

COURS PROCEDES DE MISE EN FORME DES MATERIAUX

Master LMD 2^{ème} année
Construction Mécanique

Dr. BOUTEGHMES Djamel



Année universitaire
2020-2021

MODULE : PROCEDES DE MISE EN FORME DES MATERIAUX MASTER 1

FABRICATION MECANIQUE

La définition compète d'un organe de machine exige la détermination de sa forme, de ses dimensions et de sa matière.

Il est indispensable pour étudier et comprendre un matériau de le caractériser (identifier) à l'aide de techniques de caractérisation appropriées. Soit destructive c'est-à-dire endommageant (détérioration) le matériau. Soit non destructive qui n'endommage pas le matériau.

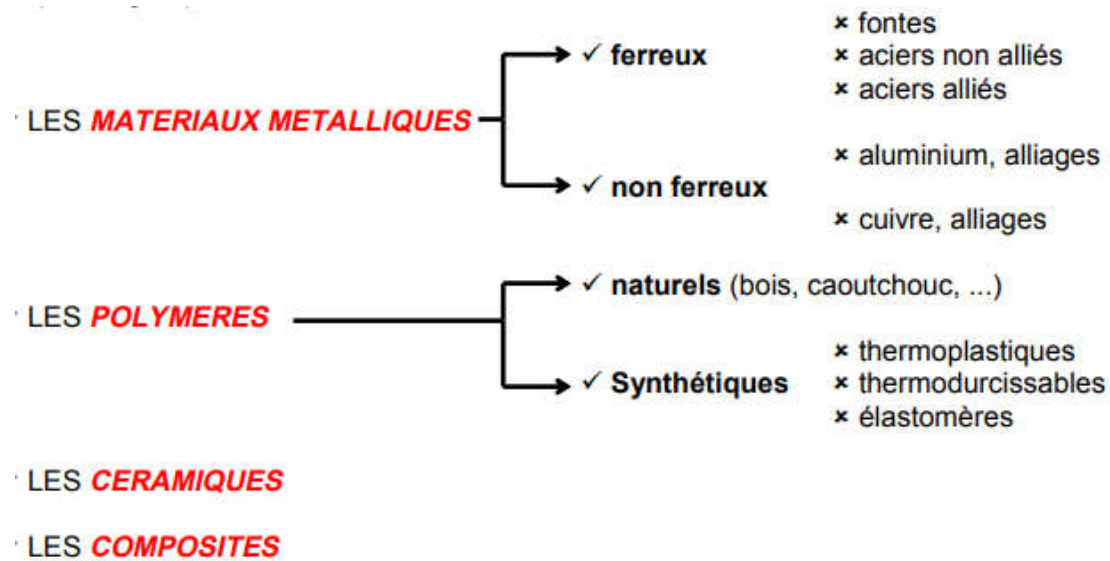
I. Les principales techniques de caractérisation peuvent se classer par :

- ✓ **Les essais mécanique destructives** : Dont le but est de caractériser les comportements mécaniques des matériaux tel que : Le module de Young, la résilience, la limite élastique, la dureté etc.....
- ✓ **Les essais non destructives** qui permettent de caractériser le matériau sans le dégrader par :
 - Les analyses physico-chimique par des méthodes tel que la métallographie, diffraction par rayons x etc.....
 - Une analyse de la chimie et de la structure du matériau ce qui est intéressant de corrélér avec les propriétés mécaniques et la résistance a la corrosion.
 - Ces essais sont utilisés pour les matériaux couteux, peu disponible

II. Le choix d'un matériau dépend de plusieurs critères :

- ✓ **Caractéristiques mécaniques** : limite élastique, masse, dureté, résilience...
- ✓ **Caractéristiques physico-chimiques** : comportement à la corrosion, vieillissement... Caractéristiques de mise en œuvre : usinabilité, soudabilité, trempabilité...
- ✓ **Caractéristiques économiques** : prix, disponibilité, expérience industrielle...

✓ On peut regrouper les matériaux en familles :



/87

III. Mise en forme des matériaux

Les techniques de **mise en forme des matériaux** ont pour objectif de donner une forme déterminée au **matériau** tout en lui imposant une certaine **microstructure**, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées. C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement **les paramètres expérimentaux** (composition du matériau, température, pression, vitesse de refroidissement, etc.). Les techniques diffèrent selon les matériaux (leur solidité, l'usage, etc.).

Les performances mécaniques des pièces de structures dépendent fortement du matériau et de son procédé de transformation. La mise en forme des alliages métalliques s'intéresse aux matériaux lors de la transformation par déformation plastique (état solide), solidification (état liquide) ou compactage (poudre) dans tous les grands secteurs industriels : industrie du transport (ferroviaire, automobile, aéronautique), de l'emballage, de l'énergie nucléaire et de la santé.

De manière générale, la mise en forme des matériaux en métallurgie tient au **découpage**, formage, **soudage**, perçage et **usinage**. S'ajoutent à cela différents traitements (**traitement thermique**...) visant à donner aux produits des propriétés particulières.

Pour les **métaux**, les techniques de mise en forme sont :

- Le **forgeage** : c'est la technique de mise en œuvre la plus ancienne (5 000 ans av. J.-C.), elle consiste à exercer une force sur la matière afin de la former et regroupe aujourd'hui plusieurs méthodes telles que :

L'emboutissage, **Le laminage**, **Le tréfilage**, **Le filage**

La fonderie : cette technique consiste à fondre et à couler le métal dans un **moule**. Le choix du moule est un critère à prendre en compte. Il existe ainsi plusieurs

méthodes de **moulage** : **moulage sable, moulage coquille et moulage en cire perdue** ;

- **le frittage** : ce procédé fait appel à la **métallurgie des poudres**. Il permet de consolider la poudre sous l'action de la chaleur et la rend ainsi compacte.

III.1.Procédés par Formage

Le formage est un **procédé de fabrication** de pièces qui consiste à donner une forme à un sous-produit.

III.1.1.Différentes techniques permettant le formage :

III.1.1.2.formage à chaud:

- [forgeage](#), [estampage](#), [matricage](#), [emboutissage](#), **chaud de retrait**, etc.
- **formage à froid:**
- [pliage](#), [emboutissage](#), [forgeage à froid](#), [extrusion](#), [frappe à froid](#), [tréfilage](#), [étirage](#) , [cintrage-roulage](#) par exemple en [chaudronnerie](#)), [martelage](#), etc..
- [Magnétoformage](#)
 - a) Pour la mise en forme à chaud de structure massives (filage, laminage, estampage ou forgeage libre.
 - ✓ **les principaux paramètres influents sont :**
 - 1. Température
 - 2. Matériaux et ses caractéristiques
 - 3. Géométrie des outils
 - 4. Vitesse et pression de frappe
 - b) La mise en forme sans enlèvement de la matière et parmi lesquelles on peut citer :
 - Le formage à chaud et à froid
 - La fonderie
 - Le frittage

- **Procédés formage à chaud:**

Forgeage, estampage, matricage, emboutissage

A) Forgeage

Consiste à déformer, par choc ou par pressage entre deux outils, une masse métallique rendue malléable par chauffage. Aussi, par définition, le forgeage est un procédé de mise en forme des métaux par déformations plastiques à chaud ou à froid. On chauffe le métal (fours) à une température convenable afin que le métal devient malléable et forgeable. Le métal est appelé « Lopin » de volume calculé.

Dans le forgeage ordinaire, dit libre, le métal comprimé s'écoule latéralement à l'effort sans aucune retenue.

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

C) Estampage, matriçage

Le matriçage et l'estampage : Le matriçage et l'estampage sont deux termes synonymes. C'est un procédé de fabrication mécanique exécuté par les presses sur lesquelles sont fixées des « matrices ». Il permet de produire des grandes séries de pièces. Pour le matriçage la matière de départ les barres sont rondes ou carrées rarement méplates de section constante obtenues au moyen de laminoirs.

✓ **Estampage**

L'estampage est un forgeage en matrice. Il faut entendre par là que la déformation du métal est gênée par les parois d'une cavité creuse dans des outils particuliers nommées : matrices.

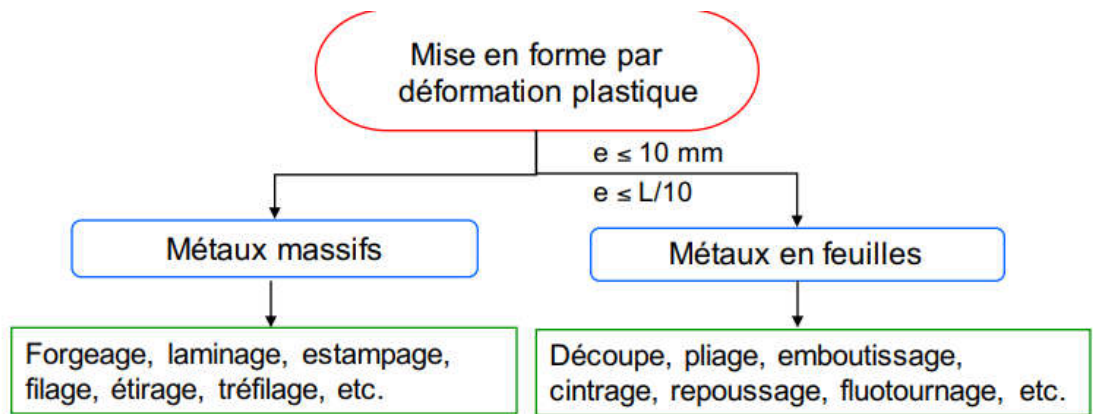
Le métal emprisonné entre les deux matrices qui se rapprochent l'une de l'autre subit de leurs part une contrainte qui l'oblige à s'écouler latéralement, mais l'écoulement latérale est freiné par le passage de la matière entre les faces des matrices à la sortie de la gravure.

Il se développe une pression de caractère pseudo-hydrostatique au sein du métal qui le contraint d'épouser la forme des gravures et de remplir la cavité. La partie du métal qui s'échappe hors de la gravure se nomme bavure.

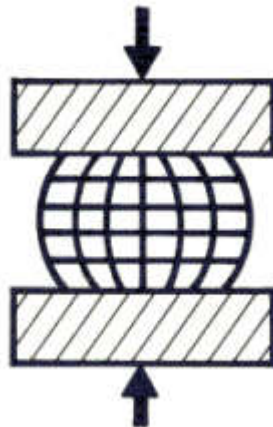
IV. Mise en forme par déformation plastique :

Procédés utilisant l'aptitude du matériau à la déformation plastique (encore appelée ductilité). La capacité de déformation est une fonction de :

- Matériau (rhéologie)
- Procédé (mode d'application des contraintes)
- Conditions opératoires (tribologie, température, vitesse)



IV.1. Forgeage libre : La matière d'œuvre est comprimée suivant une direction et se déplace librement suivant les deux autres. Le forgeage libre s'apparente au martelage des forgerons.



