction de la section d'un fil en métal par traction mécanique sur une machine à tréfiler (Fig. I.35). Les usines spécialisées dans le tréfilage sont appelées des tréfileries. L'érouissage y est important et nécessite un traitement thermique (type de recuit pour les faibles sections) évitant au fil d'être trop cassant et améliorant sa plasticité. Le fil machine, sous forme de bobine, est enroulé sur un ou des cabestans, qui, par frottement, exercent une traction sur le fil. Le fil passe dans une filière, en amont du cabestan, qui impose au fil une déformation par réduction de section. La filière est abondamment lubrifiée, pour

assurer le maintien d'un bon état de surface du fil métallique et pour assurer le refroidissement et contrer l'échauffement provoqué par l'érouissage du métal. Le tréfilage est également utilisé dans la fabrication des pâtes alimentaires industrielles [16].

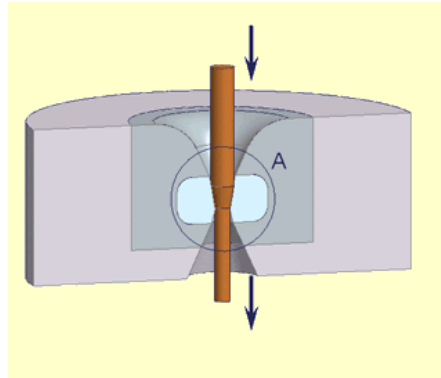


Fig. I.35 : Atelier de tréfilage.

I.2.2.8 Cintrage

Le cintrage est un procédé mécanique de déformation d'un tube ou d'une barre, suivant un rayon et un angle avec une cintruse. Le terme cintrage est aussi utilisé pour désigner globalement la transformation d'un produit cintré. Il existe plusieurs techniques : par enroulement, par poussée, par roulage et par emboutissage (Fig. I.36).

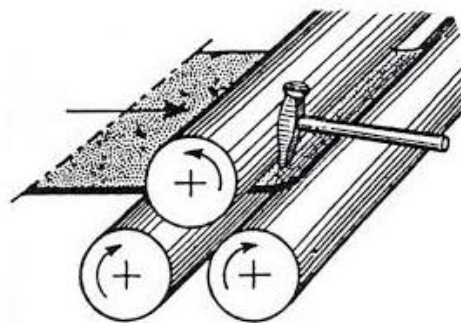


Fig. I.36 : Procédés de cintrage.

I.2.2.9 Pliage

Le pliage est une déformation obtenue grâce à une force appliquée sur la longueur de la pièce. Celle-ci sera en appui sur 2 lignes d'appuis et s'apparente à la flexion. Il faudra dépasser la limite élastique pour obtenir l'angle voulu (voir Fig. I.37) [17].

○ **Avantages**

- Outillage simple : presses hydrauliques avec différents poinçons et matrices.

○ **Inconvénients**

- Ressaut élastique résiduel difficile à prévoir ;
- Longueur de pliage limitée.

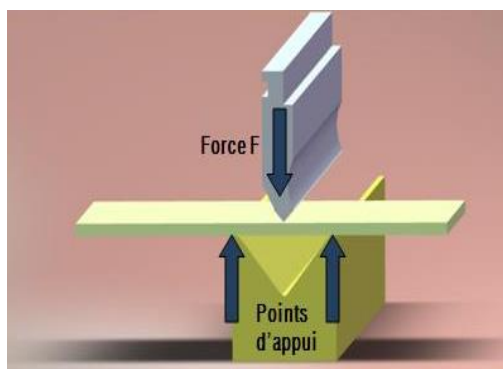


Fig. I.37 : Schéma d'élaboration de pliage de tôles.

I.2.2.10 Extrusion

L'extrusion est un procédé de fabrication (thermo) mécanique par lequel un matériau compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir. Un matériau chauffé et compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir. Cette technique permet d'obtenir en continu un produit pouvant être très long (barre, tube, profilé, tôle...).



Fig. I.38 : Extrusion des pièces de différentes formes.

○ **Avantages**

- Meilleure précision que le matriçage ou l'estampage ;
- Bons états de surface ;
- Sections des profilés pouvant être creux et très complexes.

○ **Inconvénients**

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Formes limitées à des « extrusions » (voir Fig. ci-dessous).

I.2.3 Obtention par fusion (moulage)

Le moulage est un procédé de fabrication qui permet de réaliser des pièces par coulée du métal en fusion dans un moule. L'opération de moulage consiste à fabriquer un moule, généralement en matériaux réfractaires, qui porte l'empreinte en négatif de la pièce. On s'adresse à lui pour : la fabrication de pièces de formes compliquées qu'il serait difficile ou impossible de réaliser par tout autre procédé, ou pour la production à des prix de revient plus intéressants de pièces plus simples ; profiter des propriétés physiques ou d'utilisation (dilatation, corrosion, frottement, usure, basses et hautes températures) et des propriétés mécaniques des divers métaux et alliages coulés ; couler des alliages difficilement usinables. La plupart des pièces de fonderie sont des ébauches qui sont ensuite partiellement usinées comme, par exemple, les carters de moteur automobile (produits en alliage d'aluminium pour alléger le moteur). (Voir Fig. I.39) [18] .

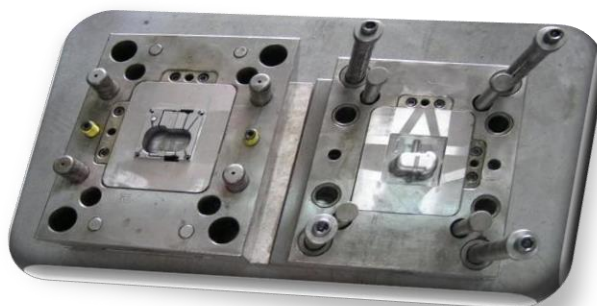


Fig. I.39 : Pièce métallique que moulée.

Les procédés de moulage sont classés en deux grandes catégories. On distingue principalement la fonderie effectuée avec :

- Des moules non permanents, ou "moules perdus", généralement en sable ;
- Des moules permanents en métal, qu'on appelle aussi "coquilles".

I.2.3.1 Moulage non permanent (moulage au sable)

C'est le procédé de moulage le plus universel et le plus couramment employé, et qui reste toujours très compétitifs avec d'autres procédés plus modernes. Il permet de couler aussi

bien de grosses pièces unitaires, que de petites et moyennes pièces en série, sur chantiers de moulage mécanisés, quel que soit l'alliage. Cette technique utilise des moules en sable lié avec de l'argile et de l'eau. Le moulage peut se faire avec ou sans modèle. Il peut être en bois, en plâtre ou métallique. Pour que le modèle puisse être démoulé sans abîmer l'empreinte, on est amené à donner de la «dépouille» aux plans orientés dans le sens du démoulage, c'est-à-dire à les rendre légèrement obliques ; lorsque des faces sont en «contre dépouille », le modèle est réalisé en plusieurs parties démontables. Dans les cas de moulage sans modèle les empreintes et les noyaux sont obtenus par taillage du sable de moulage. Les principaux avantages de cette méthode résident dans la rapidité de moulage et le taux de récupération très élevé du sable. Il est utilisé pour le moulage des pièces en fonte, acier et métaux non ferreux [19].

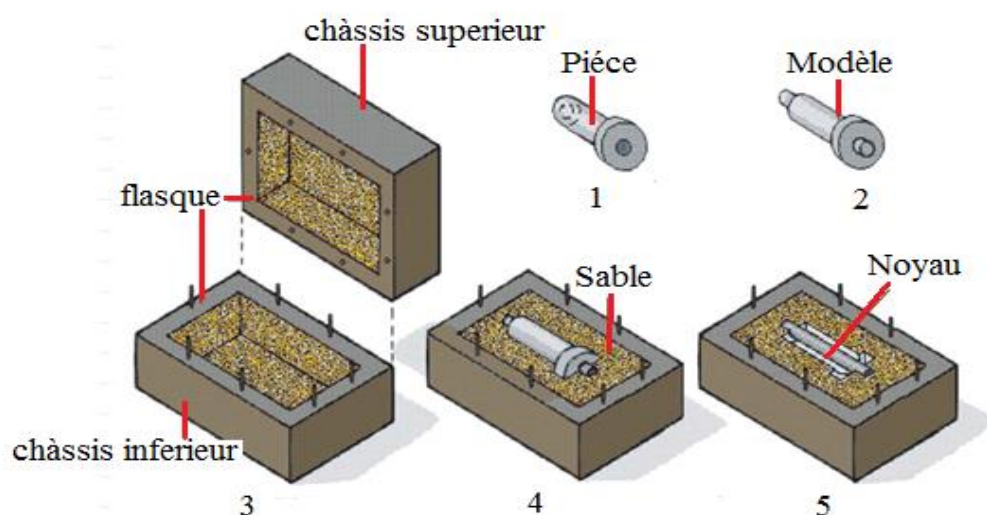


Fig. I.40 : Moulage en sable.

I.2.3.2 Moules permanents

Le moule métallique est réutilisable plusieurs fois. Le démoulage est rendu possible par la différence de matière entre le moule et le métal coulé .Il est utilisé pour la coulée en moule permanent. Les avantages de ce procédé incluent les suivants :

- Composants près des cotes ;
- Meilleure finition de la surface ;
- Propriétés mécaniques améliorées.
- Les produits finis ne présenteront pas de détails fins.

En matière de fonderie à coulée en moule permanent, un moule réutilisable est fabriqué à partir de métal, généralement de la fonte grise. Il est construit à partir de deux ou plusieurs pièces et doté d'une charnière pour pouvoir extraire le moulage du moule. Le métal liquide est versé dans le moule par simple gravité. La fonderie en moule permanent est utilisée pour produire des moulages à partir d'alliages d'aluminium, de magnésium et de cuivre. Les pièces d'acier et de fer peuvent être coulées dans des moules en graphite. Le terme de fonderie en moule permanent et de coulée en coquille sont souvent employés pour désigner le même procédé. Les moules sont métalliques (en fonte ou en aciers spéciaux réfractaires), permettent de couler un grand nombre de pièces. On distingue les procédés suivants :

- Moulage en coquille par gravité ;
- Moulage sous pression.

I.2.3.2.1 Moulage en coquille par gravité

C'est le procédé de moulage en coquille le plus simple. On coule directement le métal liquide à l'aide d'une louche ou d'une petite poche de coulée dans l'empreinte d'un moule métallique qui peut comporter ou non des noyaux métalliques ou en sable suivant les pièces à fabriquer et leur complexité. (Fig. I.41).

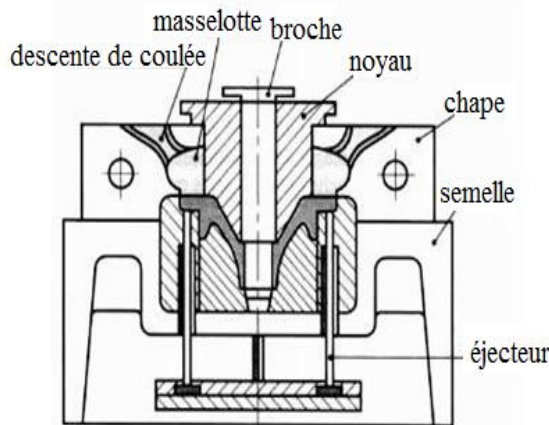


Fig. I.41 : Moulage en coquille.

