

Chapitre II

Procèdes d'obtention des pièces sans enlèvement de matière

SOMMAIRE

Introduction

1. Procédés de fabrication par déformation

2. Quelques définitions

2.1 Plasticité

2.2 Ductilité

2.3 Influence de la température

3. Procédé de forgeage

3.1 La Forge libre

3.2 La forge par estampage

3.3 La forge par matriçage

4 Le Laminage

5 Le Tréfilage

6. Travail des métaux en feuille

6.1 Cintrage

6.2 Le pliage

6.3 L'emboutissage

6.4 Le poinçonnage

6.5 La découpe par Oxycoupage ou Plasma

6.5.1 L'oxycoupage

6.5.2 La découpe plasma

7. Procèdes de fabrication par coulée (fusion)

7.1Le moulage

7.2 Moulage en sable

7.3 Moulage en coquille

8. Fabrication des pièces par la Métallurgie des poudres

Introduction

D'un point de vue industriel, les procédés de fabrication sans enlèvement de matière peuvent être classés en trois catégories :

- ❖ Procédés par déformation: laminage, tréfilage, forgeage, estampage, matriçage, travail des métaux en feuille (emboutissage, pliage, découpage etc.)
- ❖ Procédés par coulée (fusion) : moulage et fonderie.
- ❖ Procédés par assemblage: soudage (électrique, thermomécanique, etc.)

1. Procédés de fabrication par déformation

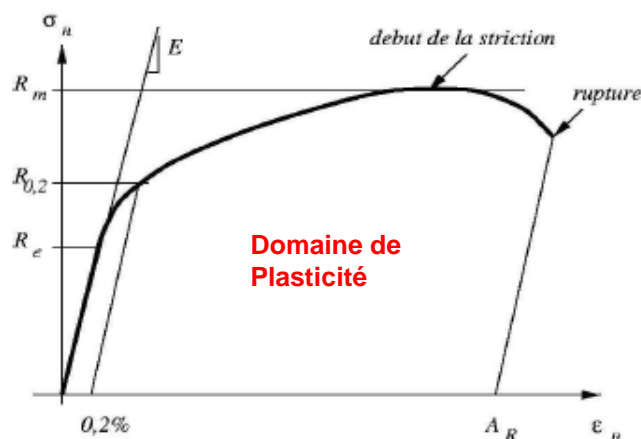
Historiquement, les procédés de fabrication par déformation autrement appelés procédés d'usinage sans enlèvement de la matière existent pour certains d'entre eux, depuis plusieurs siècles (exemple du forgeage) . En effet, ces procédés consistent à déformer plastiquement le matériau jusqu'à obtention de la forme désirée. Se sont les matériaux ductiles qui s'apprentent à se déformer plastiquement sans se rompre. Ces procédés peuvent avoir lieu à chaud ou à froid. Ils peuvent présenter de nombreux avantages, selon la fonction des pièces fabriquées.

2. Quelques définitions

2.1 Plasticité : c'est la tendance d'une matière à rester déformée après réduction de la contrainte déformante à une valeur inférieure ou égale à celle de son seuil d'écoulement.

Lors d'un essai de traction, le domaine de plasticité est caractérisé par :

- L'évolution des déformations en fonction des contraintes n'est plus linéaire;
- La déformation est permanente;
- La fin de la courbe est marquée par le phénomène de striction qui correspond à une déformation localisée.



Courbe de traction

2.2 Ductilité : elle désigne la capacité d'un matériau se déformer plastiquement sans se rompre. La ductilité d'un matériau se détermine par :

- Son allongement après rupture : $A = \left(\frac{L-L_0}{L_0} \right) 100 \%$
- Sa striction à la rupture : $Z = \left(\frac{S_0-S}{S_0} \right) 100 \%$

2.3 Influence de la température:

De manière générale, une augmentation de la température induit une diminution de la limite d'élasticité. Ce phénomène est souvent utilisé pour mettre en forme les matériaux, car il nécessite moins de contrainte (et donc moins d'effort sur le matériau) pour obtenir une déformation permanente.

3. Procédé de forgeage

Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur un morceau de métal, à froid ou à chaud, afin de la contraindre à épouser la forme voulue. Le forgeage implique un dispositif de frappe (marteau, masse, martinet ou marteau-pilon) et un support (enclume ou matrice). Le métal est appelé « Lopin » de volume calculé.