Température de forgeage :

Alliage ferreux $1\ 100 < T\ ^\circ\text{C} < 1\ 300$

Alliage d'aluminium $450 < T\ ^\circ\text{C} < 550$

Alliages cuivreux $750 < T\ ^\circ\text{C} < 900$

Forgeage libre

✓ **Moyens :**

IV.2. Forgeage mécanique :

Engins travaillant par pression ($V \leq 1\ \text{m/s}$) : **Presse hydraulique**

Engins travaillant par choc ($V \geq 6\ \text{m/s}$) : **Marteau-pilon, mouton**

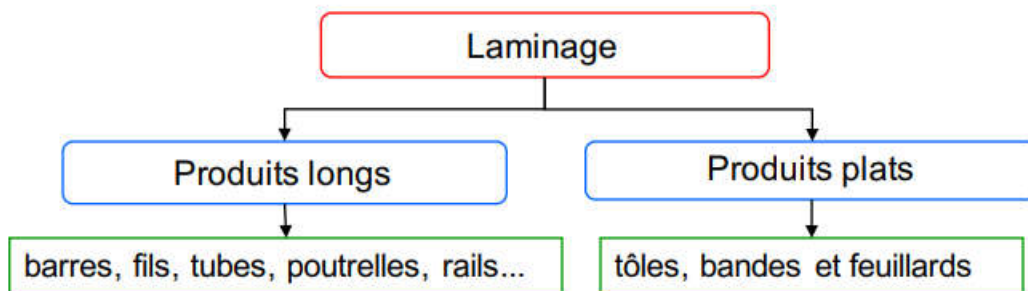
Forgeage libre

– **Moyens** : Marteau-pilon :

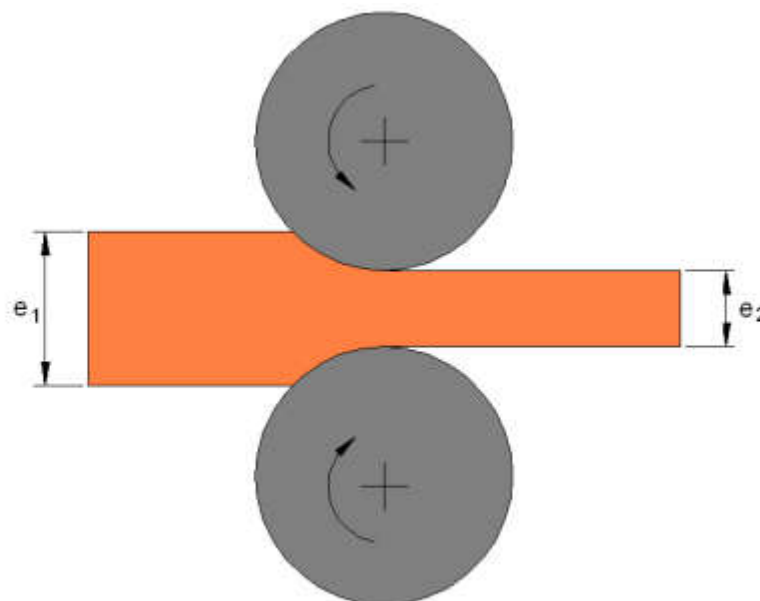
✓ **Méthodes de forgeage libre** :

Etamage : Calibrage de la section à l'aide de deux étampes reproduisant chacune la demi-forme de la pièce

IV.3. Laminage conventionnel



Opération de mise en forme par déformation plastique, destinée à réduire la section d'un produit de grande longueur, par passage entre deux ou plusieurs outils axisymétriques tournant autour de leur axe ; c'est la rotation des outils qui entraîne le produit dans l'emprise par l'intermédiaire du frottement.

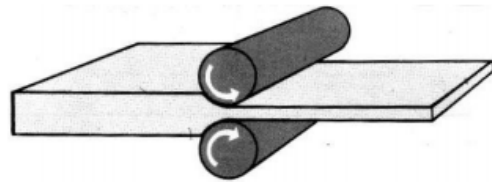
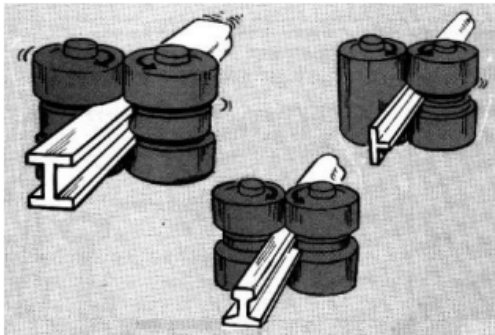


✓ **Laminage**

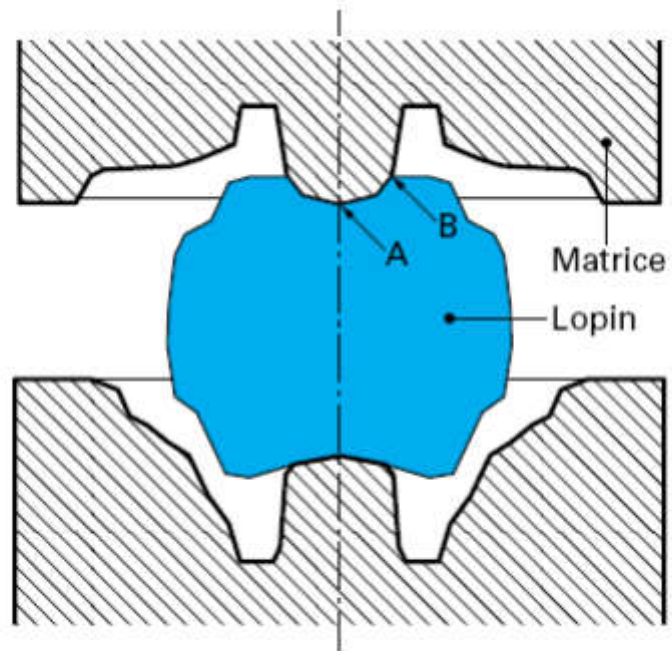
C'est un procédé de réduction de l'épaisseur ou de changement de la section transversale d'une pièce par l'application de forces de compression à l'aide de jeux de rouleaux. Les produits fabriqués par ce procédé sont les plaques, les tôles et les feuilles.

Les plaques ou tôles épaisse sont généralement d'épaisseurs supérieures à 6 mm ou 10mm. Elles sont utilisées pour des applications structurales telles que les coques de navire ou des structures de semi remorques.

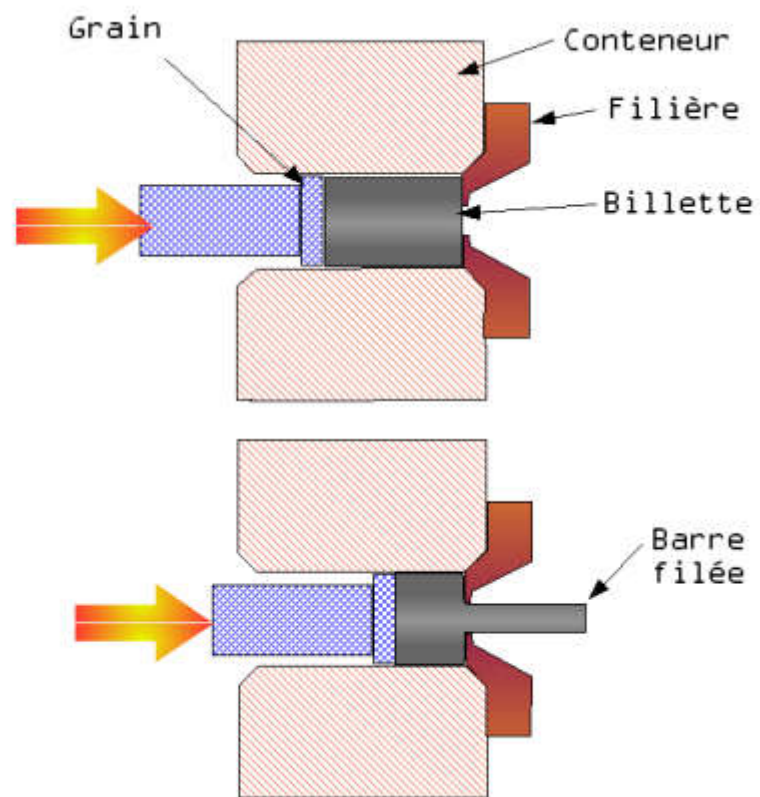
Les tôles sont généralement de moins de 6mm et plus de 0,15mm. Elles sont utilisées pour les revêtements de bâtiments, les carrosseries d'automobiles, structures d'avion, produits d'emballages, cannettes, produits de cuisine. Les feuilles d'aluminium utilisées pour l'emballage des aliments, des produits pharmaceutiques etc..... Elles ont une épaisseur inférieure à 0,15mm.



IV.4. Estampage : Le lopin, préalablement chauffé, est comprimé entre deux blocs (cas le plus fréquent) comportant des gravures (matrices).



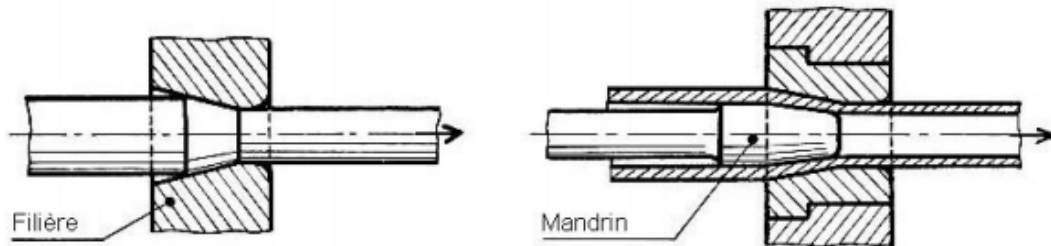
Filage: Au moyen d'une compression ou d'un choc, le lopin est passé dans une filière qui lui donne sa forme.



IV.5. Le filage direct

Filage: Le filage s'effectue à froid pour les métaux les plus malléables (Al par exemple) à chaud pour les autres.

IV.6. Etirage : L'ébauche est soumise à une traction longitudinale et passe à travers une filière qui provoque une réduction de la section.



IV.7. Emboutissage

Emboutissage : permet d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle mince, un objet dont la forme est non développable. L'emboutissage est un procédé de mise en forme des matériaux métalliques en feuilles minces. Cela consiste à donner une dimension spatiale à une feuille métallique initialement plane. Elle peut se présenter sous la forme de bande ou d'un flan.

Ce procédé permet d'obtenir des pièces de formes complexes, le plus souvent non développables, ce qui est à opposer au procédé tel que le pliage ou le roulage. L'emboutissage permet de fabriquer, entre autres, des pièces pour l'automobile, pour les appareils électroménagers, etc.