I.2.3.2.2 Moulage sous pression

Le métal est injecté sous forte pression dans le moule par l'intermédiaire d'un piston agissant sur le métal liquide versé dans un conteneur. Les avantages sont nombreux ; citons parmi les plus significatifs :

- Bel aspect des pièces ;
- Très grande précision,

- Réduisant les masses et limitant l'usinage ;
- Possibilité d'inserts ;
- Meilleure étanchéité des pièces (carburateurs en zamak par exemple) ;
- Faibles déperditions permettant d'économiser la matière, etc.
-

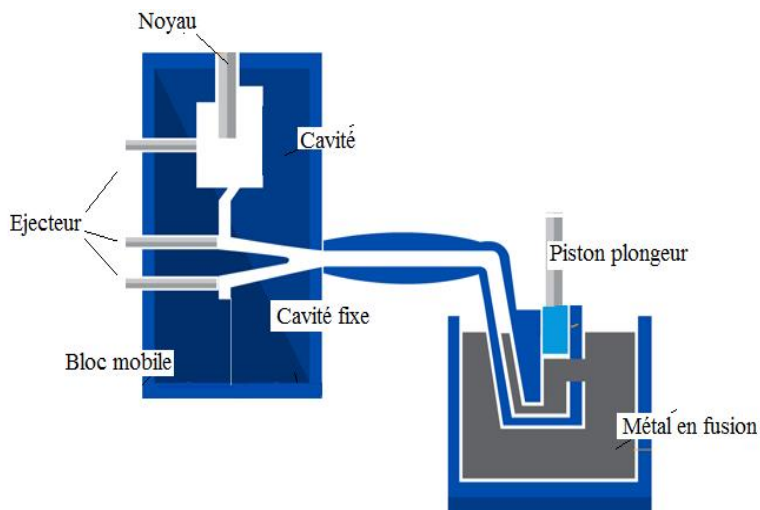


Fig. I.42 : Moulage sous pression.

I.2.4 Obtention par assemblage

I.2.4.1 Soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage par fusion des parties des deux pièces en contact. Cette mise en fusion est faite par chauffage, par pression, ou par une combinaison des deux. Le soudage par chauffage est la méthode la plus employée aujourd'hui. Le soudage assure la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, on distingue trois techniques d'assemblages par soudage peuvent être ainsi clairement définies :

- **Le soudage** : opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler, généralement de natures très voisines. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé ;
- **Le brasage** : opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement. Ce dernier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération ;

- **Le soudobrasage** : technique qui se rapproche du soudage par son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

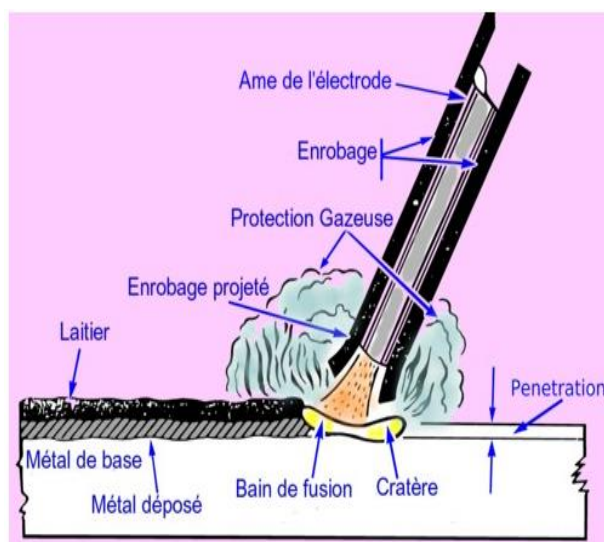


Fig. I.43 : Schéma d'assemblage par soudage .

I.2.4.2 Collage

On peut définir le collage comme une technique indispensable pour les applications les plus strictes. On peut définir aussi comme un procédé permettant de maintenir de façon durable et solide deux substrats entre eux. La liaison entre ces deux supports est alors d'origine chimique, et non mécanique. La colle est déposée sur le ou les substrats, Mais pour obtenir de bonnes performances, la colle doit être compatible avec le support. L'adhésion sur un solide fait ainsi intervenir deux notions principales (Fig. I.44) [20] .

- L'interaction liquide solide, qui caractérise l'adhésion ;
- Le mouillage, qui caractérise l'étalement du liquide sur le solide.

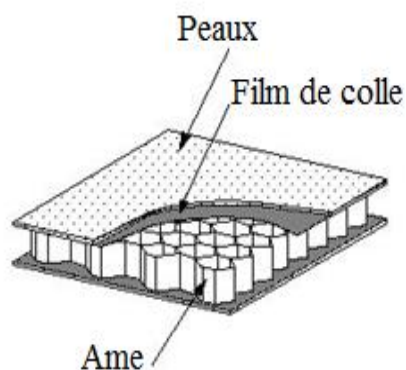


Fig. I.44 : Schéma d'assemblage par collage .

I.2.4.3 Rivetage

Le rivetage est un assemblage de pièces. Il consiste à assembler plusieurs pièces de faibles épaisseurs à l'aide de rivets. C'est un assemblage définitif, c'est-à-dire non démontable sans destruction de l'attache (voir le schéma ci-dessous). Quoiqu'il existe depuis peu un type de rivet imprimant une empreinte hélicoïdale, lors du montage, dans son logement, permettant ainsi un démontage et un remontage ultérieur sans destruction du rivet. Un autre procédé beaucoup plus élaboré est le rivetage par fluage radial : ce système est de nos jours le plus fiable des assemblages rivetés (Fig. I.45) [21].

Les avantages du rivetage par rapport aux autres types d'assemblages sont :

- Il n'y a pas de risque de changement de structure de matériau (trempe) comme dans le cas du soudage ;
- Il n'y a pas de retrait ;
- Assemblages rivetés sont faciles et sûrs à contrôler et aussi faciles et peu coûteux à réaliser sur chantier, l'assemblage peut être démonté, si besoin, en ôtant les têtes (en détruisant le rivet).

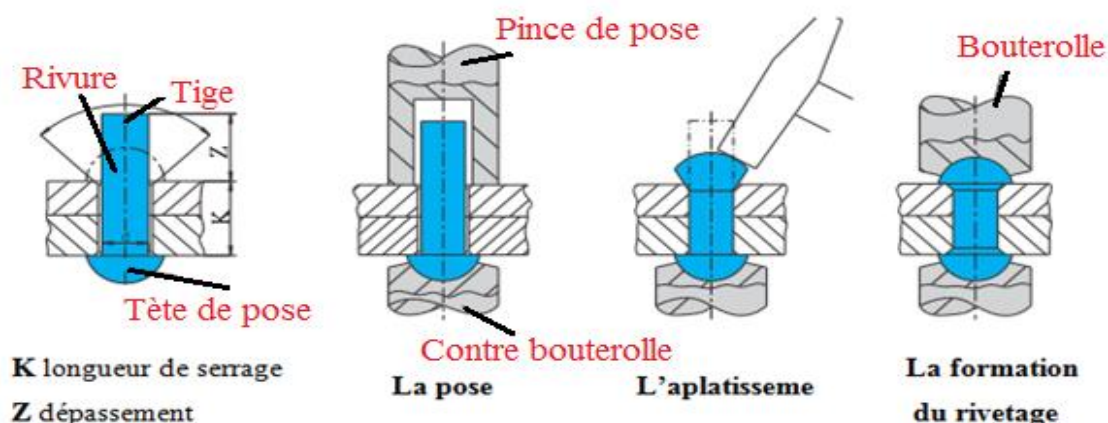


Fig. I.45 : Schéma d'assemblage par rivets.

I.2.4.4 Agrafage

L'assemblage par agrafe présente une légère précontrainte et est quasiment étanche aux liquides et à l'air. Le pliage s'effectue en trois étapes : à 30° , 75° et 90° . La structure de la surface ne sera pas endommagée et la machine s'adapte automatiquement aux différentes épaisseurs de tôle. Elle permet de façonner les bords des éléments en tôle. Ensuite une tôle assemblée par agrafage sur bords relevés est placée sur l'agrafe. De la sorte on peut assembler au minimum deux pièces l'une avec l'autre (Fig. I.46).



Fig. I.46 : Schéma d'une agrafeuse manuelle professionnelle.

I.2.5 Obtention par frittage

La métallurgie des poudres part d'une poudre métallique et utilise un procédé de consolidation appelé frittage. Une poudre (ou un mélange de poudre), généralement métallique, est comprimée dans un moule, puis chauffée dans un four à vide (ou à atmosphère contrôlée) à une température inférieure à la température de fusion du principal constituant. La métallurgie des poudres se décompose en deux étapes (Fig. I.47) :

- **Etape 1 :** Le pressage ou la compaction des poudres, puis le frittage ou une consolidation à haute température.
- **Etape 2 :** La poudre de base est d'abord mélangée avec des poudres d'alliages (et un lubrifiant). La mise en forme à froid est effectuée par une presse de 100 à 10000 tonnes suivant la pièce finale. Par ce système, on obtient directement une pièce formée sans usinage (pièce finie).

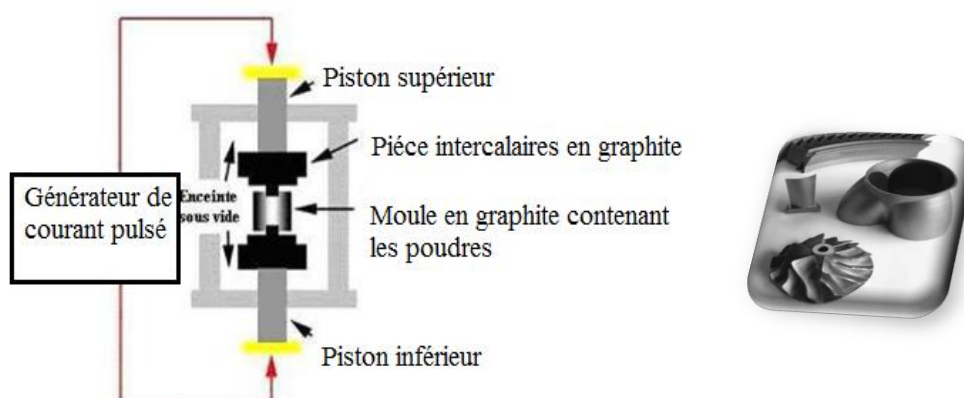


Fig. I.47 : Schéma d'élaboration par frittage.

Le frittage ou la consolidation est réalisé dans un four à une température proche de la fusion du métal. Il est souvent réalisé sous vide ou sous atmosphère protectrice pour éviter l'oxydation par l'oxygène de l'air. Il existe également une méthode de frittage par laser (prototypage rapide). Dans ce cas, on applique sur une surface plate une mince couche de poudre de métal mélangée à un liant (voir schéma ci-dessous). Les lasers, dont la précision n'est plus à démontrer délimitent la pièce et solidifient la poudre. Une autre couche de poudre est ensuite appliquée jusqu'à l'obtention de la pièce finale. Cette technique permet notamment de former des cavités avec une bonne précision. Au final, la pièce est "agitée" pour éliminer les poudres non agglomérées. Il faut tenir compte également de la porosité résiduelle, de l'ordre de 5 à 10% en fonction des alliages utilisés. Cette porosité est parfois volontaire notamment pour la fabrication de philtres, mais éliminée au maximum dans certaines productions nécessitant un matériau dur (Carbure de tungstène).



Fig. I.48 : Plaquette de coupe amovible pour outil d'usinage en céramique frittée.

○ **Avantage**

- Faible prix de revient pour de grandes séries de pièces complexes, précises et saines, qui peuvent être utilisées à l'état brut ;
- La porosité naturelle des pièces frittées permet la fabrication de filtres et de coussinets autolubrifiants ;
- Autorise l'obtention de nouveaux alliages.

