

3. LE MOULAGE

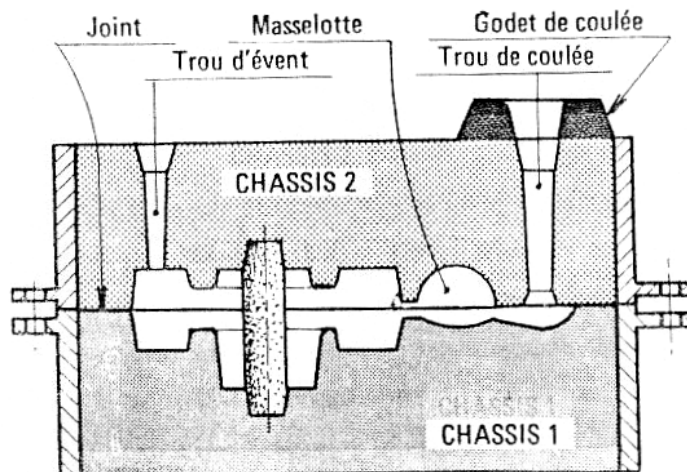
3.1. Généralités

Les organes et pièces constituant les machines et appareils proviennent de sources diverses de fabrication telles que le forgeage, l'usinage, l'estampage, la fonderie, etc.

La technique de fonderie est le plus souvent utilisée, car elle est non seulement économique, mais :

- Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés).
- La série des pièces est identique.
- L'obtention de pièces massives telles que bâtis, volants, etc..

Le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes. Le moulage proprement dit, 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. 200).



(fig.200)

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

a. 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).

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 en 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.

| Métaux Et températures de fusion | Moulage En sable | Moulage En coquille |
|---|---|---|
| Fontes : 1100 à 1250°C Aciers : 1200 à 1500°C | <ul style="list-style-type: none">- Moulage en sable avec ou sans noyau.- Moulage en carapace : procédé Croning.- Moulage à la cire perdue | Moulage impossible sans détériorer les coquilles. |
| Cuivre et ses alliages : Laiton : 940°C Aluminium et ses alliages : Alpax et Zamack : Environ 610°C | <p>Moulage en sable :</p> <ul style="list-style-type: none">- Pour les grosses pièces. <p>Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none">- Cloches en bronze.- Hélices de bateaux. <p>- Pour les petites séries.</p> | <p>Moulage en coquille :</p> <ul style="list-style-type: none">- Pour les grandes séries.- Avec ou sans pièce (prisonnier) insérée au moulage- Par gravitation ou sous pression. Exemples :<ul style="list-style-type: none">- Carter de boîte de vitesses (alpax)- Corps de carburateur (zamack). |

Comme il a été sus-mentionné, le moulage est généralement très économique, mais les caractéristiques d'un alliage coulé sont plus faible que celles du même alliage forgé Les