L'emboutissage peut se diviser en deux : est un procédé de formage par déformation plastique à chaud (emboutissage à chaud pour lequel la tôle est portée à la température de forgeage, (800 à 850 °C pour L'acier doux) ou à froid (pratiqué à la température ambiante) des métaux.

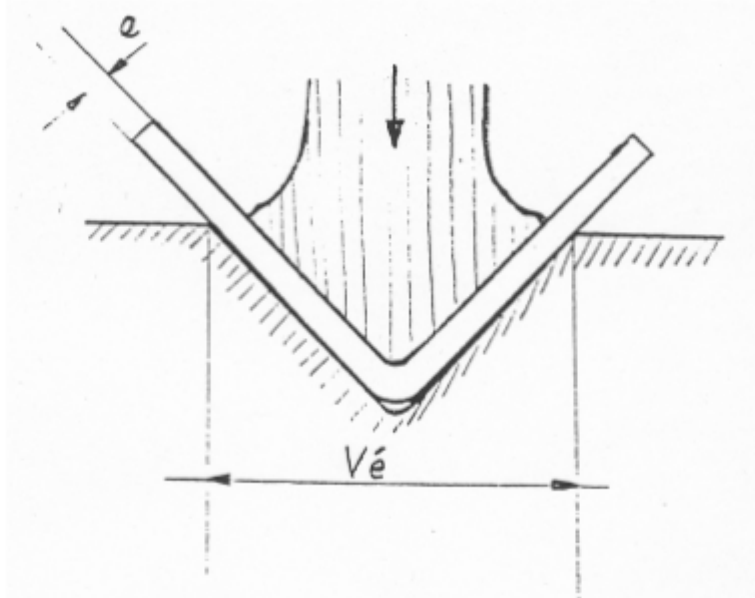
Il est largement employé dans plusieurs domaines industriels : l'automobile, l'aéronautique, l'électroménager, appareillages électriques...etc. Il permet de fabriquer à partir d'une feuille de métal initialement plane, appelée "flan", des pièces de forme complexe non développables.

IV.8. Pliage

Le pliage est une opération de mise en forme par déformation permanente de tôles. Cette opération est effectuée à froid, elle consiste à donner la forme désirée à des tôles planes dont l'épaisseur dépasse rarement 6mm.

Pour atteindre la déformation plastique des matériaux il que les contraintes dépassent la limite élastique pour que la déformation reste permanente. Effort nécessaire à l'obtention du pli dépend :

- De la limite élastique du matériau constituant les tôles.
- De l'épaisseur de la tôle et de la longueur du pli.
- De la direction du pli.



V. La fonderie :

Définition

La fonderie est un procédé de fabrication qui permet de réaliser des pièces par coulée du métal en fusion dans un moule.

✓ **Avantage :**

- Fabrication de pièces de formes compliquées qu'il serait difficile ou impossible de réaliser par tout autre procédé,
- Production à des prix de revient plus intéressants de pièces plus simples,
- Couler des alliages difficilement usinables.

Exemple de pièces obtenues par fonderie :

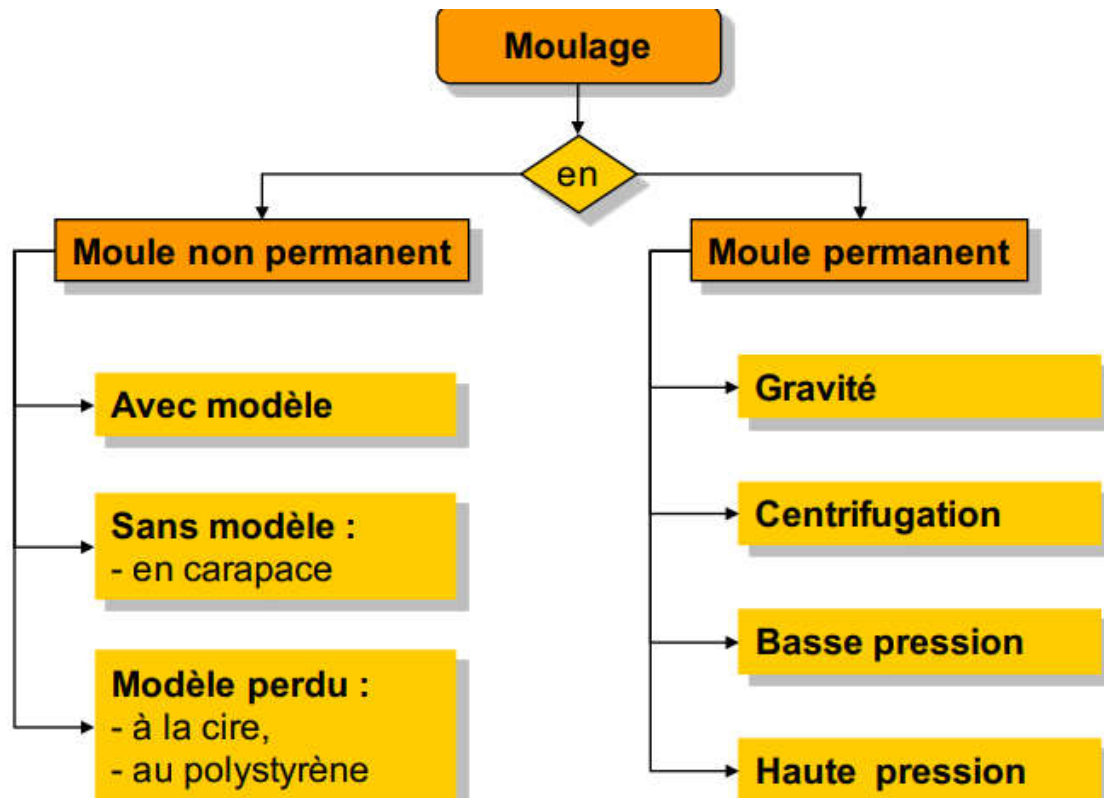


Collecteur d'échappement en fonte GS brute de coulée (doc. SBFM)

Lors de l'opération de fonderie, le fondeur n'a aucune influence sur les facteurs liés au matériau (nature, composition), par contre il doit intervenir sur les facteurs liés :

- **à la coulée** : température du métal en fusion, vitesse de remplissage du moule ;
- **au moule** : température du moule, conductibilité thermique, nature du moule et qualité de ses parois, mode d'alimentation du métal en fusion, mode de refroidissement du moule ;
- **à la pièce obtenue** : formes, épaisseurs, poids.

V.1. Procédés de moulage :



V.1 .1.Moulage au sable:

Utilisation

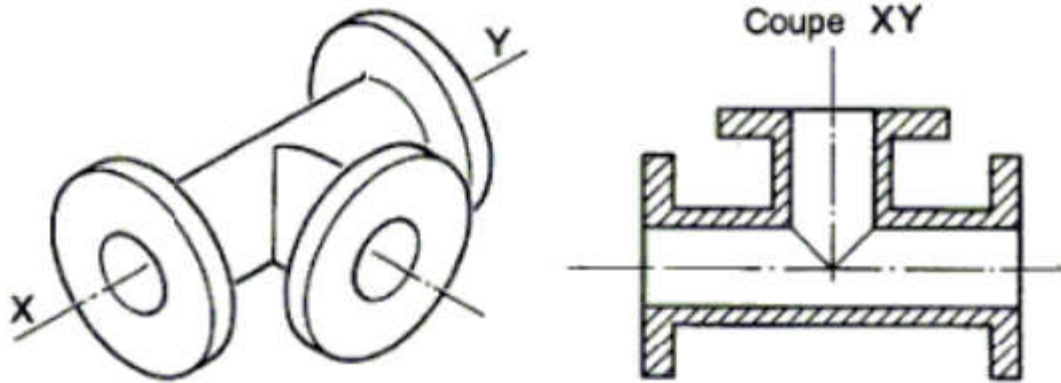
- Le plus couramment employé
- Moulage de grosses pièces unitaires
- Moulage de petites et moyennes pièces en série
- Il est utilisé pour le moulage des pièces en fonte, acier et métaux non ferreux.

Moule : en sable lié avec de l'argile et de l'eau

- ✓ **Modèle :**
 - Avec ou sans modèle
 - Modèle bois, en plâtre ou métallique
 - Dimensions égale dimensions de la pièce + retrait + dépouille

V.1.2. Moulage au sable

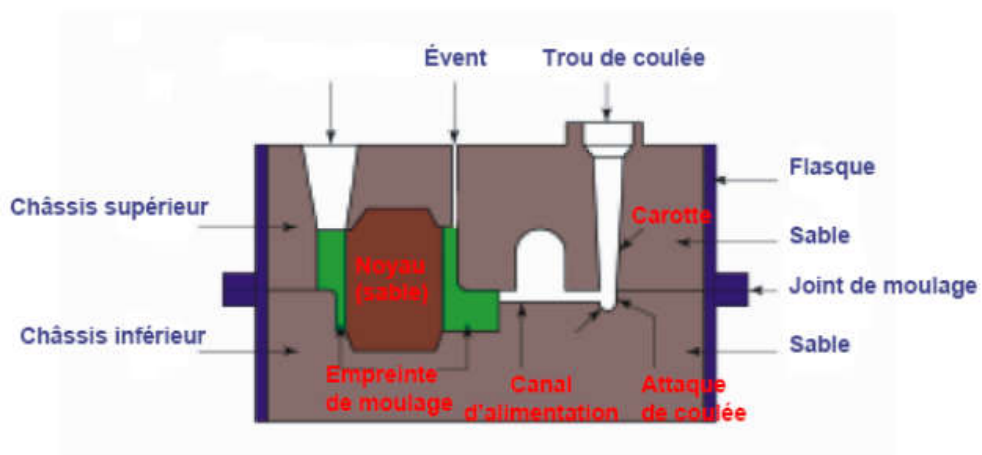
- **Principe :** Exemple : Moulage manuelle sur modèle



Tuyauterie

Moulage au sable

Principe de base



A) Propriétés souhaitées pour le moule

- Elaboration des métaux
- Fonderie
- Mise en forme par enlèvement de matière
- Mise en forme par déformation plastique
 - Techniques d'assemblages : Soudage
- Traitements et revêtement superficiels

- Rigidité
 - pour conserver la forme de l’empreinte et pour résister à l’érosion
- Perméabilité
 - pour permettre à l’air chaud et aux gaz de filtrer au travers du sable
- Stabilité thermique
 - pour éviter la formation de fissure au contact du métal chaud
- Plasticité
 - pour restituer la forme du model

V .1.3. Moulage en carapace : Ce procédé utilise :

- des sables mélangés avec des résines thermodurcissables polymérisant
- Une plaque modèle maintenue en température pour que le sable fasse prise sur une certaine épaisseur.