○ **Inconvénients**

- La porosité naturelle peut devenir un inconvénient dans le cas de problèmes d'étanchéité par exemple ;
- Le principe de la compression conduit à des pièces non homogènes (porosité plus élevée au milieu), et dont les qualités de résistance mécanique sont faibles pour les métaux frittés.

Chapitre II /
Etude et conception du procédé de moulage
non permanent des pièces métalliques.

II.1 Généralités

Le terme fonderie définit aussi bien les installations métallurgiques dans lesquelles on fond les métaux et où on les coule dans des moules pour leur donner la forme des objets à fabriquer, que l'ensemble des opérations nécessaires à leur production. C'est, tout à la fois, un art et un métier dont les origines remontent à plusieurs millénaires avant notre ère, utilisant et mettant en œuvre des techniques aussi diverses que variées, comme le moulage, le noyautage, la métallurgie, la fusion et la coulée des métaux et alliages métalliques, les traitements thermiques, la finition, le parachèvement des pièces, etc. La fonderie, c'est aussi une industrie produisant des pièces de toutes natures, en toutes quantités, de la façon la plus économique à partir de matières premières brutes (ferrailles, déchets de tôles, bocages), contrairement à certaines techniques concurrentes (forgeage, mécano-soudage...) utilisant des produits semi-finis comme les tôles neuves, les barres et billettes en acier de toutes nuances, élaborés par la sidérurgie. La fonderie a pu améliorer constamment ses performances grâce aux progrès de toutes ses composantes techniques, tant en précision, qu'en fiabilité, lui permettant de concurrencer, voire de remplacer, dans des emplois très sévères ou de sécurité, des pièces habituellement fabriquées par d'autres techniques (forgeage par exemple) comme des vilebrequins de moteurs ou des bras de suspension pour les véhicules automobiles. Toutes ces évolutions et tous ces avantages expliquent la très grande diffusion des pièces de fonderie dans toutes les branches de l'industrie, et les capacités de progrès de cette technique laissent entrevoir de plus larges applications dans l'avenir [22].

II.2 Fonderie

II.2.1 Principe de fonderie

La fonderie en moule est un procédé de transformation de la matière a pour principe de porter le métal à température de fusion, afin de le rendre liquide pour le verser dans un moule, jusqu'à ce que le métal se solidifie. Une fois solide, il aura pris la forme du moule et la pièce sera donc formée selon la dimension souhaitée. Rentrons plus dans le détail : Il faut commencer par chauffer le métal à sa température de fusion, c celle-ci étant différente pour chaque métal. Par exemple, l'acier a une température de fusion de 1500°C alors que l'alliage de cuivre a sa température de fusion à 1000°C et c'est encore plus bas pour l'alliage d'aluminium qui l'atteint à 650°C. Une fois ce métal porté à cet état de fusion on passe à l'étape suivante : Le procédé de coulée. En fonderie cette étape consiste à faire passer le métal liquide dans le moule correspondant à la pièce ou la forme voulue. Il ya différent méthode.



Fig. II.1 : Pièce moulée (Bloc moteur).

II.2.2 Processus de fonderie

À toutes les phases de la fabrication, s'insèrent de nombreuses opérations de mesure et de contrôle (analyse chimique du métal, analyse des sables de moulage, mesures de températures, contrôle tridimensionnel, métallographie ...). La gestion de la qualité est l'une des clés de la réussite industrielle, particulièrement dans les industries de la fonderie, où il faut maîtriser un nombre élevé de paramètres au cours du processus de production. Le moulage d'une pièce passe par les étapes suivantes :

II.2.2.1 Bureau des études-méthodes

Le bureau des études-méthodes réalise l'étude de moulage, prévoit les outillages pour obtenir la pièce et détermine les moyens à employer. Les surépaisseurs d'usinage ainsi que les dépouilles sont également définies sur l'étude de moulage.

II.2.2.2 Modelage (Préparation de l'outillage):

L'atelier de modelage est chargé de la réalisation des modèles nécessaires à la fabrication des moules. Les modèles sont réalisés en bois.

II.2.2.3 Moulage

Le moule est réalisé par serrage du sable de moulage dans des châssis métalliques guidés et assemblés. Chaque plan séparateur des châssis est appelé joint de moulage.

II.2.2.4 Noyautage

Le noyau est constitué de sable réfractaire avec un agglomérant qui permet le durcissement. Après la coulée, le noyau qui a perdu ses qualités de cohésion sera détruit pour obtenir une pièce creuse.

II.2.2.5 Remoulage

Le noyau est positionné dans le moule à l'aide des portées. Le moule est peint à l'aide d'un enduit d'alcool, séché, fermé et crampé afin de résister aux pressions métallo-statiques.

II.2.2.6 Fusion

Les opérateurs de la fusion assurent la préparation des charges nécessaires à l'obtention des nuances demandées et la préparation des poches de coulées. Le responsable de la fusion assure le respect des instructions de préparation et de contrôle métallurgique de la nuance. Le procédé utilisé pour la fusion du métal est le procédé à induction (four à induction).

II.2.2.7 Coulée

L'alliage liquide est introduit dans l'empreinte par un système d'alimentation constitué d'un jet de coulée avec son entonnoir ; d'un chenal et des attaques. Les dimensions de chacun des éléments de ce système d'alimentation sont définies avec précision. Les rapports des sections conditionnent le débit de coulée qui est variable en fonction des formes de la pièce et de l'alliage.

II.2.2.8 Décochage

Le sable constituant l'empreinte est désagrégé sur une grille vibrante après. Après un refroidissement et solidification de la pièce à l'air, les moules sont décochés sur une grille vibrante ou sur une décocheuse de capacité 8 tonnes pour séparer les pièces des moules.

II.2.2.9 Grenailage / sablage:

L'opération de grenailage a pour but de nettoyer les pièces du sable et des impuretés. Cette opération est réalisée sur une grenailleuse ou à l'aide d'une sableuse.

II.2.2.10 Ebarbage

C'est l'opération de débarrasser des systèmes d'alimentation et des masselottes des pièces grenillées. Le système d'alimentation est séparé de la pièce par sciage ou tronçonnage et refondu. Le rapport poids de la pièce brute/poids de la pièce livrée est un des éléments du prix de revient de la fabrication.

II.2.2.11 Traitement thermique:

Les pièces coulées doivent subir un traitement thermique. Le type du traitement thermique est fonction de la nuance et de la fonction des caractéristiques intrinsèques de la pièce.

II.2.2.12 Usinage

Les pièces sont usinées et contrôlées selon les spécifications des clients.

II.2.2.13 Contrôles et essais

Après les opérations de finition et d'usinage les pièces subissent des contrôles et des essais. Selon les spécifications des clients:

- Contrôle dimensionnel ;
- Contrôle métallurgique ;
- Essai de charpie ;
- Contrôle de sable ;
- Contrôle de dureté.

II.2.2.14 Peinture et montage

Les pièces sont peintes selon la spécification des cahiers des charges des clients. Les surfaces usinées sont peintes avec du verni pour les protéger contre la corrosion.

II.2.2.15 Stock

Les pièces fabriquées, à leurs états finaux, sont stockés pour les livrer ensuite dans les délais précisés dans le cahier des charges [23].

II.2.3 Vocabulaire technique utilisé en fonderie

- **Modèle** : Objet destiné à être reproduit. Il est l'œuvre du modelleur.
- **Moule** : Corps suffisamment solide et façonné pour recevoir un métal ou un alliage en fusion (fonderie en moule permanent).
- **Châssis** : Cadre en métal destiné à maintenir le sable comprimé autour du modèle (fonderie en moule non permanent).
- **Dépouille** : Elle est prévue sur le modèle afin de l'extraire sans provoquer l'effritement du sable lors de sa sortie.
- **Masselotte** : Excédent de matière qui permet de déplacer la retassure hors de la pièce.
- **Retassure** : Principal défaut de fonderie dont la cause est due à la contraction de l'alliage lors de sa solidification.
- **Joint de moule (plan de joint)** : Séparation entre les châssis. Une pièce peut être réalisée avec plusieurs châssis donc plusieurs plans de joint.
- **Noyau** : Réalisé en sable, il permet d'obtenir les formes intérieures. Il est réalisé dans une boîte à noyau (fonderie en moule non permanent).
- **Event** : Canal destiné à faciliter l'échappement des gaz formés au moment où le métal chaud entre en contact avec la surface de l'empreinte (en incluant l'air présent dans le moule).
- **Chape** : Tout châssis intermédiaire entre le châssis supérieur et le châssis inférieur.

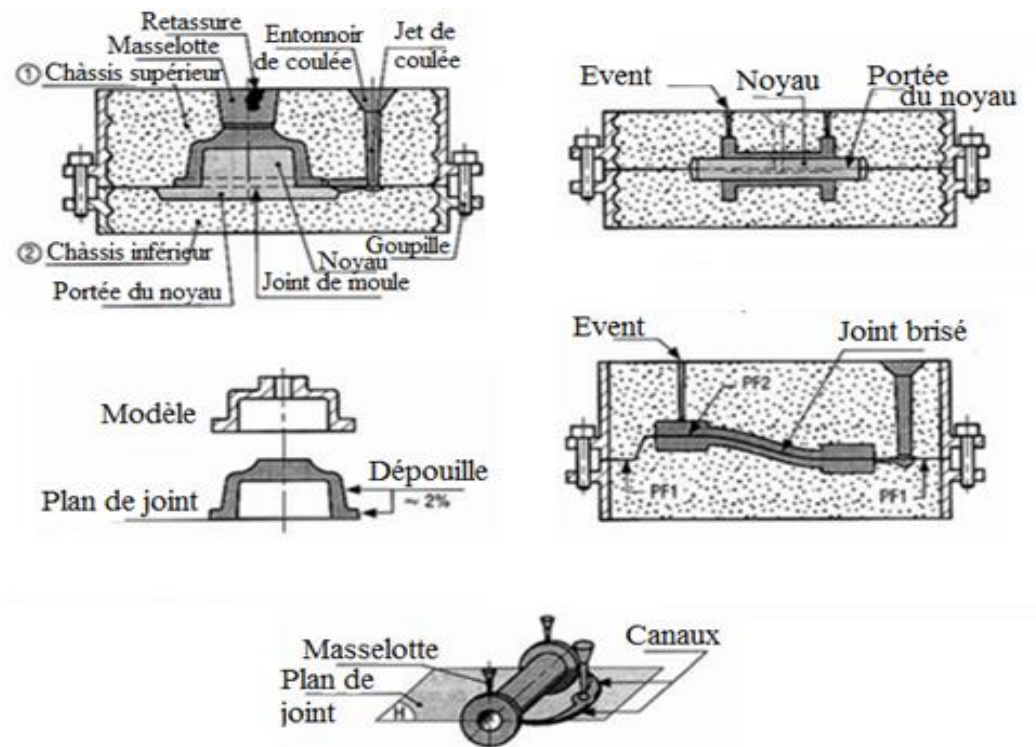


Fig. II.3 : Technique de fonderie.

II.2.4 Matériaux principaux de la fonderie

La gamme des matériaux moulables est très étendue, les principaux alliages utilisés sont les fontes, les aciers, les alliages de cuivre, aluminium, zinc, magnésium, plomb, Pour la fabrication des moules et des noyaux, la fonderie utilise de nombreux matériaux et produits dont les plus importants sont cités ci-après

II.2.4.1 Aciers

Les domaines d'utilisation des aciers moulés sont vastes: sidérurgie (structure de laminoirs), matériel ferroviaire, génie civil et travaux publics, construction navale (étambot, support d'arbres, étraves, gouvernails, ancres...), pétrole, chimie, nucléaire, mécanique, électricité, automobile...