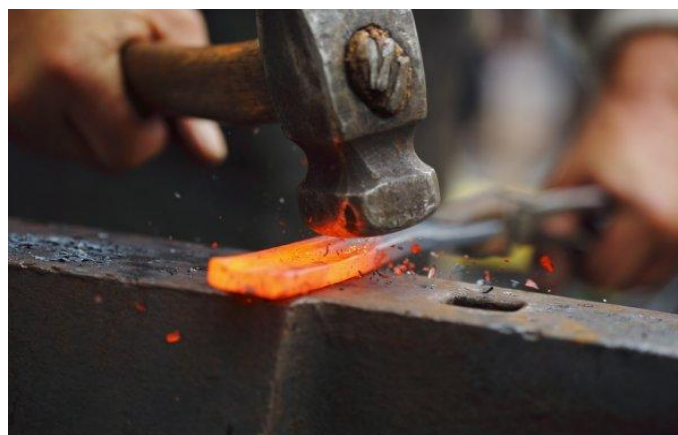
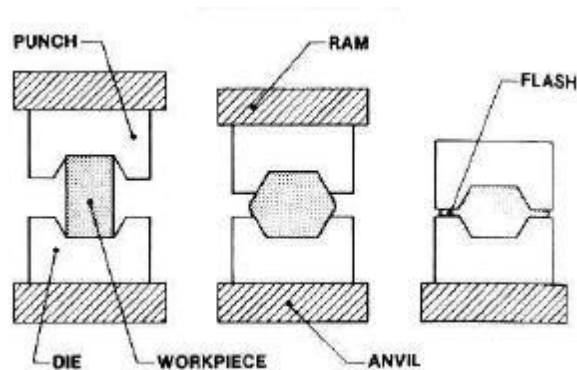


Figure 1. Forgeage manuel

Le forgeage manuel : C'est le forgeage traditionnel à l'enclume et l'outillage de frappé à main.

La forge regroupe plusieurs technologies de production :

3.1 La Forge libre.

En forge libre, la matière est déformée uniformément dans des directions sans friction. Elle permet d'obtenir à chaud, sans outillages spécifiques, avec des délais courts, des pièces unitaires ou de très petites séries et des pièces lourdes en utilisant des marteaux- pillons. En forgeage libre, une pièce solide est placée entre deux matrices plates et réduite en hauteur en la comprimant. On utilise de la force ou de l'impact de la pression pour déformer des pièces brutes métalliques entre matrices supérieure et inférieure. Sauf les directions supérieure et inférieure, le métal de la pièce brute peut s'écouler librement vers l'autre direction. La forme définitive de la pièce est obtenue par une succession de déformations progressives ne demandant qu'une faible dépense énergétique par unité de surface, à partir d'outils simples. La transformation est toujours exécutée à chaud.

3.2 La forge par estampage

La forge par estampage consiste à former des pièces en métaux et alliages ferreux, chauffées aux hautes températures par pression entre deux matrices portant en creux la forme exacte ou semi-finie du produit à réaliser. Ce procédé est utilisé exclusivement que lorsque le nombre de pièces à produire est assez élevé pour des raisons d'économie de coût de fabrication des matrices à hautes résistances. Elle permet d'obtenir une précision dimensionnelle plus grande qu'en forge libre.

3.3 La forge par matriçage

Contrairement à la forge par estampage, le matriçage est réservé uniquement pour les pièces en métaux et alliages non ferreux (aluminium, cuivre, titane, bronze), Dans ce procédé, le métal de base est généralement une barre de section ronde ou profilée, débitée par sciage pour avoir le volume de la pièce augmenté d'un excédent pour garantir le remplissage complet de la forme et créer une bavure qui sera éliminée par découpage. L'obtention de la pièce finale peut nécessiter plusieurs chocs entre les matrices (pilonnage). La déformation s'effectue par fluage du métal entre la matrice et le poinçon. Cette transformation de la matière par matriçage permet des déplacements très importants de métal, affine le grain métallurgique de départ, provoque un écrouissage, crée un fibrage linéaire favorable qui améliore les caractéristiques mécaniques de la pièce. La qualité de fibrage lui requiert des caractéristiques plus élevées pour des applications de pièces de sécurité.

Le matriçage à chaud permet d'obtenir des pièces dotées de bonnes caractéristiques mécaniques (la structure fibreuse est respectée), excellente résistance à la traction et à la rupture et d'une grande longévité, une meilleure homogénéité, excellente résistance à l'usure, excellente résistance à la corrosion, des surfaces lisses exemptes de porosité. Applications : secteurs de pointe tels que l'aéronautique et le spatial, nucléaire, ferroviaire et électrique.