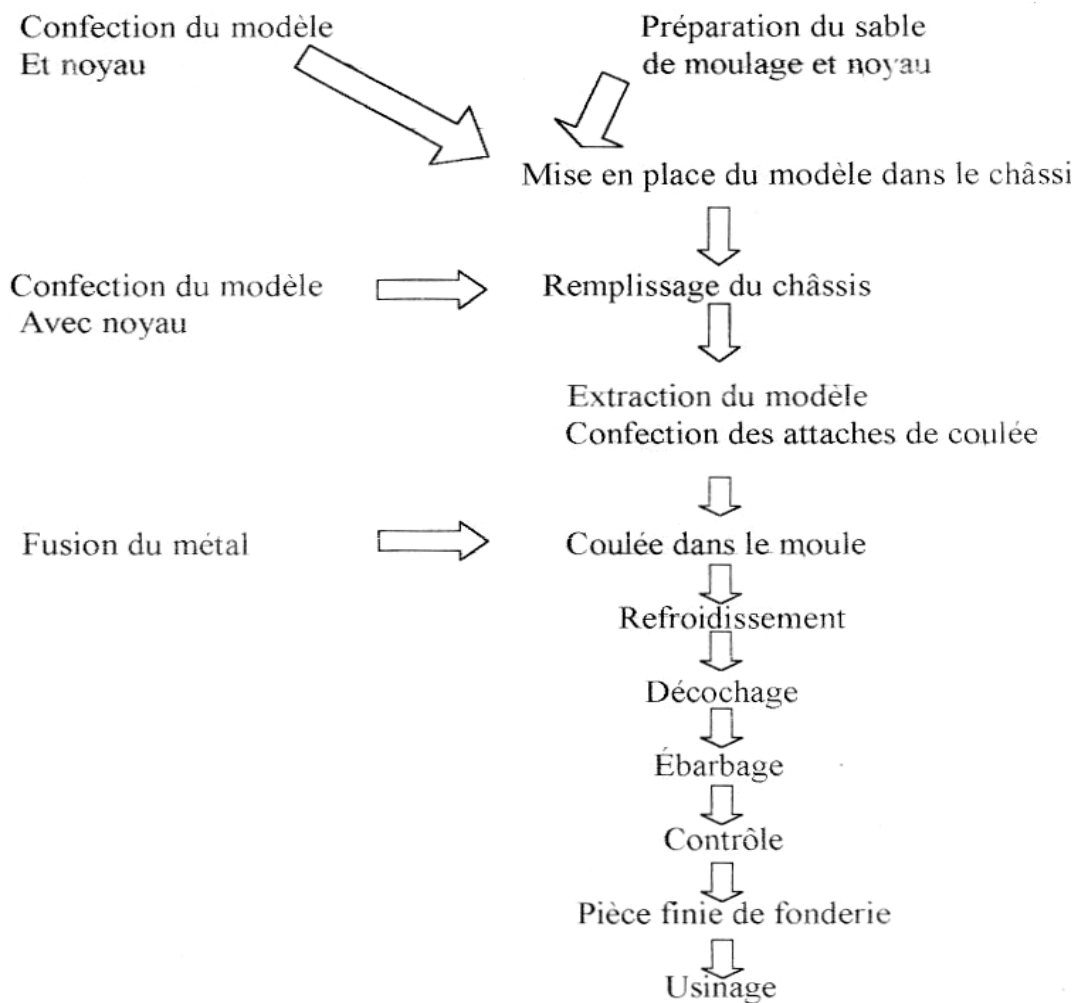
défauts de fonderie, fréquents dans les pièces moulées, diminuent encore leur résistance globale, certains de ces défauts, dus aux gaz occlus ou à la contraction du métal au refroidissement, mais peuvent-être évités par un tracé judicieux des formes.

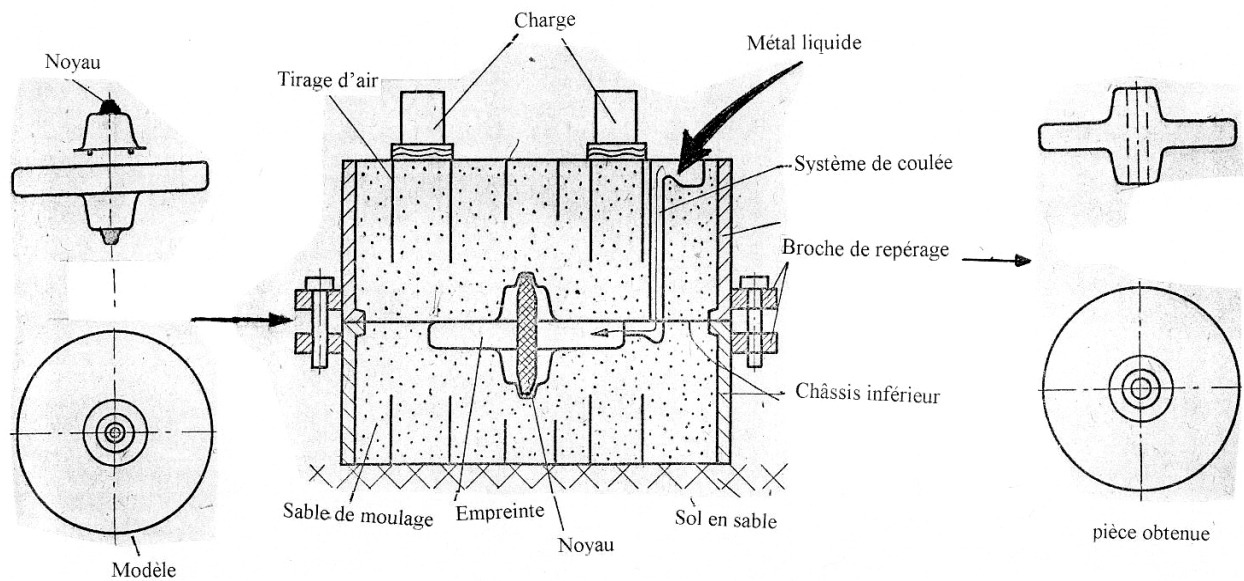
3.2. Moulage en sable

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.