Différents types d'aciers moulés :

- Aciers moulés de construction non alliés ou faiblement alliés pour traitement thermique (NFA 32-054) : C 40 -20 Mn Cr 5
- Aciers moulés d'usage général : G S 235 -G E 335
- Aciers moulés pour pièces soumises à pression et (ou) haute température (NF A 32-055) :25 Cr Mo 4

- Aciers moulés pour emploi à basse température (NF A 32-053)
- Aciers moulés spéciaux pour applications magnétiques (NF A 32-052)
- Aciers moulés inoxydables (NF A 32-056): X 2 Cr Ni 19 11
- Aciers moulés réfractaires: X 30 Cr 13

II.2.4.2 Fontes

Les fontes moulées sont utilisées dans nombre de domaines: industrie automobile (tubulure d'échappement), matériel lourd (moteurs diesel, chaudières, pompes et compresseur), mécanique générale...La fonte présente des caractéristiques intéressantes d'utilisation comme un large intervalle de température en service (de -200°C à +1000°C), une bonne usinabilité, et un meilleur amortissement des vibrations que l'acier, critère important pour la réalisation de machine-outil, machine-textile, machine d'imprimerie, ou la transmission de commandes marines.

Les Différents types de fonte :

- Fontes grises (G): carbone en majeure partie à l'état de graphite sous forme de lamelles de différentes dimensions, ou sous forme de nodules ou de sphères.
 - Fontes à graphite lamellaire (GL): EN-JL1010
 - Fontes à graphite sphéroïdal (GS) EN-JS 1010
- Fontes malléables (Fe3C): structure exempte de graphite (le carbone est sous forme combinée) la structure finale est obtenue ultérieurement par des traitements thermiques.
 - Fontes malléables à cœur blanc (NF A 32-701): grande ductilité, composants pour les raccords hydrauliques basse pression, MB 380-12 MB 400-5, MB 450-7.
 - Fontes malléables à cœur noir (NF A 32-702): caractéristiques mécaniques élevées (résistance à l'usure) composants pour l'hydraulique haute pression, MN 350-10, MN 4506, MN 700-2.

II.2.4.3 Aluminium et alliages légers

On trouve des alliages présentant une bonne aptitude au moulage obtenue par l'apport de silicium (Al Si 13, Al Si 10 Mg, Al Si 5 Cu), des alliages traités thermiquement à hautes caractéristiques mécaniques obtenues par l'apport en magnésium (Al Cu 5 Mg T1, Al Si 7 Mg, Al Si 10 Mg). Ce sont des alliages résistant à la corrosion.

II.2.4.4 Zinc et alliages de zinc

Les alliages de cuivre particulièrement adaptés à la coulée sous pression, permettent la production de pièces complexes et/ou mince. Différents types d'alliages de zinc:

- Zamak1-Zn Al4 Mg ;
- Zn Al12 ;
- Zn Al Cu.

II.2.4.5 Cuivre et alliages de cuivre

Différents types d'alliages de cuivre:

- Laiton -Cu Zn39 Pb2 ;
- Bronze -Cu Sn7;
- Cupro – Aluminiums;
- Cupro-nickels.

II.2.4.6 Sables

II.2.4.6.1 Sables de fonderie

Les sables utilisés en fonderie sont Sables de la base : Sables siliceux (grains de silice SiO₂) et Sables spéciaux (Chromite, Olivine, Zircon, Silico-Alumineux). Ils Doivent répondre à un certain nombre d'impératifs :

- Reproduire fidèlement la pièce modèle.
- Avoir une surface aussi fine que possible.
- Ne pas se désagréger lors de l'extraction du modèle.
- Résister à la température de coulé élevé du métal.
- Résister à l'érosion par le métal liquide, lors de la coulée.
- Ne pas s'opposer au passage des gaz produits pendant la coulée.
- Résister suffisamment aux efforts de retrait du métal.
- Permettre un décochage aisé.

II.2.4.6.2 Composition des sables de fonderie

Elle est généralement de :

- 70 à 80% de silice ;
- 5 à 15% d'argile ;
- 7 à 10% d'eau ;
- 3 à 5% d'impuretés (oxyde de fer, matières organiques, etc.).

Le fait de jouer sur ces pourcentages permet de faire varier les qualités demandées au sable. On distingue les sables :

- De contact qui adhèrent à la surface du modèle et se trouve en contact avec le métal en fusion.
- De remplissage (vieux sable) utilisé pour combler tout le volume du châssis.
- Unique utilisé dans les fonderies mécanisées, où on a recours au sablage mécanique.

On emploie le sable unique pour remplir tout le volume du châssis. Sa cohésion, sa perméabilité et refractairité sont élevées [24].

II.2.4.7 Liants

Ils doivent en effet donner :

- La plasticité au sable pour épouser les formes du modèle et acquérir ensuite par durcissement une résistance mécanique permettant de conserver la forme jusqu'à la solidification du métal
- Le minimum de réactions moule/métal qui sont des risques de défauts sur pièce de types piqûres ou soufflures.
- On peut classer les liants en deux grandes familles :
 - (a) **les liants minéraux** comme les argiles, bentonite, silice colloïdale, silicate soluble, plâtre et ciment.
 - (b) **les liants organiques** comme les matières amylacées (dérivées de l'amidon), les huiles siccatives et les résines synthétiques durcis sables à chaud ou à froid, avec catalyseurs solide, liquide ou gazeux.

II.2.4.8 Produits annexes et divers

- Adjuvants mélangés au sable pour obtenir des effets secondaires ;
- Colles à froid ou à chaud, pour assembler entre elles des parties de moule ou de noyaux ;
- Enduits déposés à l'interface moule-métal, pour limiter les réactions moule/métal. On utilise couramment la silice, la chamotte, le zircon, l'oxyde de fer, le talc, le graphite...
- Agents de démoulage pulvérisés sur le modèle avant le moulage, pour éviter le collage du sable (pétrole par exemple) ;
- Mastics pour réparation des moules [25].

- Produits spéciaux Beaucoup de procédés de moulage particuliers font appel à des produits spéciaux, comme par exemple la fonderie de précision (dite aussi en cire perdue) qui utilise des modèles injectés en cire, ou en urée, puis éliminés par chauffage après dépôt et durcissement des couches réfractaires sur les modèles. Citons aussi les élastomères pour le moulage de certaines pièces difficiles à mouler (statues, bijoux, etc.).

II.2.5 Différents type de fonderie

Dans la spécialisation de la fonderie, on distingue pratiquement les fonderies suivantes

a) Selon la nature des métaux et alliages :

- Fonderie de fonte ;
- Fonderie d'acier ;
- Fonderie d'aluminium et ses alliages ;
- Fonderie de cuivre, bronzes, laitons etc...

b) Selon l'utilisation :

- Fonderie d'art ;
- Fonderie d'ornement (bijoux) ;
- Fonderie de mécanique industrielle ;

c) Selon le procédé de moulage :

- Moulage en sable (manuel ou mécanique) ;
- Moulage en carapaces ;
- Moulage à la cire perdue ;
- Moulage en coquilles (moule permanent).

Dans ces procédés le moule peut-être permanent ou non permanent (destructible).

- **Moule non permanent** est utilisé qu'une seule fois, pour extraire la pièce, il faut le détruire, l'empreinte est obtenue par moulage du matériau constitutif autour d'un modèle réalisé en bois ou en métal ;
- **Moule permanent** peut servir un grand nombre de fois, il est réalisé en plusieurs parties pour faciliter l'extraction de la pièce. Il est utilisé surtout lorsque la quantité de pièces à couler est importante.



Fig. II.4 : Exemple de fonderie en sable (pièce en aluminium).

II.2.5.1 Moule non permanent

Pour réaliser ces moules non permanent il est utilisé différents types de matériaux et procédés, moulage en sable, en plâtre, en céramique, en coquille, cire perdue, polystyrène expansé. Le moule doit posséder certaine propriété, il doit être rigide pour conserver la forme de l’empreinte, perméable il pour échapper l’air chaud et les gaz, une stabilité thermique pour supprimer les risque de fissure au contact du métal. Les moules peuvent être fait de différentes manières. Manuellement: Le sable est tassé dans les deux parties du châssis métallique autour du modèle qui est ensuite retiré, le sable prend de ce fait l’empreinte du modèle. En cire perdue: Un modèle réalisé en cire perdue est recouvert par un matériau réfractaire, la cire est ensuite fondue et évacuer. En polystyrène expansé, de la même manière que pour la cire perdue sauf que le modèle est en polystyrène expansé et qu’il fond lors du contact avec le métal liquide.

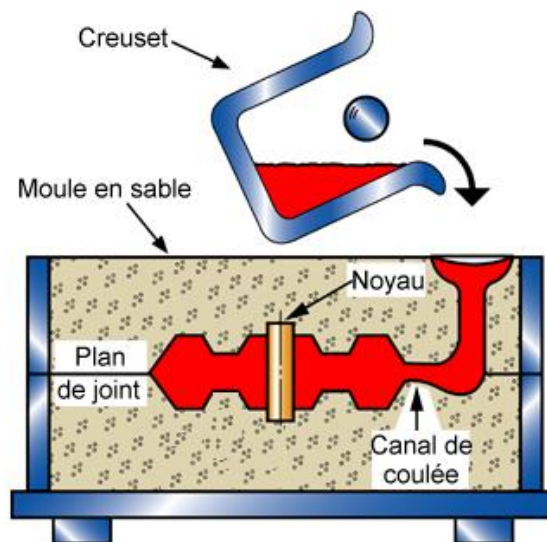


Fig. II.5 : moulage en sable.

Dans le cas où une pièce possède des formes intérieures on ajoute au moule des «noyaux» placés dans la cavité. Le moule possède une «masselotte» un volume de métal liquide qui permet d'alimenter la pièce pendant sa solidification (et qui sera ensuite séparé de la pièce finale puis refondue).

II.2.5.1.1 Opérations d'exécution manuelle d'un moule non permanent

L'exécution manuelle d'un moule en sable comprend les opérations suivantes :

(a) Confection de la partie inférieure du moule

- Partie II du modèle est placée sur un marbre sur lequel se trouve le châssis inférieur.
- Sable de moulage neuf est tamisé sur la face du joint, autour et au dessus du modèle.
- Remplir progressivement le châssis de sable vieux tout en serrant au fouloir et à la pilette.
- Châssis est retourné pour que la face de joint soit lissée à la truelle, ensuite elle est saupoudrée avec du sable blanc sec exempt d'argile. Ensuite enfoncer légèrement le mandrin de coulée et le mandrin d'évent.

(b) Confection de la partie supérieure du moule

- Goujonner le châssis de dessus.
- Placer la partie I du modèle.
- Tamiser du sable de moulage neuf, puis enfin de sable vieux et serrer.
- A l'aide de l'aiguille piquer les trous d'air qui faciliteront l'évacuation des gaz.

(c) Démoulage du modèle et du mandrin

- Enlever le mandrin de coulée est d'évent.
- Séparer les deux châssis, que le sable blanc saupoudré sur la face des joints empêche d'adhérer l'un à l'autre.
- Sortir le modèle après l'avoir ébranlé doucement en utilisant un tire fond qui facilitera la prise du modèle.
- Exécuter et lisser à la spatule, le bassin de coulée (masselotte) dans le dessus du châssis et le canal de coulée dans le dessous du châssis.
- Lisser légèrement l'empreinte et le saupoudrer de noir de fonderie qui donnera à la pièce des faces bien lisses.

(d) Remoulage

- Il s'agit de la préparation du moule déjà exécuté en vue de la coulée du métal.
- Pose du noyau s'il y a lieu, on donne au noyau un appui par sa partie ou ses parties hautes, car à défauts lors de la coulée, il serait soulevé par la poussée du métal liquide (principe d 'Archimède).
- Pose du châssis de dessus sur le châssis de dessous en vérifiant leur position relative et leur contact. Le moule est posé sur un lit de sable.
- Placer sur le châssis supérieur des poids afin d'éviter son soulèvement lors de la coulée du métal qui forme une certaine pression.