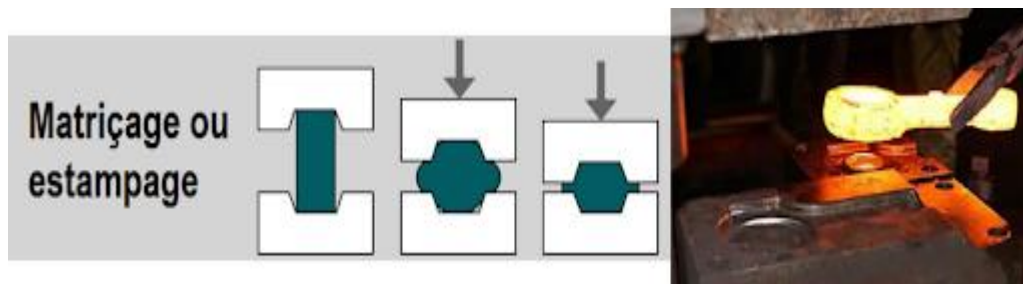


Figure 2. Matriçage ou Estampage

4. Le Laminage

Le laminage comme les autres procédés par déformation est basé sur la capacité des métaux de se transformer plastiquement sous l'action des forces extérieures. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres contrarotatifs appelés laminoir. Les outils travaillant le métal ont la forme de corps de révolution tournants, dans la plus part des cas des cylindres ou galets, le nombre de cylindres peut varier de deux à quatre et plus.

Le laminage permet non seulement d'obtenir la forme et les dimensions des profils lamines, mais aussi de changer la structure et les propriétés du métal, d'où amélioration des caractéristiques mécaniques et physiques des métaux. Ces opérations s'effectuent dans des laminoirs de tailles et de constructions différentes. Il permet également la production de barres profilées (produits longs), fil machine et des tôles, etc.

La figure 2 représente le procédé de laminage le plus simple ou le métal ne subit que l'effort fourni par les cylindres, caractérisé par un moment uniforme à l'entrée et à la sortie du foyer de déformation et où les cylindres ont mêmes vitesses et mêmes diamètres et les propriétés du métal sont homogènes suivant tout le volume.

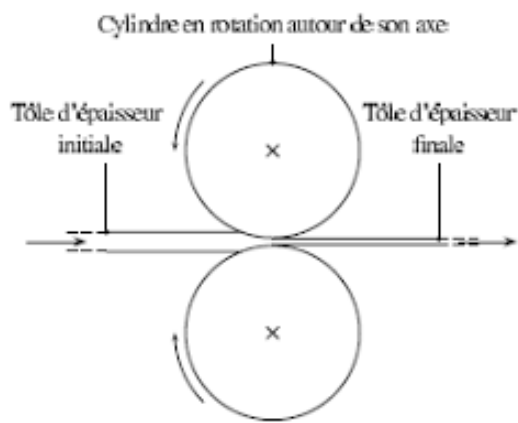


Figure 3. Laminoir simple et laminage à chaud

5. Le Tréfilage

Le tréfilage est un procédé utilisant la capacité à la déformation plastique à froid du matériau autrement dit, la tréfilabilité. En effet, il consiste à faire passer le fil (fil machine obtenu par laminage à chaud) à travers un orifice calibré, la filière, sous l'action d'une traction continue. Un lubrifiant savon de tréfilage généralement à base de stérâtes de calcium et de sodium est utilisé afin de pouvoir réaliser l'opération plusieurs fois de suite et à grande vitesse sous l'effet combiné d'application d'un effort de traction T et d'un effort radial de compression P . La machine de tréfilage est appelée tréfileuse.

La filière constitue l'élément fondamental de l'opération de tréfilage. Elle est généralement constituée d'un noyau dur A , généralement en carbure de tungstène ou en diamant, fretté dans une monture B en acier. Elle possède une géométrie spécifique, calculée en fonction du matériau du fil, de l'aspect de surface que l'on veut lui donner et de l'effort de tréfilage appliqué.

En général, les caractéristiques mécaniques des fils tréfilés à savoir : la résistance traction (R_m) et la limite élastique (R_e ou $R_{p0.2}$), la dureté, augmentent au fur et à mesure des passages dans la filière, le fil diminue de section à cause du phénomène d'écrouissage, contrairement à celles de ductilité (allongement, torsion, etc.).