A) Moulage en carapace :

✓ **Avantage :**

- On peut obtenir des pièces précises,
- de masses importantes : de quelques grammes à +100 kg - Précision qui autorise la réduction des surépaisseurs d’usinage et l’obtention de détails de forme, lamages, trous de diamètre ...
- Faibles dépouilles (cylindres avec ailettes en fonte pour moteurs à refroidissement à air).
- Pièces compactes, sans crique, d’un bel état de surface, avec des contours nets et des arêtes vives.
- On peut utiliser tous les alliages, surtout ceux difficilement coulables en moules métalliques, en raison de leur température de coulée (alliages ferreux, cuivreux...).

B) Moulage en carapace :

✓ **Inconvénients :**

- Haute teneur en résine
- Provoquer des dégagements gazeux générateurs de piqûres ou de soufflures.
- Coûts relativement importants : Sable, 1 kg pour 20 à 25 kg de pièces, Outillage obligatoirement métalliques.

V.1.4. Moulage à modèles perdus :

- Utilisent des modèles en matière fusible : polystyrène, cire, etc. § Les modèles en polystyrène sont éliminés pendant la coulée
- Les modèles en cire sont éliminés par chauffage du moule.
- ✓ **Moulage à modèles perdus en polystyrène :** Utilisé pour la fabrication:
 - des grosses pièces unitaires (outils d’emboutissage par) des pièces de grandes séries en aluminium, en fonte et en acier

✓ **Les avantages sont nombreux :**

- Précision des pièces :
- pas ou très peu de dépouille (0,5° à 1°)
- pas de joint de moulage (donc pas de risque de déport)
- Réduction des prix de revient, qui peut atteindre 15 à 20 %, due à la suppression du noyautage, à la simplification des opérations de moulage, de décochage et d'ébarbage (pratiquement pas de bavures à meuler, sauf les traces d'attaques de coulée)
- Investissements modérés.

V.1.5. Moulage à modèles perdus en polystyrène :

✓ **Les inconvénients :**

- une mise au point assez longue (au moment du lancement d'une nouvelle pièce) ;
- des difficultés pour le collage et des risques de déformation des modèles au moment des manutentions, du remplissage et du compactage du sable dans le conteneur ;
- l'obligation de fabriquer des modèles en polystyrène en grande quantité pour les fabrications de série ;
- La qualité finale des pièces étant très largement fonction de celle des modèles, (contrôle du modèle pour pouvoir produire des pièces de qualité)

V.1.6. Moulage à modèles perdus - Moulage à la cire perdue :

Principe:

On confectionne un modèle en cire pour le recouvrir ensuite d'un enduit en céramique. En cuisant la céramique pour la faire durcir, on récupère la cire fondue. Il ne reste plus qu'à couler le métal dans le moule en céramique.

Moulage à modèles perdus

✓ Moulage à la cire perdue :

Les avantages du procédé :

- La coulée de tous les alliages non ferreux (aluminium, magnésium, cuivre, titane, zinc...)
- La coulée des alliages ferreux (aciers d'outillage, aciers inoxydables, aciers spéciaux, superalliages à base de nickel ou de cobalt fortement alliés, etc.).
- La coulée de toutes sortes de pièces, allant de moins de 1 g à plus de 100 kg et de plus d'un mètre de longueur.
- Une très grande liberté de conception des pièces.

- Fabrication de pièces en petites, moyennes et grandes séries.
- Les états de surface sont excellents,
- Les précisions

V.1.7. Moulage en moules métalliques (en coquille)

Dimensionnelles sont très bonnes grâce à la grande rigidité du moule réfractaire, à l'absence de plan de joint, à la réduction ou à la suppression des dépouilles.

✓ Moulage en moules métalliques (en coquille) :

Il présente les caractéristiques suivantes pour les moules :

- rigidité de l'empreinte ;
- grande précision dimensionnelle ;
- excellent état de surface des éléments moulants ;
- conductivité thermique élevée des empreintes qui donnent aux pièces moulées des caractéristiques mécaniques plus élevées de l'alliage coulé, conséquence d'une vitesse de refroidissement et de solidification plus élevée, donnant un grain plus fin et une matière plus compacte ; mais des contraintes résiduelles à l'état brut peuvent nécessiter un traitement thermique de détente des pièces surtout pour les métaux ferreux ;
- la possibilité de faire venir des trous de fixation et de permettre une réduction appréciable des surépaisseurs d'usinage.

✓ Moulage en coquille par gravité

On coule directement le métal liquide 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.

✓ Moulage en moules métalliques (en coquille) :

Avantage :

- C'est le procédé de moulage en coquille le plus simple.
 - Fournit des pièces propres, de beaux aspects, lisses, étanches et compacts, aux cotes très proches des dimensions finales
 - usinage réduit
 - Les pièces peuvent présenter des formes extérieures compliquées
- Inconvénients :
- Nécessite l'emploi de masselottes nombreuses et importantes, ce qui se traduit un ébarbage plus important. Le temps de solidification des masselottes est long, ralentissant les cadences.
 - Les outillages sont chers, d'où la nécessité de n'appliquer ce procédé que pour des pièces produites en grandes ou moyennes séries.
- Moulage en coquille par gravité

V.1.8. Défauts de fonderie :

✓ Criques :

Ce sont des ruptures ou déchirures du métal qui se produisent pendant le refroidissement de la pièce dans le moule. Ils sont généralement dus à un retrait gêné par le sable lors de refroidissement.

Solutions :

- éviter les parties massives à refroidissement lent (points chauds), et par conséquent rechercher une épaisseur aussi constante que possible ;
- augmenter la résistance de la pièce par des nervures.

A) Défauts de fonderie :

✓ Soufflures ou piqûres :

Ce sont des cavités ou des trous résultants de la présence de bulles de gaz dans l'alliage pendant sa solidification dont l'origine peut être :

- Alliage gazé pendant l'élaboration et les manutentions,
- Dégagement de vapeur d'eau du sable,
- Entraînement d'air à la coulée ou mauvais tirage d'air dans le moule,
- Réactions moule – métal.

B) Défauts de fonderie :

✓ Retassures :

Ce sont des défauts qui se manifestent par des creux à la surface de la pièce ou par des cavités à l'intérieur de celle-ci. On les trouve dans les régions de la pièce restées liquides .

Solutions : Il faut les alimenter par du métal liquide provenant de masselottes.

✓ Conditions de choix du procédé :

- importance de la série à fabriquer
- alliage métallique composant la pièce
- précision dimensionnelle générale et particulière
- état de surface
- **Caractéristiques mécaniques minimales :**
- taille de la pièce (envergure).
- moyens de production de la fonderie et possibilités d'adaptation à la fabrication demandée
- complexité des formes
- coût d'entretien de l'outillage
- dépenses d'énergie

- importance relative de l'ébarbage
- qualité de la main d'œuvre.

VI. Les principaux procédés de mise en forme de la matière plastique

Le but de la transformation est, dans des conditions techniques, économiques et écologiques satisfaisantes, de :

- donner la forme et l'aspect voulus au polymère pour obtenir la pièce ou le demi-produit à fabriquer
- conserver formes et aspects jusqu'à la mise en service (et après)
- amener les propriétés physiques, mécaniques, au stade voulu.

✓ Les polymères de départ peuvent avoir :

- des formes physiques très variées, depuis des liquides fluides jusqu'à des solides de grandes dimensions
- des états chimiques différents : polymères thermoplastiques ou thermodurcissables.

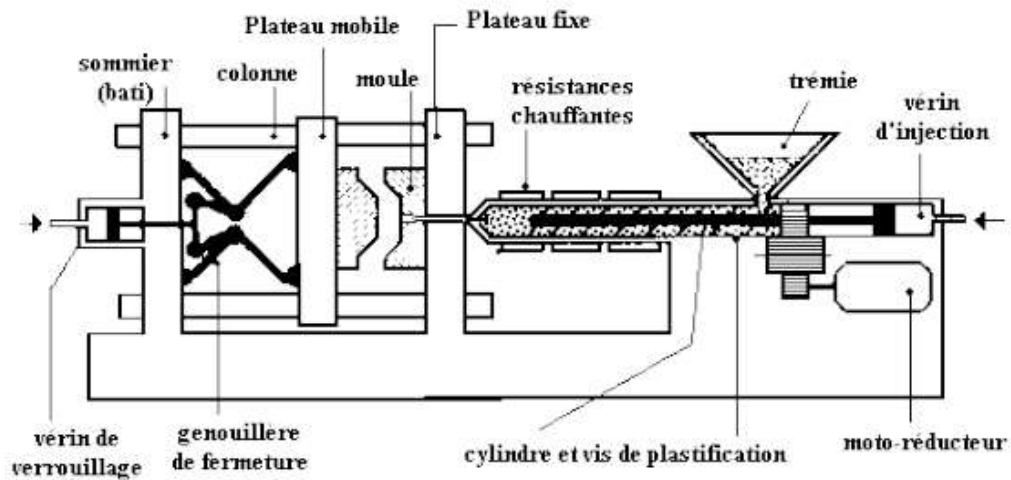
Plus que tout autre matériau, les matières plastiques offrent un large choix de techniques de transformation. Les produits initiaux se présentent sous forme de granulé, poudre, pastille, pâte ou liquide. Les transformateurs réalisent les objets finis destinés aux utilisateurs à l'aide de matériels et de matières fournies par les producteurs de polymères.

VI.1. Le procédé injection

Le moulage par injection,

Aussi appelé injection plastique, est un procédé de mise en œuvre des thermoplastiques. La plupart des pièces en thermoplastique sont fabriquées avec des presses d'injection plastique : la matière plastique est ramollie puis injectée dans un moule, et ensuite refroidie. Le moulage par injection est une technique de fabrication de pièces en grande ou très grande série. Il concerne avant tout les matières plastiques et les élastomères (caoutchoucs) mais aussi divers métaux et alliages à point de fusion relativement bas : alliages d'aluminium, de zinc ou encore laitons

Structure de la presse d'injection



On rencontre des composants moulés par injection dans de très nombreux produits manufacturés : automobile, électroménager, matériel informatique, mobilier... Pour les pièces métalliques, les dimensions sont relativement limitées (les carters de boîtes de vitesses en aluminium sont coulés par injection) mais pour les plastiques elles vont de quelques millimètres à plusieurs mètres (éléments de carrosseries automobiles, tables de jardin, par exemple). Les moules, installés sur une machine spéciale (presse), sont constitués le plus souvent de deux coquilles (partie fixe et partie mobile) qui sont fortement pressées l'une contre l'autre au moment du moulage puis écartées pour permettre l'éjection de la pièce moulée. Outre ces coquilles, le moule peut comporter un ou plusieurs noyaux destinés à former les parties creuses de la pièce et des poinçons permettant de réserver des ouvertures dans ses parois. Il arrive fréquemment que l'on place dans le moule des « inserts » qui se retrouveront par la suite inclus dans la pièce : il s'agit le plus souvent

d'éléments filetés qui pallient localement la résistance insuffisante du matériau constituant le corps de la pièce.