Un moule simple est constitué de deux parties : la partie supérieure et la partie inférieure. La figure 201 représente un moule en sable avec les différentes parties essentielles. Le métal en fusion est coulé à travers le trou du système de coulée, en traversant les canaux jusqu'au remplissage de l'empreinte. Après refroidissement et solidification, la pièce est sortie pour subir les différentes opérations de finition.

L'ensemble des opérations de moulage en sable est donné par le schéma si-dessous :





(fig. 201)

Dans le moulage en sable on distingue deux types de moulages :

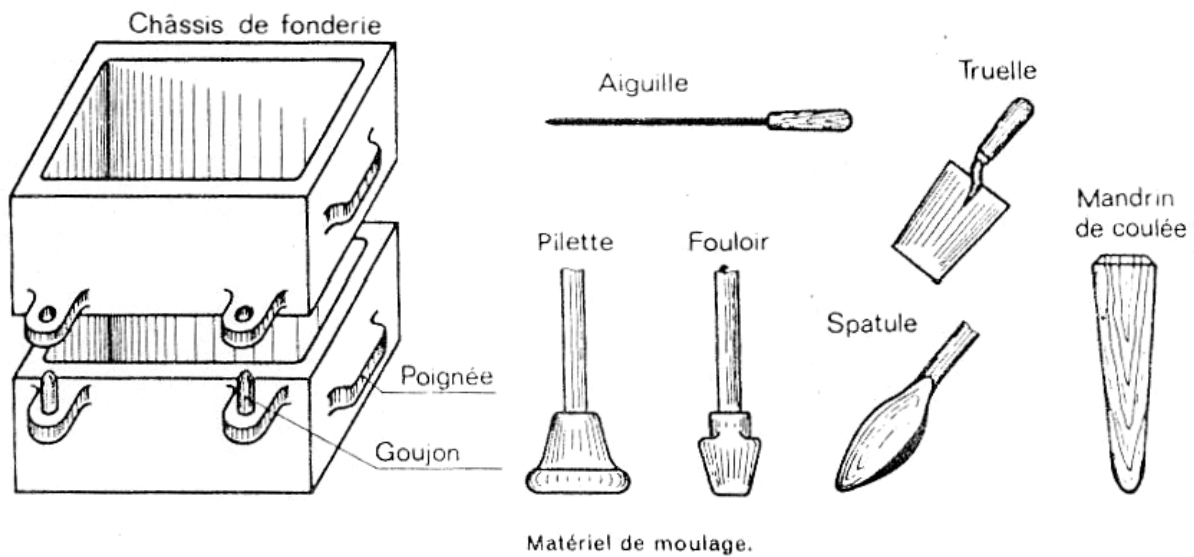
- Le moulage manuel.
- Le moulage mécanique.

3.2.1. Moulage en sable manuel

Le moulage en sable manuel est utilisé surtout pour la fabrication des pièces unitaires et des pièces de grandes dimensions, qui ne peuvent pas être réalisées dans des machines de moulage.

La figure 202 représente le matériel nécessaire pour le moulage en sable manuel :

- Modèle et noyau.
- Châssis.
- Sable de moulage.
- Métal liquide.
- Aiguille (pour la confection de trous d'air).
- Truelle (pour rendre lisse la face de joint du moule).
- Pillette et fouloir (pour le compactage du sable).
- Spatule (pour rendre lisse les différentes surfaces du moule après démoulage).
- Mandrin de coulée (pour la confection du trou de coulée).
- Marbre (sur lequel s'effectue la préparation du moule).



(fig. 202)

3.2.1.1. Le modèle

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 du sable, 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 secs (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 plaques modèles métalliques. Ils sont conçus à partir de différents alliages tels que :

- Alliage d'aluminium.
- Alliage de magnésium.
- Alliage de zinc.

- Alliage de 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 chromisation et non métalliques par peinture.