Les produits issus de tréfilage tels que les fils tréfilés et câbles sont utilisés dans diverses industries: construction (ponts), ouvrages d'art, bâtiment, ressorts industriels, câbles de manutention et de transport, industrie automobile (pneumatique...etc.)

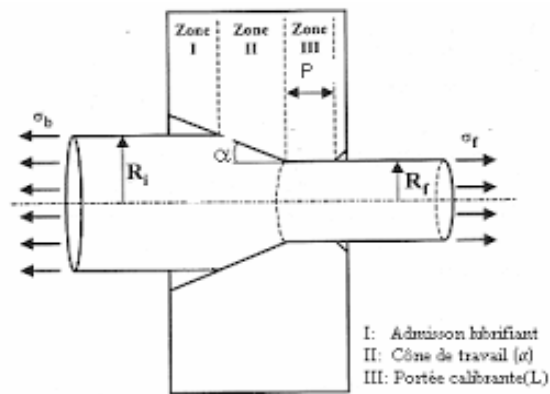


Figure 4. Tréfileuse et filière de tréfilage en carbure de tungstène

6. Travail des métaux en feuille

6.1 Le Cintrage :

Le cintrage est un procédé mécanique de déformation d'une pièce métallique (dans notre cas une tôle) avec une cintreuse, suivant un rayon de cintrage et un angle. Il s'agit d'un processus de transformation effectué exclusivement à froid du métal, pratiqué au moyen de pression exercée par le moule et utilisée pour obtenir certaines formes spécifiques.

Le cintrage (roulage) consiste à cintrer une tôle plane. On déforme une feuille de métal pour arriver à une pièce de révolution conique ou cylindrique. Ceci est réalisé par des outils qui sont des cylindres comportant le même profil que la pièce à déformer en nombre et en disposition variés autour de la pièce.

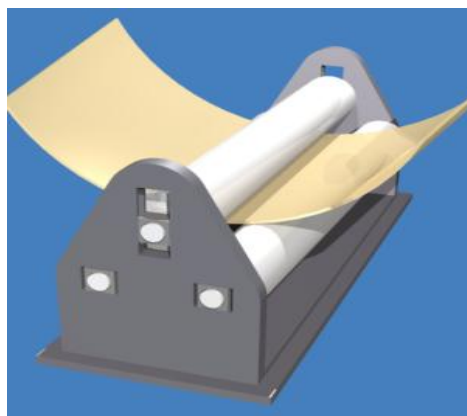


Figure 5. Cintrage de la tôle

6.2 Le pliage

Le pliage est un procédé de mise en forme sans enlèvement de matière, permettant de fléchir des tôles par un poinçon dans une matrice. C'est un cintrage de très faible rayon obtenu par un effort de flexion localisé

Le pliage est une déformation obtenue grâce à une force appliquée sur la longueur de la pièce. Celle-ci sera en appui sur deux lignes d'appuis et s'apparente à la flexion. Il faudra dépasser la limite élastique pour obtenir l'angle voulu. Il existe plusieurs modes de déformations dont on peut citer : pliage en V, pliage par encastrement, le pliage par cambrage en U , etc.

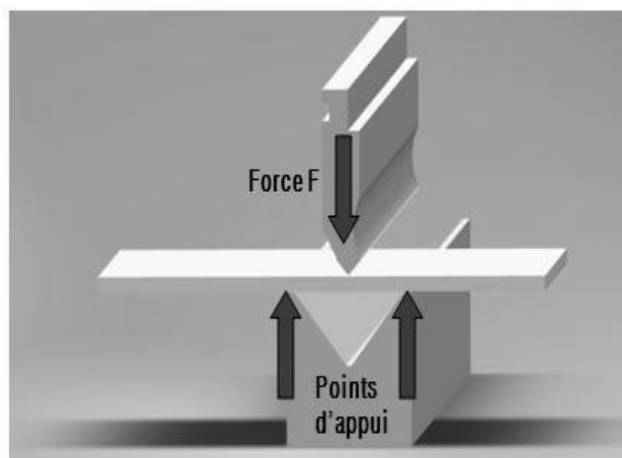


Figure 6. pliage avec matrice et poinçon

6.3 L'Emboutissage

Un processus de déformation à froid qui permet de réaliser des composants métalliques tels que les cylindres, les calottes hémisphériques ou les produits finis tels que les poêles ou autres conteneurs. Le processus d'emboutissage des métaux en tôle commence par la conception et la production du moule, spécifique à la forme que vous souhaitez réaliser.