VI.2. Procédé de mise en œuvre par injection plastique :

- La matière plastique avant transformation se présente sous forme de petit granulé dépassant rarement le quelques millimètre. Ces granulés servent à alimenter la vis de plastification (type vis sans fin).
- Celle-ci est chauffée et régulée en température via le fourreau de plastification. La rotation de la vis de plastification (entraînée par un moteur hydraulique) et l'action conjuguée de la température du fourreau permet de ramollir les granulés de matière plastique les amenant jusqu'à un état de visqueux.
- Cette matière est acheminée à l'avant de la vis de plastification donnant ainsi une réserve de matière prête à être injectée (c'est ce que l'on appelle la phase de dosage).
- Viens ensuite la phase d'injection dynamique ou la matière présente à l'avant de la vis de plastification, est injectée sous forte pression à l'intérieur d'un moule (ou cavité) présentant la forme de la pièce souhaitée. Le moule est régulé à une température inférieure à la température de transformation (allant de 15 °C à 130 °C dans certains cas).
- La 3^{eme} étape est la phase de maintien, où l'on applique une pression constante durant un temps déterminé afin de continuer à alimenter les empreintes malgré que celle-ci soit remplie. Ceci afin de palier au retrait de la matière durant le refroidissement. La pièce est refroidie durant quelques secondes puis éjectée.
- Un nouveau cycle peut commencer

Paramètres et réglages : Les temporisations principales à régler sont :

- le dosage, l'injection, l'ouverture, la fermeture, l'éjection, la post pression. Autres paramètres :
- Température du fourreau, température de la matière, température du moule injection
- Pressions durant l'injection et durant le maintien, la contrepression, la vitesse de rotation de la vis, la course de dosage
- Courses d'ouvertures et d'éjections etc.

A) Le cycle d'injection

✓ Déroulement du cycle d'injection

- Le cycle d'injection minimal est décrit sur la figure.
- Pour réaliser ce cycle, les principales fonctions d'une presse à injecter sont donc :

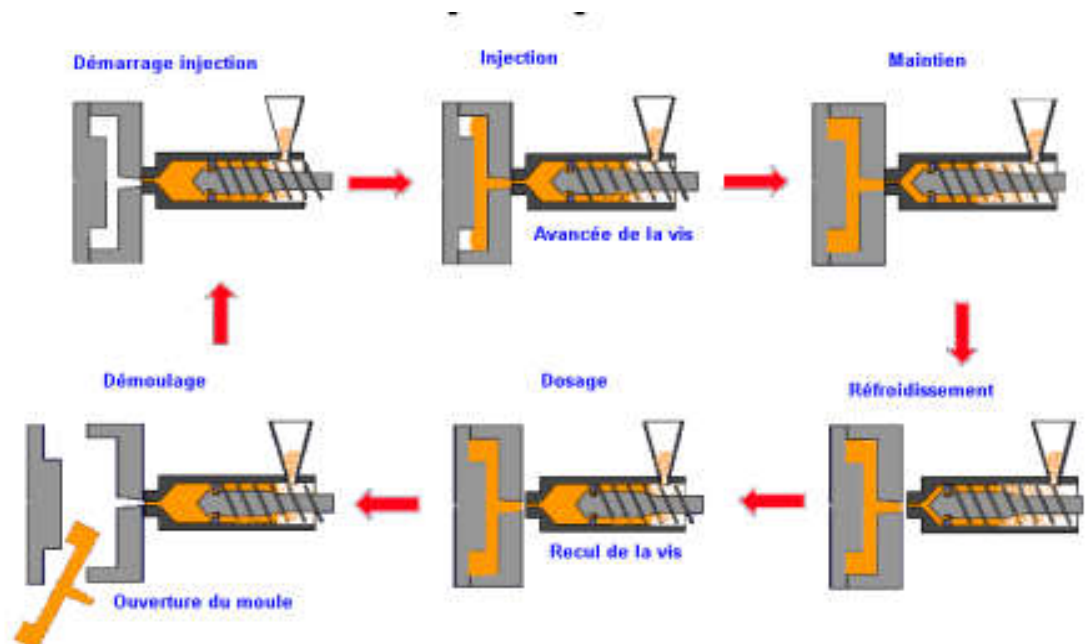
- Ouvrir et fermer le moule
- Verrouiller le moule
- Injecter la matière fondue dans le moule
- Maintenir la matière fondue sous pression dans les empreintes
- Éjecter les pièces après refroidissement
- Fondre la matière.

B) En partant de la matière plastique sous forme de granulés

Pour aboutir aux pièces injectées disponibles hors du moule, le cycle de transformation de la matière plastique Pour réaliser ce cycle, les fonctions suivantes sont nécessaires :

- Alimenter la presse en granulés
- Faire fondre les granulés
- Doser le volume de matière fondue qui va être introduit dans le moule
- Introduire la matière fondue dans le moule...

Cycle d'injection



On rencontre des composants moulés par injection dans de très nombreux produits manufacturés : lunettes, automobiles, électroménagers, matériel informatique, mobiliers... Pour les pièces métalliques, les dimensions sont relativement limitées (les carters de boîtes de vitesses en aluminium sont coulés par injection) mais pour les plastiques elles vont de quelques millimètres à plusieurs mètres (éléments de carrosseries automobiles, tables de jardin, par exemple). Les moules, installés sur une machine spéciale (**presse**), sont constitués le plus souvent de deux coquilles

(partie fixe et partie mobile) qui sont fortement pressées l'une contre l'autre au moment du moulage puis écartées pour permettre l'éjection de la pièce moulée.

Quelques pièces plastiques injectées



VI.3. Le procédé injection soufflage

Le procédé d'Injection soufflage permet de réaliser des corps creux qui présentent de bonnes propriétés mécaniques. Il se décompose en 2 phases distinctes :

- Une première phase d'injection. Cette phase consiste à injecter une préforme (éprouvette) dans un moule d'injection.
- Une deuxième phase de soufflage. Cette phase consiste à souffler la préforme dans un moule. Cette technique est essentiellement réservée aux thermoplastiques. Le cycle de fabrication se compose de 5 étapes :

✓ **Les différentes étapes :**

- Injection de la préforme. Celui-ci est définitivement réalisé à ce stade de fabrication de l'objet.
- La préforme encore chaude (120°C-200°C) est transférée dans un moule de soufflage
- Soufflage. L'air comprimé est introduit au travers du noyau portant la préforme
- La pièce est démoulée, puis transférée à l'aide du noyau sur le poste d'éjection
- Ejection



VI.4. Le procédé extrusion

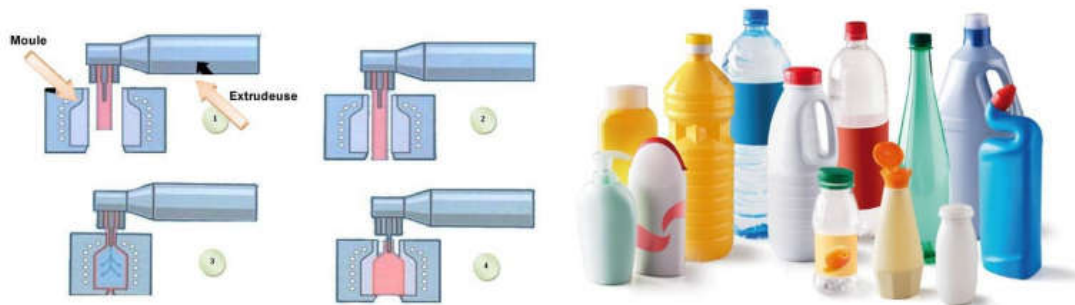
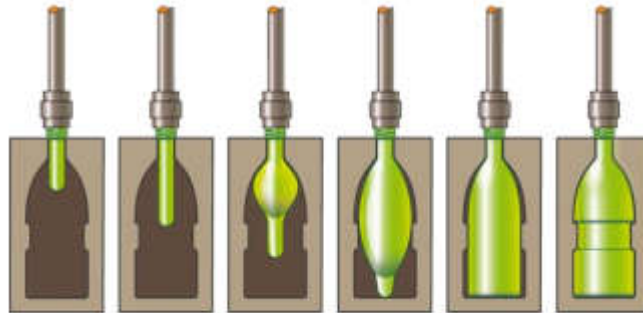
Le procédé d'extrusion des matières plastiques est couramment utilisé dans de nombreuses industries. Le procédé d'extrusion plastique commence avec ce qu'on appelle des résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques sont un type de plastique qui peut être fondu, traité, puis refondu afin d'être réutilisé. Ces résines sont généralement livrées sous forme de granulés ou de billes pour être utilisés dans des machines d'extrusion de plastique.

Les granulés ou les billes peuvent se présenter sous différentes formes. Les machines d'extrusion peuvent être compliquées à utiliser, mais l'ensemble du processus est relativement simple. Le cœur de la machine est la vis. La vis est actionnée par une boîte de vitesses, qui est actionnée par un moteur. Les granulés thermoplastiques sont insérés dans la machine à travers une trémie. La trémie est située à l'arrière de l'ensemble tube/vis, les granulés tombent dans la machine depuis cette trémie. Lorsque la vis tourne, elle entraîne lentement les granulés thermoplastiques vers l'avant. La chaleur dégagée par le frottement de la vis qui tourne à l'intérieur du tube, en plus d'une unité de chauffage externe, fait fondre la matière plastique. Le plastique fondu est alors envoyé vers l'avant de la machine pour la suite du processus.

VI.5. Le procédé extrusion soufflage

Ce procédé consiste à combiner la technique de l'extrusion avec celle du soufflage. Le tube extrudé (parison) est enfoncé dans un moule de soufflage (2 demi-coquilles ayant la forme désirée). La paraison présente un orifice à son extrémité, qui est pincée (là où sera l'ouverture finale du récipient). De l'air sous pression est ensuite insufflé dans la cavité par l'orifice afin de plaquer le tube déformable contre l'empreinte refroidie et figer la pièce dans sa forme finale.

- **Procédé** : On fabrique un tube par extrusion. On enferme ce tube chaud à l'intérieur d'un moule et on y envoie un jet d'air comprimé qui le pousse contre les parois du moule. Exemples d'utilisation : Bouteille, flacons, réservoirs, contenants divers
- **Indice** : Ligne de soudure au fond



VI.6. Le procédé extrusion gonflage

Ce procédé est un dérivé de l'extrusion, il consiste à souffler en continu de l'air à l'intérieur de la paraison pour la faire gonfler. Ce procédé ne nécessite pas de moule, c'est l'air soufflée qui donne la forme et le refroidissement. Cette technique permet de fabriquer des sacs plastiques.

Procédé : Variante de l'extrusion où, à la sortie de la filière, on gonfle d'air le tube produit. Il devient ainsi une longue bulle de pellicule plastique. Après avoir refroidi, on l'aplatit et on l'enroule sur des bobines. Exemples d'utilisation : Sacs poubelles, sacs de congélation.