Lors de la réalisation du modèle on doit tenir compte de :

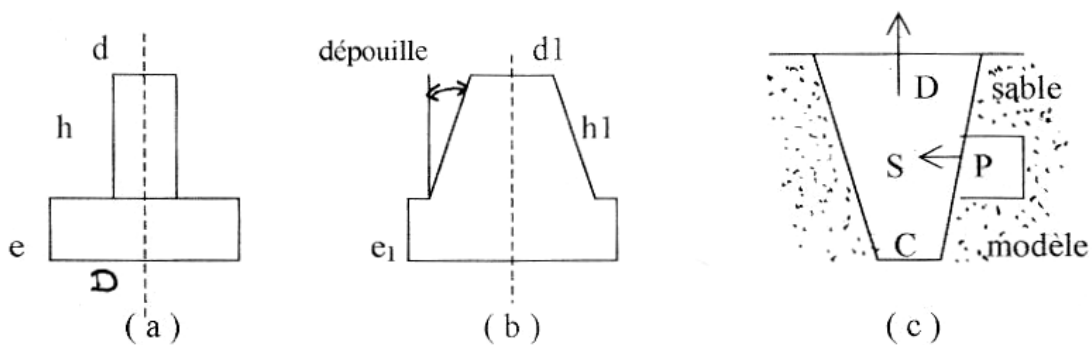
a. L'usinage : s'il y a lieu. Dans ce cas, la pièce brute doit comporter des surépaisseurs qui seront enlevées durant l'opération d'usinage. Donc les dimensions du modèle doivent être augmentées de 2 à 3 mm. Généralement la grandeur de la surépaisseur d'usinage est choisie suivant un tableau spécial. 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.

b. Le retrait : car lors du refroidissement, le métal se contracte, le retrait est la valeur de cette contraction. Donc on majore les dimensions du modèle de 1 % pour la fonte et de 2 % pour l'acier.

c. La 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%), comme le montre la figure 4.b. La dépouille est absolument nécessaire.

La dépouille peut se faire en augmentation à égalité de la pièce ou encore en diminuant les dimensions de la pièce, si le rôle de celle-ci n'est pas important. En général, le modèle est souvent en plusieurs parties démontables pour faciliter le démoulage et permettre la sortie des parties en contre dépouille.

Lorsqu'une partie du modèle fait saillie sur le modèle et à une direction autre que celle générale du moulage, il est bien évident que l'on ne peut démouler cette partie au même temps que le modèle sans arracher une portion du sable du moule. Pour éviter cet inconvénient on fait cette partie du moule démontable, au moment du démoulage, le corps C (fig. 203) est démoulé dans la direction générale du démoulage D, alors que la partie démontable P, reste dans le moule, et elle est ensuite démoulée suivant la direction S dans la cavité du moule laissé par le corps C démoulé.



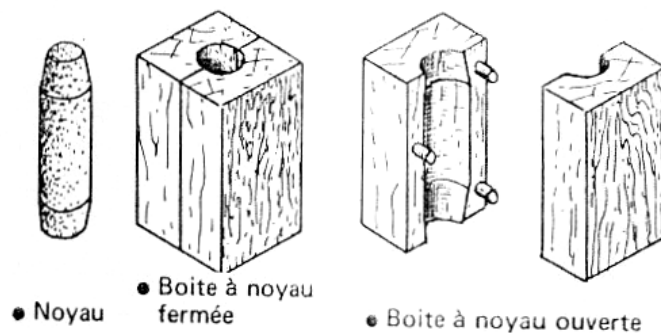
(fig. 203)

Les modèles peuvent être aussi creux ou pleins. Les modèles de petites dimensions sont massifs et au contraire ceux de grandes dimensions sont creux afin de diminuer le prix de revient, ainsi que leur poids.

3.2.1.2. Noyau et boîte à noyau

Pour obtenir le contour intérieur de la pièce, on emploie les noyaux, qui sont placés dans le moule. Le moulage avec noyau s'impose lorsque les pièces présentent des évidements qu'il serait difficile ou même impossible d'obtenir par moulage au naturel.

Le noyau est confectionné en sable auto-siccateur, dans un moule appelé boîte à noyau. La boîte en bois ou métallique (fig. 204), et se compose de deux parties assemblées par des groupes de repérage.



(fig. 204)

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 l'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.
- 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.