(e) Coulée du métal

On peut utiliser le moule tel qu'il vient d'être réalisé et dans ce cas le moulage est dit moulage à vert (en raison de l'humidité du sable, des surfaces externes des pièces, surtout pour la fonte sont durcies après refroidissement ce qui peut provoquer la détérioration rapide des outils de coupe .Pour éviter ce durcissement superficiel, on pratique le moulage étuvé. Après avoir badigeonné les parois de l'empreinte avec de la poudre noir de fonderie, pour les rendre moins friables, on sèche les moules en étuve. Cette pratique prend beaucoup de temps et nécessite des installations très coûteuses. Ce mode de moulage est évité actuellement par l'emploi de sables contenant des résines dont le durcissement à froid se prête au moulage à vert dans de très bonnes conditions .Le métal liquide destiné à remplir l'empreinte du moule est obtenu après fusion dans le cubilot ou dans des fours de fusion, il est recueilli dans une poche de coulée, représentant un récipient en tôle d'acier garnie intérieurement d'un revêtement réfractaire préalablement chauffé (Fig. II.6). La poche de coulée est transportée et manœuvrée à la main ou mécaniquement, cela dépend de la capacité de cette dernière.

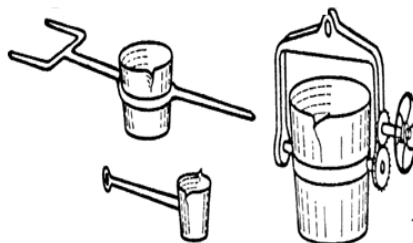


Fig. II.6 : poches de coulée.

Afin d'éviter les fuites du métal qui se produisent dans le plan de joint du moule a cause de la poussée verticale du métal arrivant dans l'empreinte, on charge le châssis avec des poids (fonte en gueuse par ex.) ou on relie les deux châssis par des goujons .Le métal liquide est

versé par le trou de coulée jusqu'à remplissage complet. Lorsque la quantité de métal à couler est relativement importante ou lorsque la pièce représente des parties hautes, on ajoute des masselottes (évent), dont le volume disponible à pour effet de nourrir l'empreinte, donc ce sont des réserves de métal en fusion qui facilitent le bon remplissage de l'empreinte. Lors de la coulée, le métal liquide pénètre dans l'empreinte du moule à travers le système de coulée. En général un système de coulée (Fig.7)

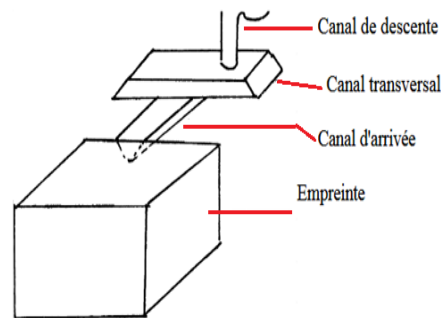


Fig. II.7 : système de coulée.

(f) Décochage

On commence le décochage de la pièce, seulement lorsque la température est assez basse c'est- à -dire lorsque la pièce est totalement solidifiée Le système de coulée et éventuellement la masselotte sont séparés de la pièce a l'aide d'un marteau sans détérioration de cette dernière

(g) Dessablage

L'opération de dessablage est nécessaire, afin de débarrasser la pièce du sable qui adhère a ses surfaces. Au contact du sable froid, le métal se refroidit rapidement et sa surface extérieure est enrobée de grains de sable, on procède le plus souvent par décalaminage par sable (choc au sable siliceux bien sec) ou grenailage par acier projeté au moyen d'un jet d'air comprimé.

(h) Ebarbage

L'ébarbage consiste à éliminer le talon de coulée, les bavures aux joints, les picots de trous de coulée et les rugosités, on l'exécute le plus souvent à la meule [26].

II.2.5.2 Moule permanent

Le moule permanent peut supporter plusieurs coulées successives avant sa mise hors service. Les opérations fondamentales que sont le moulage (obtention des formes) (Fig. II.8), le remplissage en alliage liquide, l'alimentation de la pièce pendant la solidification et enfin le

démoulage de cette pièce sont assurés par le moule qui devra être mécanisé presque totalement. La répétition de ces opérations amène à parler de cycle de moulage et de cadence de production, qui sont spécifiques à chaque moule. Le remplissage et l'alimentation sont déterminés par la pesanteur, le moule étant appelé coquille, d'où la désignation courante de ce procédé de moulage : coulée en coquille, par gravité. Ce procédé peut être utilisé avantageusement à partir d'une série minimale de 2000 pièces. Les pièces obtenues sont précises, grâce à la grande rigidité du moule et présentent de bons états de surface.

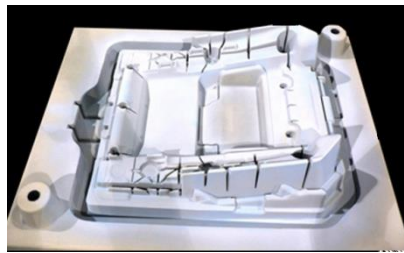


Fig. II.8 : Exemple de moule permanent.

(a) Matériau du moule permanent

- En alliage léger dans le cas de formes très simples et pour la coulée de petite série (<1.000 pièces ou en fonte ordinaire de très bonne qualité (FGL).
- En acier pour certains alliages (ex: à base d'étain) et pour les très grandes séries (500.000pièces).

(b) Fabrication du moule permanent

Il est divisé en autant d'éléments (usinés avec grande précision pour les outilleurs) nécessaires pour l'extraction de la pièce :

- Masselottes et les éjecteurs ;
- Coquilles sont actionnées mécaniquement ;
- Moules les plus simples se composent de deux parties appelées chapes séparées par une surface de joint généralement verticale.

II.2.6 Conception des modèles

Le modèle est une représentation sous forme d'une pièce ou ensemble de pièces de l'objet à fabriquer et permettant la confection de l'empreinte du moule en sable. Il est exécuté en bois ou en métal d'après le dessin de fabrication, c'est à dire le matériau utilisé pour la confection du modèle dépend essentiellement du procédé de moulage (manuel ou mécanique).Un modèle doit posséder :

- Une bonne résistance contre les contraintes mécaniques ;
- Une bonne résistance contre les contraintes chimiques (humidité, liant , gaz etc.) ;
- Une bonne résistance contre les contraintes thermiques (échauffement du modèle dans les différents procédés de moulage) ;
- Une précision de la forme et des dimensions ;
- Bas prix de revient.

Le bois reste depuis longtemps la matière essentielle pour la confection des modèles. Pour chaque type de bois on trouve des propriétés différentes. On utilise surtout des bois traités, sans fissures et sec (moins de 10% d'humidité) pour prévenir leur déformation au cours du séchage. La surface de travail doit être lisse et résistante à l'usure. Pour exécuter des pièces en grande série, les modèles sont métalliques, ils sont usinés, polis et montés sur des plaques modèles métalliques. Ils sont conçus à partir de différents alliages tels que : Alliage d'aluminium ; Magnésium ; Zinc ; Cuivre ; Fontes Et Aciers.

Sur les surfaces des modèles sont appliqués des enduits destinés à améliorer leurs propriétés de surface. La couche mince d'enduit ne doit pas avoir une influence sur la forme et les dimensions du modèle. Les enduits métalliques sont obtenus par galvanisation ou Chromatisation et non métalliques par peinture [26].

Lors de la réalisation du modèle on doit tenir compte :

II.2.6.1 Criques

Les tensions internes à la pièce dues aux différentes phases du matériau ainsi qu'au glissement de l'alliage dans le moule conduisent à l'apparition de criques. Ce sont des ruptures partielles qui ont lieu à de hautes températures en présence de petite quantité d'alliage encore liquide, sous l'effet d'efforts internes résultants de l'inégalité de retrait (Fig. II.9).

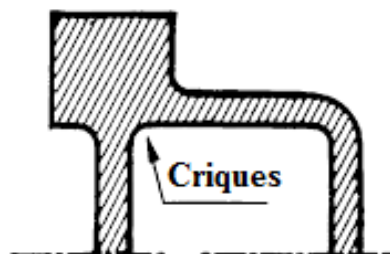


Fig. II.9 : Formation d'une crique liée à la formation d'un point chaud dans la partie massive.

II.2.6.2 Retassure

Au cours du refroidissement, la contraction non uniforme du métal peut créer des cavités au centre de la matière: ce sont les retassures. Elles peuvent être externes donc visibles au démoulage (Fig.II.10), elles peuvent être internes à la matière et plus difficilement détectables.

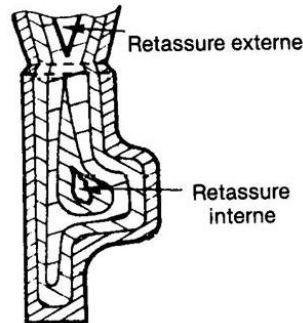


Fig. II.10 : Retassures externes et internes, et ajouts de masselottes limitant le phénomène.

Afin de palier ou limiter les risques de retassures et de retrait, une réserve d'alliage liquide est prévue en dehors du volume de la pièce finale. Cette réserve appelée masselotte, permet l'orientation du refroidissement de la pièce dans le moule: les parties minces sont alimentées en alliage liquide par les parties plus épaisses qui sont elles-mêmes alimentées par les masselottes [27].

II.2.6.3 Masselottes

La masselotte est une réserve d'alliage liquide qui ne fait pas partie de la pièce finale. Elle alimente la pièce pour compenser la contraction lors du refroidissement. Afin d'être efficace, les masselottes doivent respecter deux critères (II.11) :

- Se solidifier après la partie à alimenter. Cela se vérifie en imposant que le module de la masselotte est supérieur à celui de la partie à alimenter.
- Comporter une réserve de métal suffisante pour compenser les retraits. On impose en général que le volume de la masselotte doit être supérieur à 0,3 fois le volume masselotte.

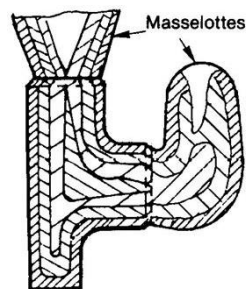


Fig. II.11 : Conception du moule avec masselottes.

II.2.6.4 Surépaisseur d'usinage

S'il y a lieu, dans ce cas la pièce brute doit comporter des surépaisseurs qui seront enlevées durant l'opération d'usinage. Donc les dimensions du modèle doivent être augmentées de 2 à 3 mm. Généralement la grandeur de la surépaisseur d'usinage est choisit suivant un tab. Spécial. Elle dépend essentiellement de la nature du métal à couler, des dimensions de la pièce et de la position de ses surfaces pendant la coulée.