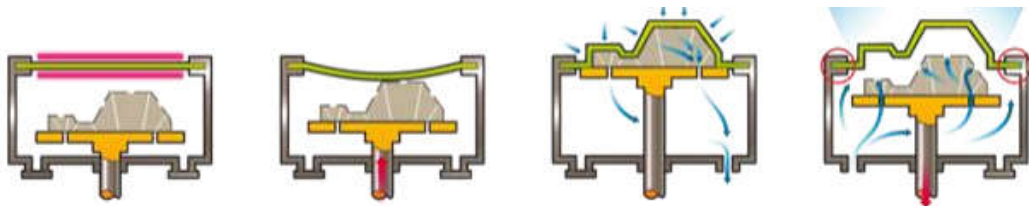
Sacs poubelles



VI.7. Le procédé thermoformage

Principe Le thermoformage est une technique de moulage.

Derrière ce terme compliqué se cache le procédé de fabrication qui permet de réaliser toutes sortes d'objets aux formes creuses. Concrètement, pour les emballages, le thermoformage permet de créer des barquettes, des gobelets ou encore des pots de yaourt. Mais au fait, Principe Le thermoformage est une technique de moulage.



1. Mise en place de la feuille et chauffage par un plateau chauffant supérieur et inférieur.
2. Montée du moule : la feuille est ramollie et le moule monte pour emboutir la feuille.
3. Formage / Refroidissement : une fois le moule en position haute, le vide est fait entre le moule et la feuille.
4. La feuille se plaque sur le moule et en prend sa forme. De l'air ou de petites gouttelettes d'eau sont projetées sur la pièce pour la refroidir et lui donner sa forme finale.
5. De l'air est soufflée à l'intérieur du moule pour décoller la pièce du moule et celui-ci descend pour libérer la pièce.

6. Une fois le moule descendu, la pièce peut être enlevée puis décortiquée pour enlever les chutes de production.

- **Applications**

Jouets (bac à sable,...)

Pots de yaourt

Gobelets et barquettes



Machine de thermoformage et Outillages

Les machines pour thermoformage, autrement appelées thermoformeuses sont utilisées dans la transformation des matières plastiques. Elles s'utilisent en effet dans un bon nombre d'applications. On les trouve par exemple dans le secteur médical, l'éducation, le secteur automobile, etc...

A) Trois principaux types de thermoformage existent, dont le thermoformage par le vide, le thermoformage sous pression, et le thermoformage double coque. Le thermoformage présente de nombreux avantages considérables pour ses utilisateurs. Il offre par exemple l'avantage d'être d'une conception simple, ce qui lui vaut d'être peu coûteux par rapport aux autres types de machines. Sa compétitivité lui permet également de réaliser les petites, moyennes et grandes séries. Le moule de la machine pour formage est dans la plupart du temps conçue en aluminium ; cependant, on la trouve également dans d'autres matières, telles que la résine, notamment pour les petites séries, et le bois qui s'utilise le plus souvent pour la fabrication d'échantillons.

B) Deux principaux types de moules existent, dont les moules positifs et les moules négatives. Plusieurs fournisseurs et des sociétés spécialisées dans la conception et la réalisation de machines pour thermoformage. Ils proposent par exemple des préchauffeurs pour thermoformage, des thermoformeuses stratificateurs, des thermoformeuses pour film de plastique, des modèles pour plaque de plastique, ou pour bloc de plastique, etc...

VI.8. Le procédé calandrage

L'extrusion Calandrage est un processus qui permet la fabrication et l'assemblage d'une feuille thermoplastique sur un support en une seule étape. Il est possible de grainer la feuille au cours de cette seule étape. Elle permet de travailler différentes matières : PVC, TPU (thermoplastiques polyuréthane), polyamide, mais également TPO (thermoplastiques polyoléfine).



✓ Ces derniers ont de nombreux avantages :

- Recyclage de produit
- Gain de poids : par leur faible densité
- Stabilité dans le temps (absence de plastifiant)
- Tenue chimique
- Capacité de transformation :
 - Par thermoformage,
 - Thermo compression,
 - Thermo gainage...

VI.9. Extrusion Calandrage :

Procédé continu au cours duquel la matière plastique est introduite sous forme de granulés. Chauffée, la matière fondue sort de l'extrudeuse par une filière sous la forme d'une feuille. Le passage dans une calandre permet le contre collage (sur un support : textile, mousse,...) et le grainage.

VII. Les matériaux composites

INTRODUCTION

Les matériaux composites se démarquent par leur légèreté et leur facilité de mise en oeuvre. Leur résistance mécanique, physique et chimique offre un large éventail de possibilités en termes d'utilisation, de design, de géométrie et d'intégration de fonctions. S'adaptant parfaitement à toute sorte d'environnement, même les plus

hostiles, ils s'intègrent totalement à notre quotidien à tel point qu'ils peuvent passer inaperçus.

L'industrie automobile reste un grand champ d'investigation pour les matériaux composites. A ce jour, plus de 30 000 tonnes de matières plastiques et composites sont utilisées pour la fabrication de pièces de carrosserie, notamment dans les par chocs, les ailes, les portes latérales, les ouvrants arrières, les pièces sous capot....

VII.1. Matrices.

Les grandes familles de matériaux composites.

Il existe trois grandes familles de matrices :

- ✓ **Les matrices organiques**, qui sont des résines polymères .
Ces matrices peuvent être :
 - Soit thermoplastiques ; il s'agit alors de granulés solides (figure 1a) que l'on chauffe pour les ramollir avant de les mettre en forme ;
 - Soit thermodurcissables (les plus utilisées) ; il s'agit alors de précurseurs liquides (figure 1b) qui, après l'ajout d'un catalyseur, réagissent pour former la matrice (c'est la polymérisation), ce qui entraîne une solidification ;
 - Les matrices céramiques, dont la mise en forme fait appel à des précurseurs liquides (figure 1c) ou gazeux, qui réagissent pour former la matrice ;
 - Les matrices métalliques, qui sont initialement sous forme de métal fondu (ou, parfois, de poudres métalliques que l'on met en forme par frittage).



A



b



c

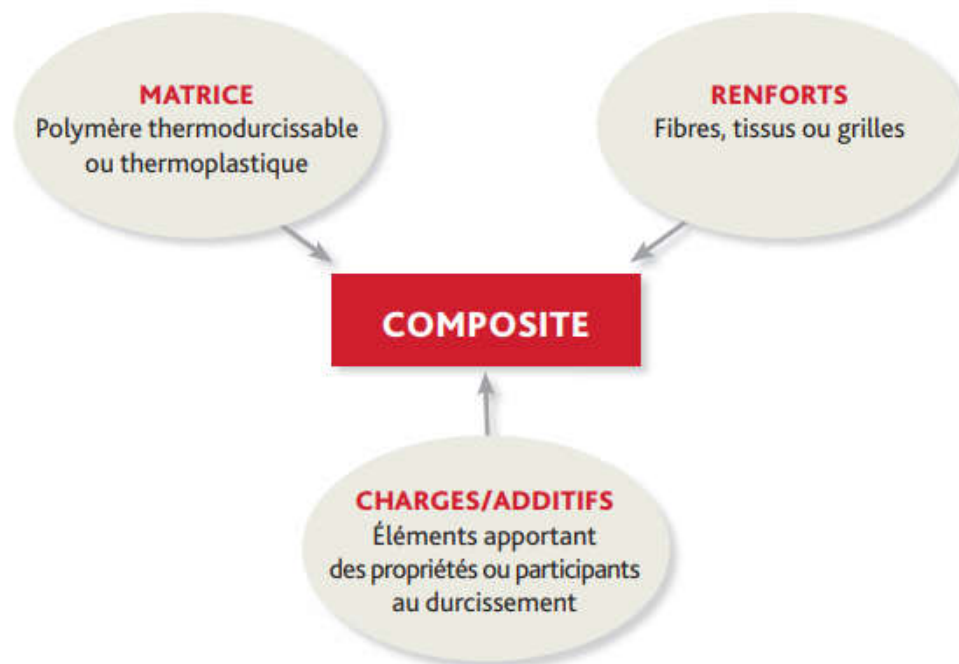
Figure : Quelques matrices avant mise en forme : (a) granulés thermoplastiques (b) résine thermodurcissable, (c) silicium fondu, utilisé pour former une matrice de carbure de silicium

Les procédés utilisés pour mettre en forme ces matrices entrent tous dans la catégorie (très vaste) du moulage, mais les principes physico-chimiques employés

diffèrent d'une famille à l'autre. Schématiquement, les matrices thermoplastiques et métalliques sont fondues puis moulées avec leurs renforts, tandis que les matrices thermodurcissables (ou, plus exactement, « thermodurcies ») et céramiques sont directement synthétisées sur place, autour de leurs renforts, à partir de réactifs fluides.

DÉFINITION

Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs matériaux dont les propriétés individuelles se combinent pour former un matériau hétérogène ayant des performances globales fortement améliorées. Bien qu'il existe différentes sortes de matériaux composites (comme par exemple, le béton, la boue, le contreplaqué...), ce terme s'adresse plus particulièrement aux pièces plastiques constituées d'une matrice polymère et d'un élément renforçant de type fibreux tel que défini dans la figure.



Composition d'un matériau composite

Les matériaux composites, en fonction de leurs constituants, présentent un grand nombre d'intérêts. D'un point de vue mécanique, ils offrent d'excellentes propriétés en traction, flexion, compression, cisaillement plan et transverse ainsi qu'une excellente absorption aux chocs. Leur résistance mécanique combinée à leur faible densité en fait un élément incontournable des conceptions actuelles qu'elles soient structurales ou non. D'un point de vue physico-chimique, ils s'adaptent parfaitement à différents milieux ambiants et peuvent être très performants en termes de résistance aux produits chimiques, au feu, ou à la corrosion. Néanmoins, leur plus grand intérêt réside dans la possibilité de pouvoir intégrer plusieurs

fonctions en une seule opération réduisant de fait et de façon conséquente, le nombre de pièces d'un ensemble mécanique ou d'une conception et par là même son coût de revient. Bien que leur fabrication nécessite des investissements parfois lourds en termes d'outillages de moulage, ils constituent un compromis technico-économique intéressant lorsqu'ils sont fabriqués en série.

VII.2. Renforts

Il existe trois grands types de renforts : les particules, les fibres courtes et les fibres longues. Le cas le plus simple est celui des particules (figure 2a) et des fibres courtes (figure 2b). Ces renforts sont directement incorporés à la matrice avant la mise en forme, et les procédés utilisés sont alors très proches de ceux que l'on utilise traditionnellement pour mettre en forme les résines, céramiques ou métaux non renforcés ; ces procédés ne sont pas développés dans cette ressource.



a



b

Figure : (a) Particules (microbilles) de verre ; (b) fibres de verre courtes.