Ensuite, la tôle est faite passer entre le poinçon et le moule, et soumise à la force de déformation des presses à emboutir hydrauliques : de cette façon, nous obtenons la forme demandée, sans la production de plis sur le matériau. La tôle appelée « flan », est la matière brute qui n'a pas encore été emboutie. L'opération peut être réalisée avec ou sans serre flan pour maintenir le flan contre la matrice pendant que le poinçon déforme la feuille.

6.4 Le poinçonnage

Le poinçonnage consiste à perforer un matériau par cisailage grâce à un poinçon et une matrice. La tôle est placée entre le poinçon et la matrice. Le poinçon descend dans la matrice en perçant la tôle par compression. Le poinçonnage permet donc d'effectuer des trous de formes complexes, en fonction de la forme de poinçon choisi. On distingue trois méthodes de poinçonnage :

- le poinçonnage classique qui consiste à enlever de matière par réalisation de trous.
- le grignotage qui consiste à découper un contour par de multiples coups de poinçon.
- le découpage à la presse qui consiste à découper des flans en utilisant des outils spéciaux.

Aujourd'hui, le poinçonnage de la tôle est effectué à l'aide de machines automatiques à commande numérique en utilisant des poinçons et des matrices de formes standards ou spéciales en fonction du design final à obtenir. Avec cette technique on obtient des **tôles** perforées parfaitement selon le projet.

6.5 La découpe par Oxycoupage ou Plasma

6.5.1 L'oxycoupage est une méthode de découpe des métaux qui propulse un jet d'oxygène (d'où le nom « oxy ») sur un métal amené à son point de fusion. Il est important de préciser que la découpe est effectuée par oxydation et non pas grâce à la force du jet.

L'oxycoupage peut être utilisé pour des opérations de coupe ou de chanfreinage de pièces en aciers alliés ou faiblement alliés variant d'une épaisseur de 3 à 1 500 mm. La déformation de la matière peut être importante aux endroits de la coupe posant des difficultés lors du traitement de surface ou de la soudure. Le coût du matériel peu élevé et coupe rapide.

Parmi ses inconvénients: Uniquement pour l'acier qui contient plus de 1.9% de carbone.

Impossible de souder les pièces oxycoupées sans d'abord usiner la croûte oxydée.

6.5.2 La découpe plasma est une opération de coupage par fusion localisée. C'est la température (15000°C à 25000°C) et la concentration du jet de plasma qui permet de fusionner la matière afin de la couper et l'évacuer. Le jet de plasma est un mélange de gaz plasmagènes, comme l'air comprimé, et d'un arc électrique, qui se crée entre l'électrode située dans la torche et la pièce à découper.

La découpe plasma permet de découper tous les matériaux conducteurs d'électricité, notamment les aciers inoxydables sur toutes épaisseurs jusqu'à 130 mm. La précision des machines plasma peut atteindre +/- 0,1 mm. On distingue plusieurs types de découpe plasma en fonction des gaz plasmagènes utilisés:

- torches à écoulement laminaire : l'électrode est en tungstène, et les gaz sont des mélanges d'argon et d'hydrogène ou d'azote.

- torches à écoulement en vortex : Une électrode plate avec un insert en zirconium. Le gaz utilisé est l'air.

Avantages: vitesse de coupe élevée, faible dépouille et pas de bavures et possibilité de souder directement après la découpe.

Inconvénients: Précision de coupe moyenne. nécessité de travailler dans un endroit aéré.

Enfin, certains constructeurs proposent des machines qui disposent d'une ou plusieurs torches plasma et d'oxycoupage, offrant ainsi la polyvalence des deux technologies.