II.2.6.5 Retrait

Il est nécessaire, afin de concevoir le moule pour obtenir la pièce refroidie souhaitée, de prévoir l'évolution spatiale et temporelle du refroidissement de la pièce. Selon les dimensions, le refroidissement n'est pas uniforme les parties minces refroidissant plus rapidement que les parties épaisses. L'alliage chauffé se dilate, il est coulé dans le moule où lors de son refroidissement il se contracte: le retrait apparaît. Les cotes du moule doivent donc tenir compte du retrait, même si en pratique sur des pièces de formes compliquées le retrait n'est pas uniforme (II.12

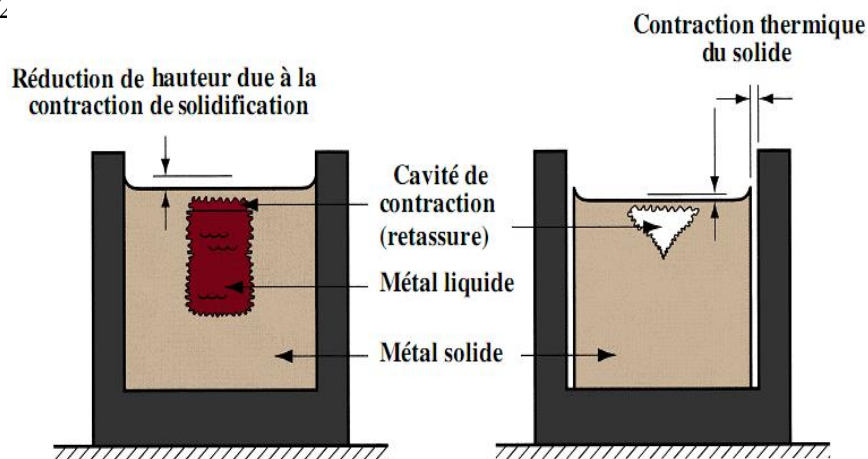


Fig. II.12. Schéma de variations de volume de l'acier, depuis l'état liquide.

Son existence oblige le modelleur à prévoir sur le modèle des dimensions supérieures à celles de la pièce, d'environ :

- 1,2 à 2,4% pour les aciers ;
- 1 à 1,5% pour les fontes ;
- 1,2 à 1,6% pour les alliages d'aluminium et cuivreux.

II.2.6.6 Dépouille

Les formes du modèle doivent permettre son extraction du sable sans dégradation du moule. Dans ce but, on donne une certaine inclinaison aux parois du modèle c'est la dépouille

(pente de 3 à 10%). La dépouille correspond à l'inclinaison des parois permettant d'assurer le démoulage de la pièce dans le cas d'un moule permanent «exp : moulage en coquille » ou le démoulage du modèle dans le cas d'un moule non permanent (sable) (II.13) .

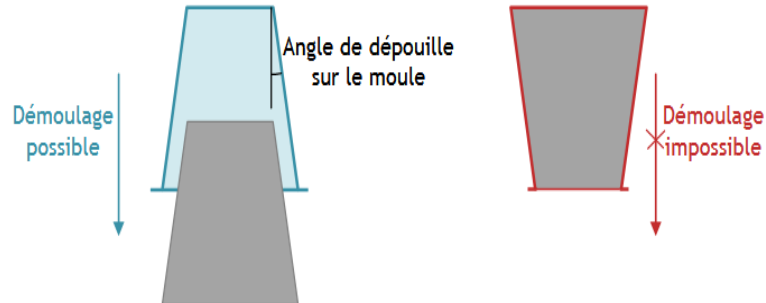


Fig. II.13 : Illustration de l'intérêt de la dépouille lors du démoulage.

L'ordre de grandeur des angles de dépouille dépend du type de moulage: 3% pour le moulage en coquille, 5% pour le moulage au sable et même 0 % ou négative (contre-dépouille) pour le moulage en cire perdue.

II.2.6.7 Noyaux et boîtes à noyaux

Le noyau permet d'obtenir les formes creuses ou cavités, il est positionné dans l'empreinte du moule après avoir été formé dans une boîte à noyau, Les noyaux sont en sable aggloméré résistant à la pression de la coulée et cependant se désagréant aisément au démoulage. En fonction de la complexité des formes creuses, celles-ci sont réalisées par un ou plusieurs noyaux de forme plus ou moins compliquées qui sont agencés dans le moule. Dans l'empreinte du moule, ils sont positionnés sur des portées de noyau de forme généralement coniques qui doivent donc être prévus au moment de la formation de l'empreinte. Les noyaux sont maintenus en position par les deux parties du moule une fois refermé. Le noyau est confectionné en sable auto-siccant, dans un moule appelé boîte à noyau en bois ou métallique et se compose de deux parties assemblées par des groupes de repérage (II.14).

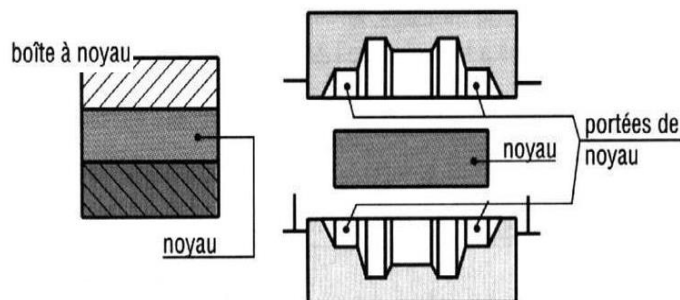


Fig. II.14 : Exemples de boîtes à noyaux.

Lorsque le sable est serré ce dernier prend la forme du moule. Le noyau est sorti de la boîte sans détérioration, ensuite il est séché (cuit) à F étuve pour lui donner une solidité lui permettant de résister à l'érosion du métal en fusion et aux efforts de compression qu'il subit lors du refroidissement de la pièce

L'incorporation de certaines résines synthétiques au sable du noyau permet :

- Soit un moulage du noyau dans une boîte métallique chauffée modérément et dans laquelle le sable est injecté. Le durcissement dure alors moins d'une minute. Un dispositif pneumatique porté par la machine assure l'ouverture et la fermeture de la boîte.
- Soit un moulage à la main et un durcissement à froid moins rapide, mais qui dispense de l'étuvage habituel (séchage thermique ou durcissement chimique). Les dimensions du noyau sont établies comme celles du modèle, en tenant compte des surépaisseurs d'usinage, du retrait et de la dépouille éventuellement. Pour la fabrication des pièces en petites série, on utilise les noyaux perdus, qui sont confectionnés à partir du sable siliceux et liant. Ces noyaux sont détruits lors de l'extraction de la pièce coulée. Pour la fabrication de pièces en grande série, on utilise le plus souvent les noyaux en acier ou en fonte, afin d'éviter leur collage avec la pièce, ils sont peints avant la coulée avec un noir résistant à la chaleur. Lors de l'extraction de la pièce, ils ne sont pas détruits et peuvent être réutilisés.

Les parties intérieures d'une pièce sont souvent des parties en contre dépouille. Pour réaliser ces formes, on place des masses de sable aggloméré ou des broches métalliques coulissantes à l'intérieur de l'empreinte. Ces masses de sable sont obtenues dans des boîtes à noyaux. L'empreinte est complétée par des portées qui permettent de tenir le noyau dans le moule. Parties de moule exécutées séparément, les noyaux permettent le plus souvent de ménager des évidements dans les pièces, parfois de faciliter le démoulage. Ils comportent toujours deux zones :

- L'une qui sera en contact avec le métal liquide et donnera la forme à la pièce.
- L'autre, en contact avec le sable du moule, sert à son positionnement (portée).

Les propriétés des noyaux le plus important sont :

- Solide à fin de résister à la poussée que le liquide exerce sur lui.
- Perméable aux gaz produits au moment de la coulée
- Infusible pour éviter la pénétration à l'intérieur du métal.

- Pouvoir se désagrégé facilement après la coulée, pour qu'on puisse aisément enlever le sable demeuré dans les parties creuses des pièces.

II.2.6.8 Congés

Arrondis de rayon variable qui permet d'éviter les tensions internes et de faciliter le démoulage.

II.2.6.9 Portées de noyau

Parties rapportées au positif sur les modèles avec noyau pour maintenir, soutenir et positionner ces derniers.

II.2.6.10 Sables de fonderie

Les sables utilisés en fonderie doivent répondre à un certain nombre d'impératifs :

- Reproduire fidèlement la pièce modèle ;
- Avoir une surface aussi fine que possible ;
- Ne pas se désagréger lors de l'extraction du modèle ;
- Résister à la température de coulé élevé du métal ;
- Résister à l'érosion par le métal liquide, lors de la coulée ;
- Ne pas s'opposer au passage des gaz produits pendant la coulée ;
- Résister suffisamment aux efforts de retrait du métal ;
- Permettre un décochage aisé.

II.2.6.11 Composition des sables de fonderie

Elle est généralement de :

- 70 à 80% de silice ;
- 5 à 15% d'argile ;
- 7 à 10% d'eau ;
- 3 à 5% d'impuretés (oxyde de fer, matières organiques, etc.).

Le fait de jouer sur ces pourcentages permet de faire varier les qualités.

II.2.7 Caractéristiques du processus du moulage au sable

Le moulage en sable présente les avantages suivants :

- Elaboration de tous types de matériaux métalliques. ;
- Poids des pièces: 200 grammes à plusieurs tonnes (dépend du matériau) ;
- Tolérances dimensionnelles : $\pm 0,5$ à ± 10 mm suivant la côte tolérance ;

- Epaisseur minimale des parois: 2,5mm ;
- Il permet de réaliser une grande variété de formes ;
- On peut couler des métaux ayant une température de fusion dépassant 1100°C.

Ce type de moulage comporte les inconvénients suivants :

- Surface de la pièce moulée contient du sable, ce qui cause une usure rapide des outils de coupe ;
- Pièces du moulage en sable ont des propriétés mécaniques bien plus faibles que celles du moulage en moule métallique à cause du refroidissement / environnement du métal. Ainsi, aucune direction des grains n'est obtenue et la pièce moulée résiste mal aux efforts de traction et de pliage, c'est pour cela que ce genre de procédés est limité au bloc moteur complexe, aux culasses et toutes pièces généralement creuses ;
- Lors du refroidissement, les pièces sont portées à se déformer à cause de la variation des épaisseurs ou du refroidissement inégal.

Chapitre III/

« Modélisation d'une pièces métallique »

III. Partie pratique

Pour concevoir un moule sur le plan thermique, en respectant quelques principes élémentaires, on se rapproche sensiblement d'une étude de moulage idéale et il suffit, et pour cela j'ai assisté a l'étude et la réalisation d'une pièce (la bouche d'aspiration), de faire quelques réglages au cours de la mise au point des premières pièces pour arriver aux résultats attendus.