Le cas des fibres longues. En effet, le principal intérêt de ces fibres est la possibilité de choisir leur orientation, ce qui permet de renforcer la pièce dans les directions selon lesquelles elle est la plus sollicitée. Cependant, les fibres étant de diamètre microscopique (quelques microns), il n'est naturellement pas envisageable de les disposer une à une. Elles sont donc fournies sous la forme de semi-produits pouvant être de plusieurs types :

- Soit des plis ou nappes, pouvant être unidirectionnels (toutes les fibres sont parallèles, figure a) ou mats (les fibres sont disposées « en vrac » dans toutes les directions du plan) ; ces plis sont alors fournis en rouleaux ;
- Soit des fils, formés de nombreuses fibres tressées entre elles, et fournis en bobines (figure b) ;
- Soit des tissus plans préfabriqués à l'aide de ces fils, et fournis en rouleaux (figure c).

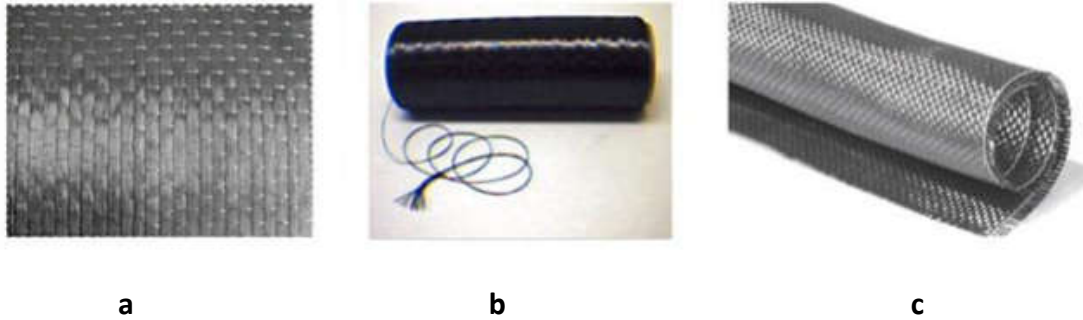


Figure : Fibres longues de carbone : (a) en rouleaux unidirectionnels (les fils de trame blancs ne sont là que pour maintenir les fibres parallèles), (b) en bobines de fils (on distingue les fibres à l'extrémité du fil) (c) en rouleaux de tissu 2D équilibré.

VII.3. Mise en forme des composites à matrices céramiques et métalliques

Les composites à matrices céramiques (CMC) et métalliques (CMM) sont des matériaux de pointe, dont les volumes de fabrication sont nettement plus réduits que ceux des composites à matrices organiques (CMO). Les composites à matrices céramiques, contrairement à leurs homologues organiques, ne sont pas mis en forme par moulage, mais plutôt par dépôt de matière. De manière générale, les procédés employés comportent deux étapes :

1. Fabriquer une préforme, c'est-à-dire un tissu de mèches de fibres.
2. Densifier cette préforme, c'est-à-dire déposer la matrice dans les « vides » du tissu, entre les mèches et également au sein des mèches (entre les fibres).

A) Composites à matrices métalliques

Enfin, les composites à matrices métalliques sont souvent mis en forme par moulage sous pression : les fibres sont disposées dans un moule fermé et préchauffé où l'on injecte ensuite la matrice, en l'occurrence du métal fondu. Le tout est alors compacté sous une presse jusqu'à solidification.

Pour chaque famille de matériaux composites, nous venons de voir qu'il existe plusieurs types de procédés de mise en forme ; ces procédés consistent tous à mettre en place les fibres et à mouler la matrice autour des fibres, le mode de dépôt et de solidification variant en fonction du type de matrice. Le choix de l'un ou l'autre de ces procédés dépend naturellement du niveau de qualité attendu et du nombre de pièces à produire, mais pas seulement : la taille et la géométrie de la pièce, la disposition et l'orientation des renforts (que l'on choisit en fonction du chargement).

B) Les critères de choix des composites par rapport aux métaux

Les caractéristiques mécaniques des composites sont plus faibles que celles des métaux notamment en matière de flexion, de résistance à la rupture, ou encore de

températures limites d'utilisation. Mais cette faiblesse va participer à l'amélioration de la sécurité grâce à leur destruction progressive (absorption progressive d'énergie) en cas de choc. Les composites présentent aussi une meilleure indentation, c'est-à-dire que suite à des petits chocs urbains, il n'y a pas de marque ou d'empreinte sur leur surface contrairement aux métaux. L'absence de corrosion et le gain de poids grâce à une densité faible (acier : 7,8 ; aluminium : 2,7 ; composites : entre 1 et 2) font souvent pencher la balance dans le choix de ces matériaux. Pour le bruit, le pouvoir amortissant des composites contribuent à la diminution des nuisances sonores soit en remplacement d'organes métalliques, soit en tant qu'écran acoustique.



Exemples de pièces pour l'automobile en matériaux composites thermoplastiques

Aujourd'hui, les **plastiques renforcés** ou **composites** peuvent être obtenus par de nombreux procédés de mise en œuvre. Ces procédés nécessitent l'emploi de certaines matrices polymériques et de différentes présentations de renforts ; mais, d'une manière générale, les plastiques renforcés sont toujours constitués de deux matériaux principaux : le renfort et la matrice, auxquels sont associés différents adjuvants.

- **Le renfort** est constitué d'un matériau fibreux. Il s'agit le plus souvent de fibres de verre, mais aussi de fibres de carbone, de fibres d'aramide, de silice, de bore, etc. Il se présente sous la forme de mats (feutres constitués de fils coupés ou de fibres longues).
- **La matrice** est soit une résine thermodurcissable (polyester insaturé, résine époxyde, etc.), soit une résine thermoplastique (polyamide, polycarbonate, polyester saturé, polypropylène, etc.).

- **Les adjuvants** sont des produits nécessaires à la réticulation ou à la polymérisation des résines (accélérateurs, catalyseurs, etc.) ou bien à l'obtention de caractéristiques spécifiques (comportement au feu, résistance au vieillissement, coloration, etc).

On utilise aussi des **charges** (carbonate de calcium, talc, etc.) pour des raisons économiques ou, dans certains cas, pour faciliter la mise en œuvre.

La pièce à fabriquer répond aux sollicitations exigées : caractéristiques mécaniques, comportement au feu, résistance à la corrosion, tenue aux rayons ultraviolets, etc.

Les méthodes de mise en œuvre des matières plastiques renforcées **thermodurcissables** se classent généralement en fonction :

- ✓ des séries à réaliser :
 - petites (moins de 1 000 pièces/an),
 - moyennes (1 000 à 15 000 pièces/an),
 - grandes (au-delà de 15 000 pièces/an) ;
- ✓ des dimensions :
 - très petites (surface développée de quelques cm²),
 - petites (surface développée inférieure à 1 m²),
 - moyennes (surface développée de 1 à 5 m²),
 - grandes (surface développée supérieure à 5 m²).

VIII. La métallurgie des poudres (MDP)

Est un ensemble de procédés et de techniques permettant la fabrication de pièces avec des formes plus au moins complexes et de grande précision géométrique à partir d'une (ou mélange) poudre métallique ou céramique. **La MDP** concerne aussi les procédés de fabrication des poudres métalliques et céramiques ayant une granulométrie et composition chimique désirée. L'élaboration de pièces par métallurgie des poudres se fait par frittage de poudres, préalablement compactées, et permet de réduire au maximum les pertes de matières premières. Cet ensemble d'avantages techniques et économiques sont difficiles à atteindre par les autres procédés de fabrication.

Dans la plupart des procédés d'élaboration par métallurgie des poudres, on distingue deux étapes essentielles.

- La première est la mise en forme de la poudre par compression à froid, soit de manière uniaxiale ou isostatique.
- La deuxième consiste en un traitement thermique de densification par frittage. Ce traitement thermique a pour objet la densification du matériau

par frittage des particules à une température inférieure à la température de fusion de l'un des constituants au moins.

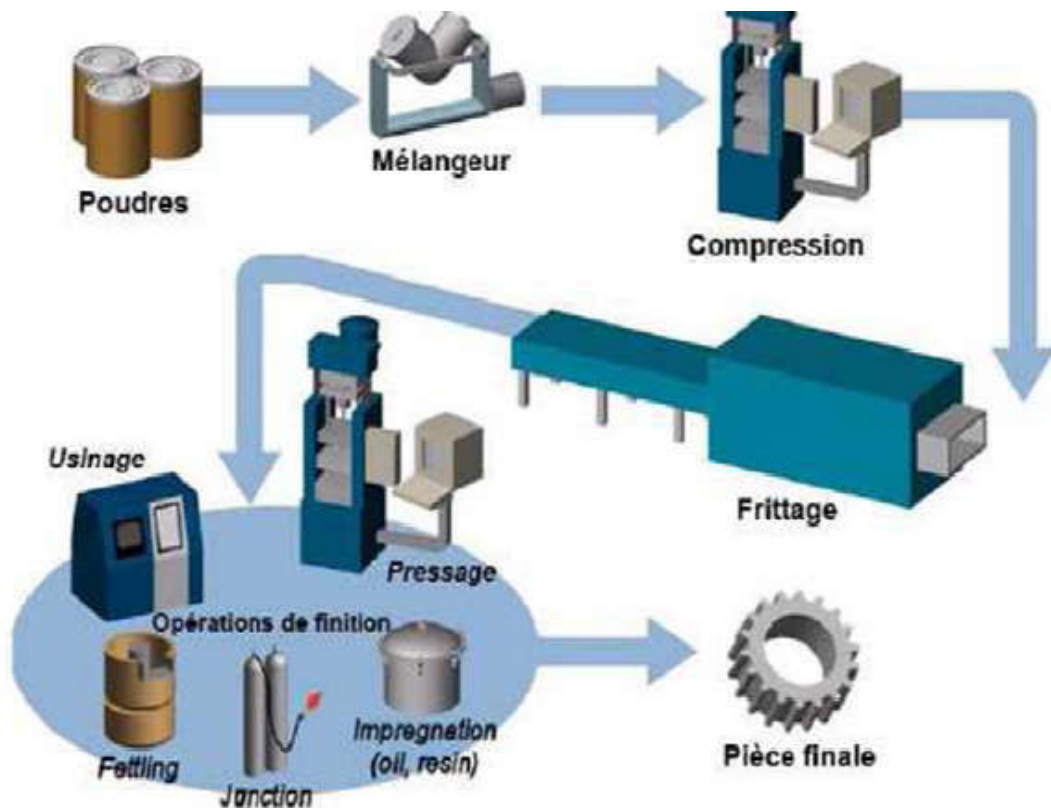


Figure. Le procédé de fabrication en métallurgie des poudres.