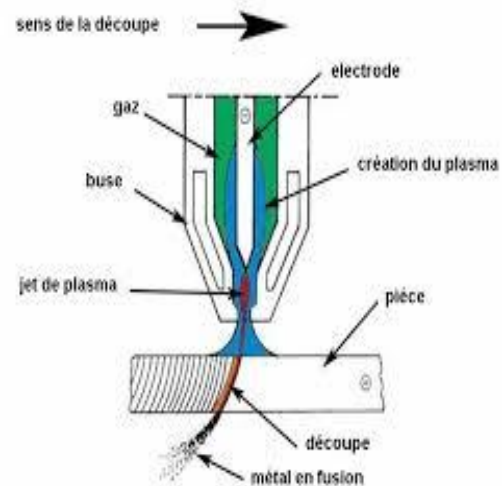


Figure 7. Oxycoupage et découpe plasma

7. Procèdes de fabrication par coulée (fusion)

7.1 Le moulage

Le moulage est un procédé qui consiste à réaliser des pièces brutes par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à obtenir). Le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule (Fig.8)

Il existe différents procédés de moulage en sable des pièces en acier (ou en fonte) : le moulage en sable à vert, le moulage à prise chimique à froid et le moulage à prise chimique à chaud. Ces différents procédés de moulage en sable ont chacun leurs avantages et limitations respectifs.

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

- Le 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.

- Le 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.

Le choix des procédés de moulage dépend du métal à couler.

En général la température de fusion du métal coulé doit être inférieure à la température de fusion du matériau constituant le moule.

7.2 Moulage en sable

Le moulage en sable consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir. Le moulage en sable est le procédé le plus ancien et convient presque pour tous les métaux et alliages de moulage. Il s'adapte bien aux petites séries de production et surtout pour les pièces de grandes dimensions.

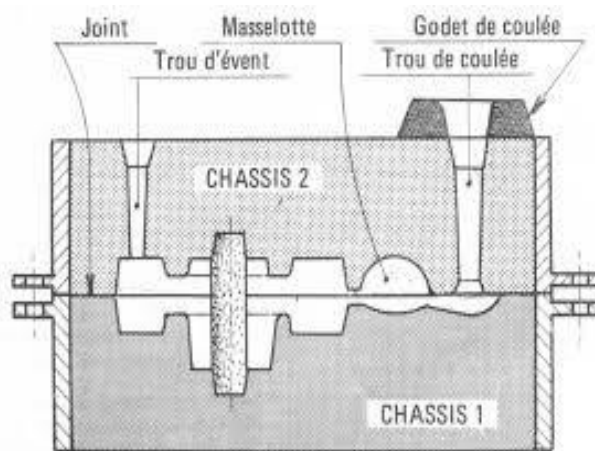


Figure 8. Moulage en sable

7.3 Moulage en coquille

Le moulage en coquille est un procédé qui permet de couler par gravité le métal en fusion directement dans un moule métallique en fonte ou en acier appelé coquille. Ce type de moulage est destiné pour la réalisation de pièces compliquées en métaux et alliages ferreux (fonte grise et acier) et alliages non ferreux à point de fusion relativement bas, bronzes

(10 à 13 % Zinc), Al-Si possédant de bonnes propriétés de fonderie, Al-Si-Cu, Al-Cu (4 à 12 % Cu).