III.1 Données de départ

Pour faire l'usinage des pièces par moulage on dispose des données suivantes :

III.1.1 Dessin de définition de la pièce

- Cette pièce de dimension $\Phi 1000 \times 449$

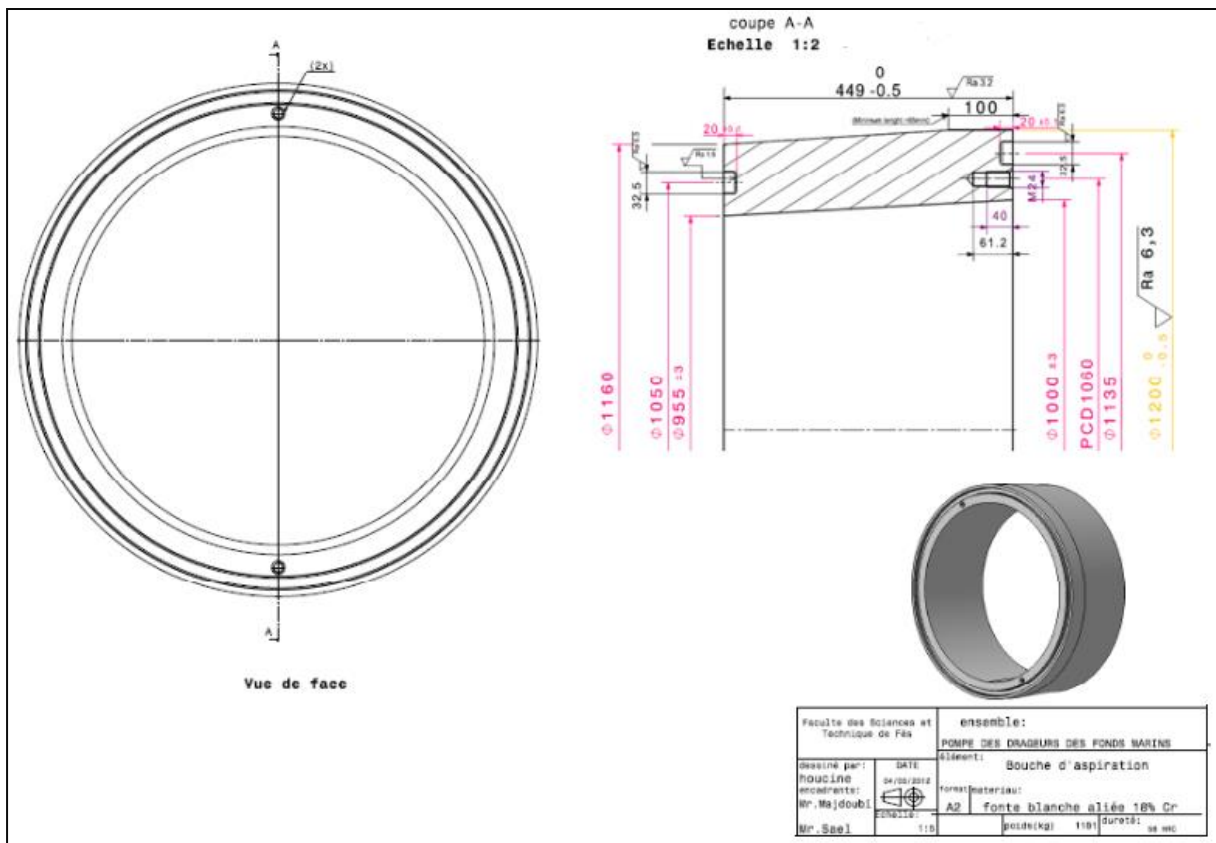


Fig.III.1 : Dessin de définition.

III.1.2 Caractéristique des matériaux utilisés de la pièce moulée

Le matériau retenu dans cette étude est un alliage de fonte blanche voir tableau ci-dessous.

Tab. III.1 Caractéristiques des matériaux utilisés de la pièce

Désignation	EN-GJN-HV600(XCr14)
Rm (MPa)	300-550
Dureté HRC	58
Masse Volumique (g/cm)	7.8
Propriétés	<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne caractéristiques mécaniques. - Très bonne résistance à la corrosion.
Emplois	<ul style="list-style-type: none"> - Industrie minière, pièces soumises à l'abrasion. - Pièce sollicité thermiquement - Pièce d'usure.

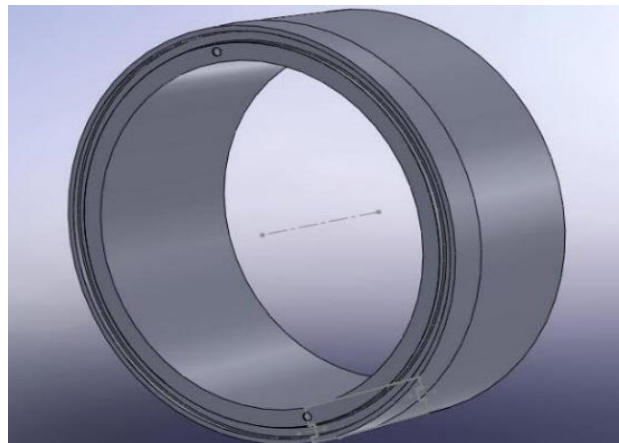


Fig. III.2 : Pièce moulée (Bouche d'aspiration).

III.1.3 Sens de moulage

- **Positionnement de la pièce dans le moule**

La pièce est placée verticalement dans le moule pour faciliter le remplissage de l'empreinte sous l'action de la hauteur de charge.

- **Détermination du plan de joint**

Dans le cas de cette pièce, Il sera dans le plan indiqué sur la figure (III.3), ce qui divise la pièce en deux parties.

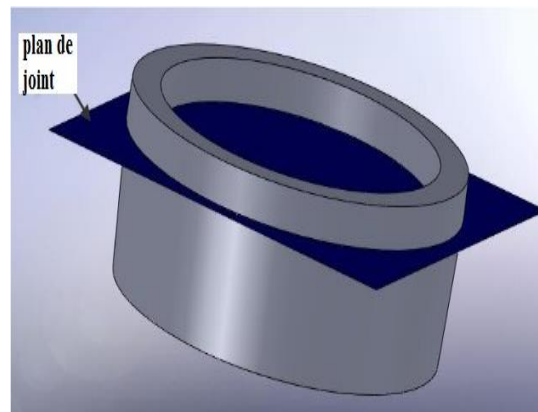


Fig. III.3 : Plan de joint.

III.1.4 Conception du modèle et de noyaux

- **Modèle de la pièce**

Premièrement on ajoute les surépaisseurs et les dépouilles trouvés au dessin de définition et on dessine le noyau. Puis, on multiplie les dimensions par les coefficients de retrait. A partir de ces dimensions, on réalise le modèle et les boîtes à noyaux.

- **Noyautage**

Le noyau comporte une portée pour lui assurer une mise en place précise dans le moule, ainsi, la portée du noyau doit avoir un jeu pour éviter son écrasement lors de remmoulage. On peut construire une boîte à noyau pour pièce.

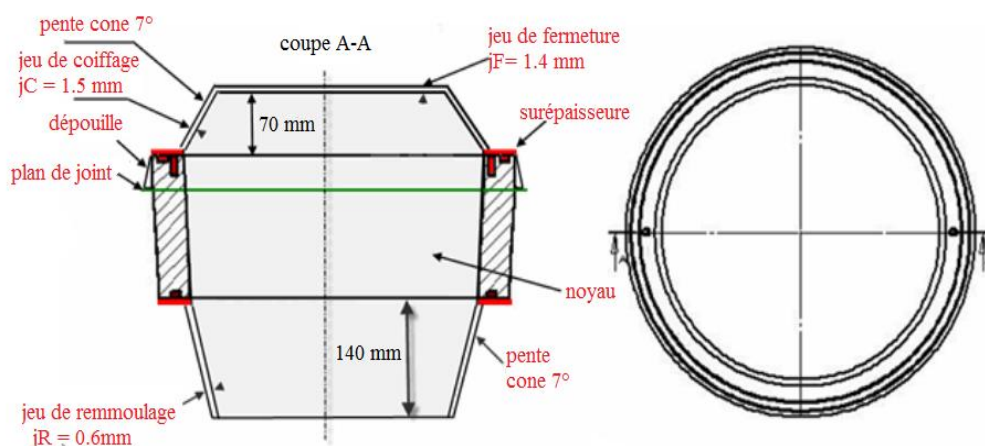


Fig. III.4 : Préparation (traçage) de noyau.

On peut construire une boîte à noyau pour pièce.

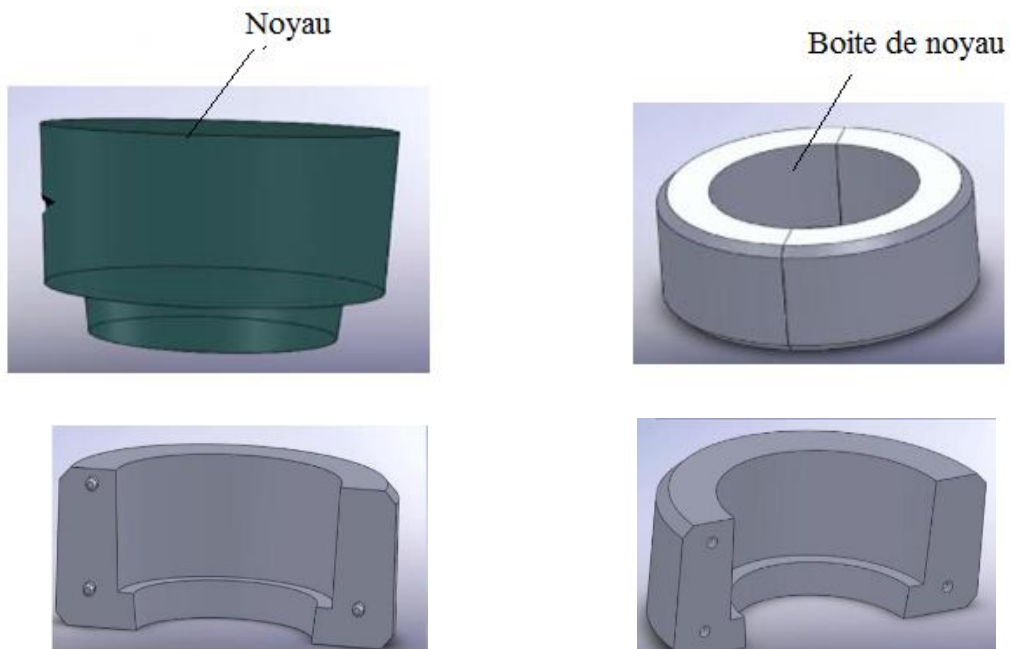


Fig. III.5 : Boîte de noyau et noyau.

III.1.5 Paramètres de la masselotte

On utilise les manchons (masselotte exothermiques) qui ont pour but de garder la température du métal du coulage jusqu'à l'achèvement de l'opération de remplissage. Pour faciliter la casse de la masselotte et l'alimentation de la pièce, on utilise un col à casser comme la montre la figure ci-après.

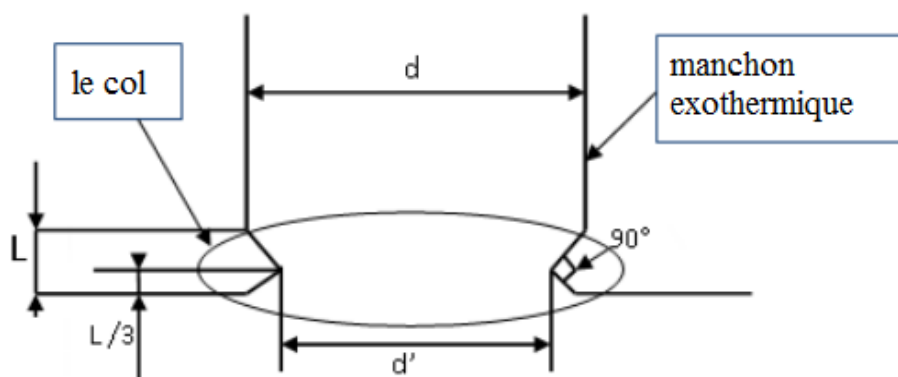


Fig. III.6 : Profil des cols de liaison

La relation entre le volume de la masselotte (V_m) et le volume de la pièce (V_p) est comme suit:

$$V_m > K \cdot r \cdot V_p$$

Avec :

- K : coefficient lié au rendement de la masselotte ;
- r : retrait à l'état liquide + contraction de solidification.

Et

- $V_p = 163.2 \text{ dm}^3$ (solidWorks)
- $K = 4$ masselotte exothermique, $r = 0.04$ (font blanche)

Donc :

$$V_m = 163.2 \times 4 \times 0.04 \quad V_m = 26.2 \text{ dm}^3$$

On calcule le nombre de masselotte pour avoir :

$$V_m \geq r \times K \times V_p$$

Donc le nombre nécessaire des masselottes :

$$N_m = \frac{26.2}{9.8} = 2.7 \approx 3$$

On prend les 3 masselottes et on les positionne sur la face de la pièce de 120° au lieu de 4 masselottes (voir Fig. ci-dessous).