VIII.1. Fabrication des poudres métalliques et leurs caractéristiques

VIII.1.1. Fabrication des poudres métalliques

A) Atomisation. L'atomisation est un procédé physique où la matière première est fondue sous atmosphère neutre pour éviter l'oxydation. Le liquide passe à travers un conduit le menant dans une enceinte où il est pulvérisé par un jet de gaz ou d'eau pour obtenir de fines gouttelettes. Ces dernières se refroidissent et se cristallisent en vol pour venir tomber au fond de l'enceinte. A l'heure actuelle plus de 80% des poudres métalliques pures ou alliées (alliage de fer, d'aluminium ou de titane, bronzes, aciers, ...) commercialisées sont produites par atomisation. Ce succès est dû à la grande productivité des techniques d'atomisation permettant ainsi des économies appréciables. De plus l'atomisation est le passage obligé pour la fabrication de poudres pré-alliées.

B) Broyage mécanique

Le broyage est un procédé mécanique de fabrication des poudres. Cette technique est utilisée dans l'industrie, en grande partie, pour les matériaux fragiles mais elle est pratiquée aussi dans le cas des matériaux ductiles. La méthode consiste à placer la matière dans des jarres contenant des billes en acier très dur, la fragmentation s'ensuit sous l'effet des collisions des billes entre elles en piégeant les particules entre elles. Les grains de poudre sont alternativement déformés plastiquement, fracturés et recollés les uns aux autres, ce qui permet un mélange des différents constituants.

- C) Broyeur (Appelé aussi broyeur vertical),** il est muni d'une cuve fixe et traverser par une tige équipée de bras qui viennent brasser le mélanges billes/poudre sous l'action d'un moteur tournant à une vitesse de l'ordre de 300 à 500 tours par minute. Ce broyeur peut être utilisé pour la production d'un volume modéré de poudre avec un temps de broyage relativement court de l'ordre de quelques heures.

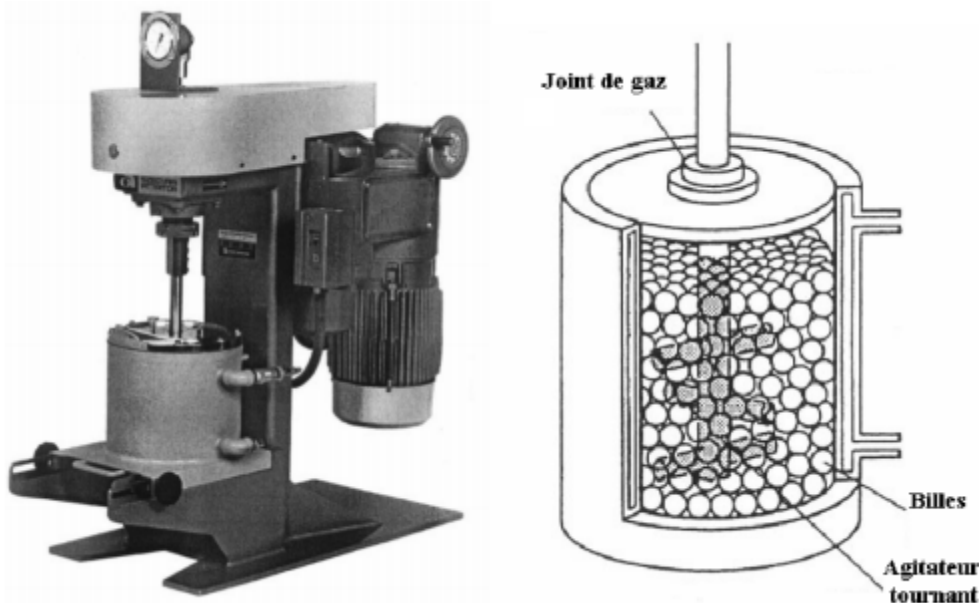


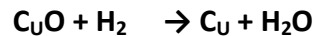
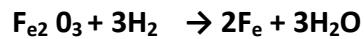
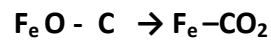
Figure. Broyeur vertical.

D) Le principe du mécano synthèse

consiste à agiter violemment, une poudre et des billes dans une enceinte étanche et souvent avec une atmosphère neutre pour éviter d'autres réactions, sous l'effet des collisions les grains de poudre sont alternativement déformés plastiquement, fracturés et recollés les uns aux autre conduisant à un mélange des différents constituants pour synthétiser un nouveau matériau.

- ✓ **Procédé par réduction**

La deuxième manière par réduction des oxydes, soit par un agent solide tel que le Coke ou le graphite, soit par un gaz réducteur tel que l'hydrogène ou le monoxyde de carbone comme le montrent les réactions suivantes :



On obtient le métal pur avec dégagement gazeux (gaz carbonique ou vapeur d'eau). En effet, par exemple la poudre de fer obtenue est composée de particules sans morphologie particulière et on peut utiliser aussi de l'hydrogène gazeux comme réducteur mais à des températures de réaction élevées. Comme exemple on peut citer la réduction de l'oxyde de cuivre par l'hydrogène (à 350°C) en cuivre métallique plus la vapeur d'eau.

E) Morphologie de particules

Pour observer les particules on utilise généralement des microscopes. Selon la taille des particules les plus utilisés sont les microscopes électroniques à balayage (MEB), ou le microscope électronique en transmission (MET).

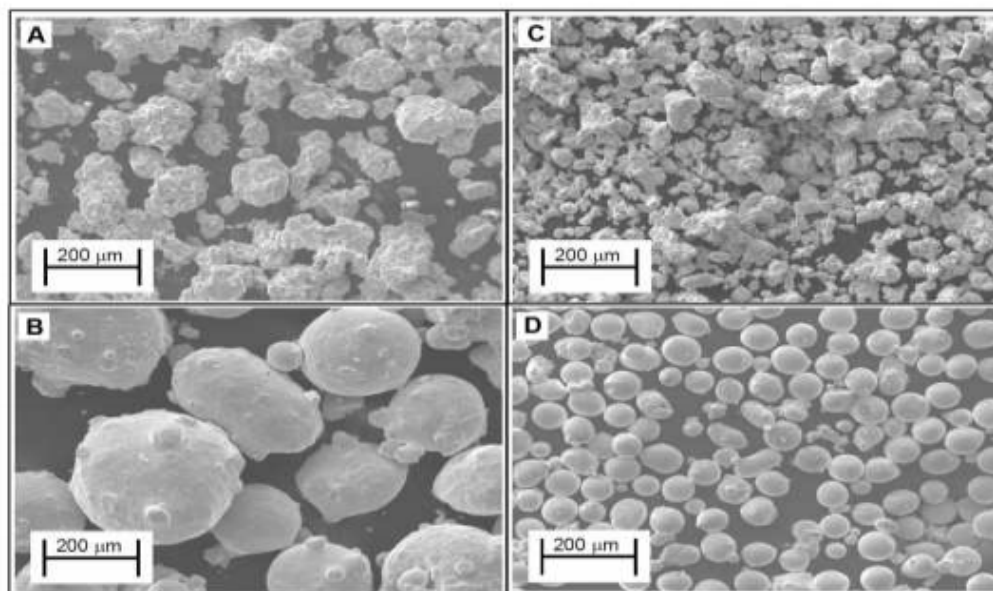


Figure. Micrographies de poudres métalliques obtenues par MEB

- A) Poudre de fer de forme irrégulière. B) Poudre de fer de forme régulière.
- C) Poudre de cuivre de forme irrégulière. D) Poudre de cuivre de forme régulière.

- F) Porosité :** La porosité ϵ d'un milieu est la fraction du volume vide sur le volume total du milieu, aussi appelé volume apparent. Elle dépend en général de la forme et la taille des particules.

$$\epsilon = \frac{V_{vide}}{V_{app}}$$

Le volume vide tient compte de la porosité inter-particules et de la porosité intrinsèque de la particule. On distingue deux sortes de porosité, les pores ouverts accessibles au fluide et les pores fermés difficilement accessibles.

G) Compressibilité des poudres

La phase de la compression est considérée comme phase de mise en forme utilisant de grandes pressions afin d'assurer une densification par rapprochement et déformation des grains solides et l'obtention d'un comprimé vert ayant la forme et les dimensions désirées. Pendant cette opération trois phases se succèdent :

1) Compression isostatique à froid (CIF) et à chaud (CIC)

✓ **Compression isostatique à froid (CIF)**

Le principe de ce procédé, permet un transfert uniforme de pression dans toutes les directions afin de compacter les poudres métalliques, plastiques, composites ou de céramiques enfermées dans un conteneur flexible, étanche et immergé dans un appareil sous pression rempli d'eau à température ambiante.

✓ **Compression isostatique à chaud (CIC)**

La compression isostatique à chaud (CIC) est l'action simultanée de hautes pressions et de températures élevées (inférieures à la température de fusion de l'échantillon). Cette méthode permet l'élimination quasi totale des porosités internes. Les pièces obtenues possèdent des propriétés mécaniques relativement élevées, tout en maintenant les caractéristiques dimensionnelles des pièces traitées. La CIC est considérée comme une fonderie de précision, utilisée dans l'industrie pour produire des pièces métalliques de haute gamme avec des formes plus ou moins complexes et des microstructures relativement uniformes. Le principe de la CIC consiste à soumettre une enveloppe étanche remplie de poudre à un traitement thermique sous pression isostatique appliquée par l'intermédiaire d'un gaz inerte dans une enceinte haute pression contenant un four à résistance. Pendant ce procédé, la pression peut atteindre 400 Mpa et la température 2000°C. On trouve dans l'industrie des enceintes de plusieurs mètres de diamètre et de hauteur. Les temps de maintien dans ces conditions de pression et de température, pour former la pièce voulue, sont de l'ordre de quelques heures ce qui explique le coût important du cycle de densification

et donc son application à des pièces de grande valeur (le cycle, dépassant souvent une durée totale de 10 heures). Ce cycle se compose d'une phase de chauffage et mise en pression, d'un palier en pression et température de maintien pour finir avec le refroidissement et la baisse de la pression. Au cours du procédé, le volume du conteneur est réduit généralement de l'ordre de 30% et la porosité du matériau est complètement éliminée.

VIII.2. Définition du frittage

On peut dire que le frittage est un traitement thermique au cours duquel la pièce acquiert la résistance et les dimensions voulues, ce traitement thermique s'effectue à une température inférieure au point de fusion du composant principal du matériau. Le frittage permet la création de liaisons fortes entre les particules par diffusion de matière et dans la plupart des cas, il est accompagné d'un retrait (réduction des dimensions de la pièce) qui induit une densification (réduction de volume de la pièce).

Le frittage comporte 3 stades :

- un chauffage jusqu'à la température de frittage.
- Maintient à cette température (isotherme).
- un refroidissement jusqu'à la température ambiante.

La vitesse de chauffage et refroidissement doivent être contrôlées pour éviter une fissuration de la pièce. Le palier isotherme permet la croissance des ponts inter-particulaires et la densification du matériau et entraîne parfois un grossissement de grains. Le frittage peut se faire en phase solide ou en présence d'une phase liquide. Industriellement le frittage en phase solide est le plus utilisé, surtout pour la fabrication de pièces métalliques.