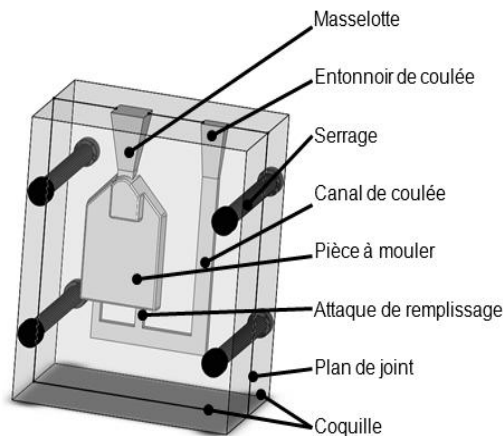


Figure 9. Moulage en coquille par gravité

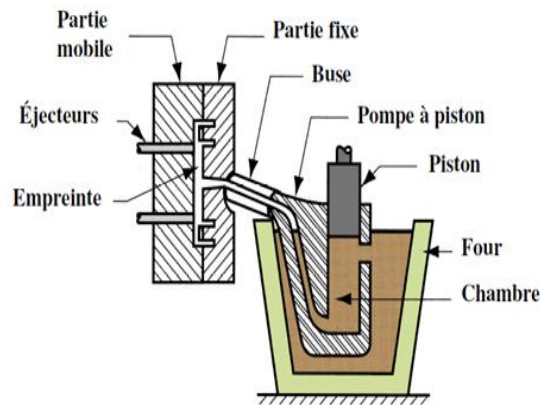


Figure 10. Moulage en coquille sous pression

8. Fabrication des pièces par la métallurgie des poudres (Mdp)

Contrairement aux procédés de la métallurgie classique, qui font toujours intervenir la solidification d'un métal fondu, la métallurgie des poudres part d'une poudre métallique et utilise un procédé de consolidation appelé frittage. Celui-ci peut être défini comme une réaction entre particules d'une masse de poudre qui entraîne la formation d'un solide continu cohérent. En effet, le frittage consiste à chauffer le comprimé à une température telle que les grains de poudre se soudent entre eux par des déplacements d'atomes à l'état solide, ou par une sorte de brasure lorsqu'il existe une certaine quantité de liquide dans le comprimé au cours de l'opération. Il peut être réalisé avec ou sans liant, sur des matériaux très divers.

Dans les fabrications qui sont les plus importantes en tonnage, la filière comprend trois opérations essentielles :

- l'élaboration de poudres métalliques compressibles ; les poudres peuvent être des métaux purs ou des alliages, elles peuvent être mélangées entre elles ou à d'autres poudres, des non-métaux ou des composés métalliques tels que les oxydes ou les carbures ; le mélange comprend, en outre, une faible proportion d'une poudre d'un lubrifiant solide ;

- la compression à froid de la poudre dans des outillages qui donne une pièce agglomérée, manipulable, de forme et de dimensions précises ; la pression uniaxiale est comprise entre 200 et 800 MPa ;
- le frittage qui consiste à chauffer les comprimés à une température élevée mais nettement inférieure à la température de fusion du métal pur ou de l'alliage obtenu ; une atmosphère contrôlée et réductrice est nécessaire dans la plupart des cas.

Dans cette filière, la forme et les dimensions des pièces ne varient que très peu et le matériau final a donc une porosité résiduelle non négligeable. Exceptionnellement, au cours du frittage, un retrait dimensionnel peut conduire à une porosité nulle.

Principaux marchés :

- pièces mécaniques (automobile, réacteur, horlogerie, armement, électro portatif,...) ;
- autolubrifiants ;
- freinage ;
- composants électriques (connectiques, composants magnétiques) ;
- médical (prothèses, embout d'agapheuse, bracket) ;
- aciers à outillages ;
- pièces de filtration ;
- combustible nucléaire.

Schéma de principe de fabrication

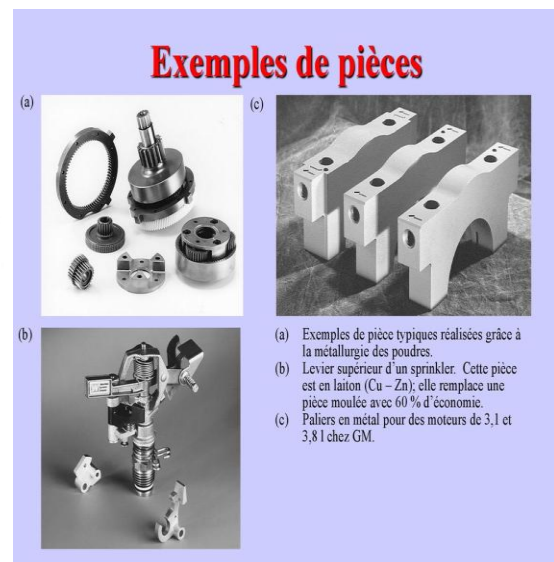
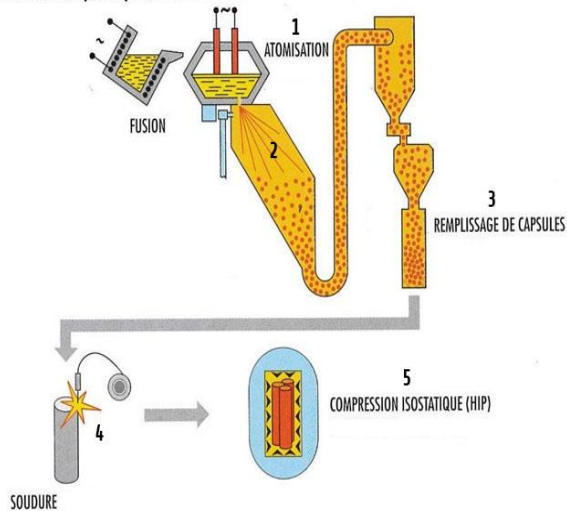


Figure 11. Métallurgie des poudres principe de fabrication
Et exemple de pièces fabriquées par (Mdp)