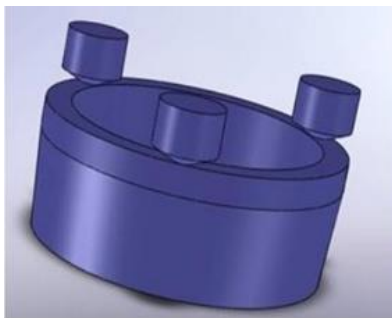


Fig. III.7 : positions des masselottes.

III.1.6 Système de remplissage

On va assurer Le remplissage de l'empreinte par un système d'attaque. Il permet d'amener dans l'empreinte la quantité d'alliage nécessaire à la venue totale de la pièce. Il doit avoir une descente directe vers le creux de l'empreinte et avec un débit constant.

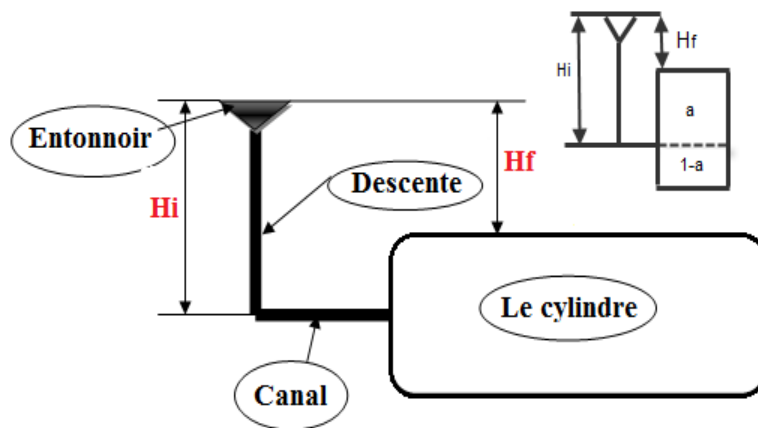


Fig. III.8 : Coulée en chute- source.

III.2 Gamme de moulage de la pièce

On décrit les étapes de moulage pour la pièce étudiée (bouche d'aspiration).

- **Etape 1**

On prépare la partie inférieure du moule, en positionne le châssis sur le modèle de bois, puis on met le sable mélangé avec la résine et le catalyseur (moulage auto durcissant) par un malaxeur

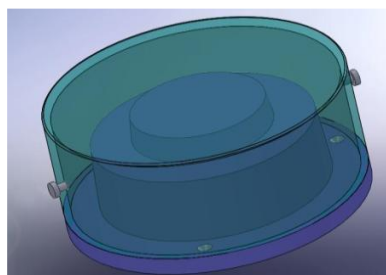


Fig. III.9 : Partie inférieure du moule.

- **Etape 2**

Comme pour la première on prépare la partie supérieure du moule, on positionne le modèle de la deuxième partie du modèle sur la première. On ajoute dans le modèle le système de remplissage (descente, canaux et les attaques) et le système d'alimentation (cols, manchons), et puis on remplit le châssis avec du sable.

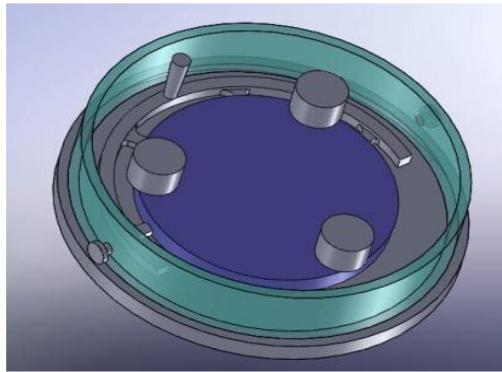


Fig. III.10 : Partie supérieure du moule.

- **Etape 3**

Ensuite on sépare les deux châssis, puis on retire les demis modèles pour obtenir à la fin l’empreint qui sera gravé sur les châssis après avoir les bien nettoyer ainsi les peindre puis les bruler afin d’éliminer les impuretés, l’humidité et avoir un bon état de surface.

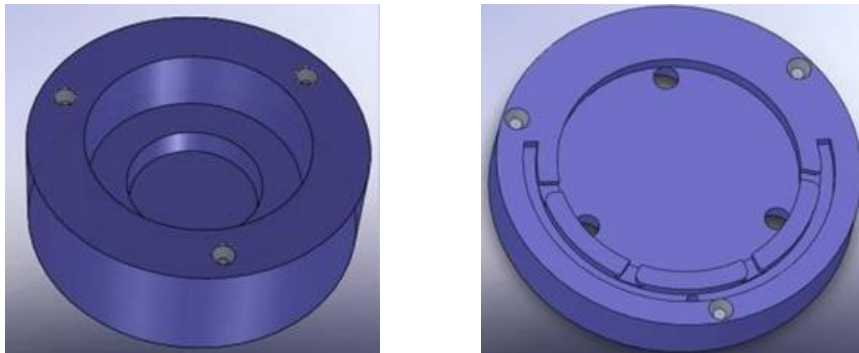


Fig. III.11 : Séparation des deux châssis.

- **Etape 4**

On place le châssis inférieur, ensuite on pose le noyau qui nous donne la forme intérieur de la pièce sur l’empreint inférieur après le faire l’opération de peinture de toutes les surfaces qui contact la coulée puis le bruler par le chalumeau.

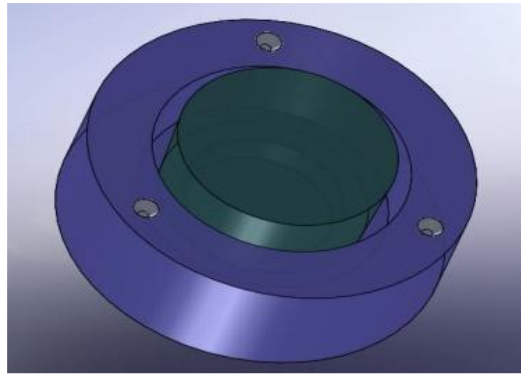


Fig. III.12 : Noyau.

- **Etape 5**

On fait le positionnement des deux moules par ses repère de moulage. Ensuite, on colle les deux moules supérieur et inférieur après les nettoyer des impuretés et de sable détacher lors de remoulage. Puis on met le godet (entonnoir) et la charge sur la moule supérieur

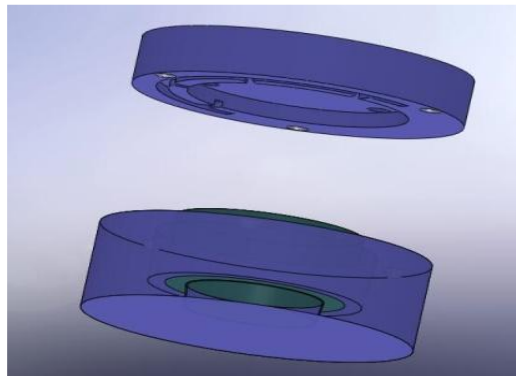


Fig. III.13 : Demis moules de moulage (supérieur et inférieur)

- **Etape 6**

Une fois la pièce refroidie, le moule est détruit. La pièce est séparée par sciage de son dispositif de coulée et des évents, un meulage supprime les bavures

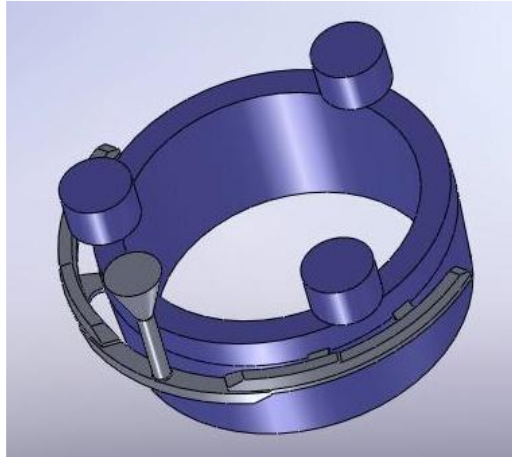


Fig. III.14 : Séparation de pièce.

- **Etape 7**

La pièce brute de fonderie est alors prête pour le traitement thermique et l'usinage de ses surfaces fonctionnelles

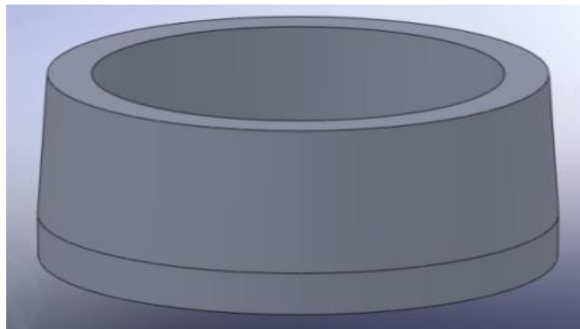


Fig. III.15 : Pièce moulée (obtenue).

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce document s'inscrit dans le cadre de la conception et la fabrication de pièces moulées et plus particulièrement dans une optique d'intégration des connaissances du métier de la fonderie au sein du processus de conception.

Comme pour les autres industries, le développement de produits pour la fonderie a dû répondre au triptyque :

- Augmentation de la productivité ;
- Baisse des coûts, contrôle de la qualité.

La réalisation de cet objectif triple passe par la maîtrise technique du procédé dans son ensemble, de la conception de la pièce à couler jusqu'à la réalisation des outillages.

Bibliographie

- [1] : Rob Thompson , « Les procédés de fabrication » [archive], sur Édition Vial, 26 septembre 2012.
- [2] : A,Passeron, «Tournage», Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997.
- [3] : Jean-Pierre cordebois et coll, « Fabrication Par Usinage», DUNOD, Paris 2003.
- [4] : Rocardier, « Cours sur le Tournage -Usinage Cours Technologie », 2011.
- [5] : <http://robert.cireddu.free.fr/>
- [6] : SANDVIK-COROMANT, « Perçage » 10 juil. 2001.
- [7] : Tome I, R.Butin ET M, Pinot « Fabrication Mécanique », Edition Foucher Paris.
- [8] : S, ADIMA, « technologie des fabrications mécaniques part II » 2015.
- [9] : Gilles Prod'Homme, « Commande Numérique des Machines-Outils», Technique de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, B 7130, pp.3, 1997.
- [10] : S, BENZAADA « COUPE DES METAUX ».
- [11] : http://www.usinage.wikibis.com/decoupage_laser.php
- [12] : Clément Codron, « Procédés de forgeage dans l'industrie ».
- [13] : Eustace C, Larke, trad. Bernard Bonnefoy, « Le Laminage des produits plats », Dunod, 1963.
- [14] : Louis Lamontagne, « Étude sur l'application de l'hydroformage ».
- [15] : Benoit pouliquen « PROJET P6-3INSA ROUEN 2011».
- [16] : G Soliman, « Principes généraux de l'étirage et du tréfilage », Paris, Gauthier-Villars.
- [17] : <https://www.rocdacier.com/cours-plier-toles/>
- [18] : Pierre CUENIN, « Techniques de l'ingénieur, Moulage – Noyautage », M3512, 1994.
- [19] : S.ADIMA, « Technologie des Fabrications Mécaniques part I ».
- [20] : lettre de l'ARAMM n° 6 - Le collage : une technique d'assemblage industrielle.
- [21] : Cours de technologie pratique, Collège technique de Montbéliard.
- [22] : Pierre CUENIN, Industrie de la fonderie, M 3 500, Techniques de l'ingénieur, 1994.
- [23] : Cours Professeur A. EL BARKANY«cours de fonderie».
- [24] : L. Giai-Brueri, fondamentaux, Dunod.
- [25] : Pierre CUENIN, Moulage – Noyautage, Techniques de l'ingénieur, M3512, 1994.
- [26] : Dr.S.BENZAADA fonderie et soudage.
- [27] : J. Boucher, Initiation à la fonderie, Dunod .