3.2.1.3. Le sable de moulage

Le sable de moulage doit être infusible (résister à la température de coulée du métal), résistant (résister à l'érosion du métal liquide) et poreux (ne peut s'opposer au passage des gaz produits au moment de la coulée), et se compose en général :

- a. De sable quartzeux (86 à 96 %) pratiquement infusible en contact avec le métal liquide.
- b. D'argile (bentonite) (3 à 10 %) qui lie les grains de silice entre eux et empêche le moule de se détériorer après enlèvement du modèle. Dans certains cas au lieu de l'argile, on utilise d'autres liants tels que huiles végétales, verre soluble, dextrine, résine, bitumes, lessive sulfurique etc.
- c. Le noir de fonderie, graphite pulvérisé ou noir végétal (2 à 6%) (charbon de bois pulvérisé) qui brûle en contact du métal en fusion et donne ainsi au moule la porosité et la perméabilité nécessaire à l'évacuation des gaz (eau, vapeur d'eau, oxyde de carbone) qui seraient emprisonnés dans l'empreinte.
- d. On incorpore de l'eau, des résines furanniques accompagnées d'un catalyseur dans le proportion globale de 1,5 %. Les résines provoquent le durcissement assez rapide du moule à la température ambiante.

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 l'on a recours au sablage mécanique. On emploie le sable unique pour remplir tout le volume du châssis. Sa cohésion, sa perméabilité et réfractairité sont élevées.

Les compositions et différentes propriétés des différents types de sables de moulage sont représentées dans le tableau ci-dessous.

Moulage de l'acier :

Les sables utilisés pour le moulage de l'acier doivent être plus réfractaires et ne contiennent pas de charbon. Pour les sables, au lieu de l'argile, on utilise la bentonite. Afin d'augmenter la réfractairité du sable de contact, on introduit dans le dernier un quartz pulvérisé.

| Sable de moulage | Composition % | | | | Propriétés | | |
|--|---------------|-----------------|--------------------|----------------------------------|------------|--------------|--|
| | Sable décoché | Sable quartzeux | Argile (bentonite) | additions | Humidité % | Perméabilité | Résistance à la compression en état humide (kgf/cm^2) |
| Sable unique | 85-90 | Moulage de 10-5 | La fonte 3 (1-0.5) | Lessive 1-sulfurique 0.5 charbon | 4-5 | 70-80 | 0.4-0.6 |
| Sable de contact | 50-60 | 40-30 | 6.5-5.0 (2-1.5) | 2-lessive sulfurique 3-charbon | 4.5-5.5 | 80-100 | 0.5-0.6 |
| Sable de remplissage | 96-98 | 3-45 | 1.0-0.5 | ----- | 5-5.5 | 60 | 0.3-0.4 |
| Sable unique à grande résistance (pour la machine automatique) | 93-96 | 3.5-2 | ----- (2-1.5) | 1-charbon 0.1-amidon | 3-3.4 | 120-150 | 1.5-1.7 |

Moulage des aciers non ferreux :

| | | | | | | | |
|--|-------|------|------|-----------|---------|----|---------|
| Sable unique pour Les alliages d'aluminium | 82-87 | 10-5 | 10-8 | ----- | 4.5-5.5 | 20 | 0.3-0.5 |
| Sable unique pour les bronze | 80-85 | 10-5 | 12-8 | 1.5-char- | 4.5-5.5 | 30 | 0.3-0.5 |

3.2.1.4. Sable à noyaux

La composition des sables de moulage et de noyaux est très diverse et dépend de la nature du métal, de l'épaisseur des parois de la pièce, de sa masse, de la forme etc. Les sables à noyaux doivent être plus compressibles, réfractaires et perméables que les sables de moulage car autour du noyau se trouve le métal liquide, c'est pourquoi pour le noyautage, on utilise des matériaux plus réfractaires (la proportion en sable quartzeux est élevée). Donc l'élément de base d'un noyau est le sable siliceux avec addition des agglutinants et agglomérants.

L'argile naturel représente un type d'agglutinant et peut devenir plastique en présence de l'eau, son rôle est de souder entre eux les grains de silice. L'agglomérant est destiné à donner une résistance après cuisson. Les différents types d'agglomérants utilisés en fonderie sont la dextrine, l'huile à lin, l'huile cuite, produit de pétrole distillé et la lessive sulfurique.

Ces deux types de liants sont introduits en quantité de 1 à 5 % pour augmenter les propriétés du sable et cela grâce à la formation d'une pellicule dure autour des grains du sable pendant le séchage.

Pour la fabrication des pièces in alliages non ferreux, on utilise du sable argileux et pour les alliages à base de magnésium, on ajoute 0,5 à 1 % de soufre jusqu'à 0,5 % d'acide borique pour éviter l'action nocive de l'oxygène.

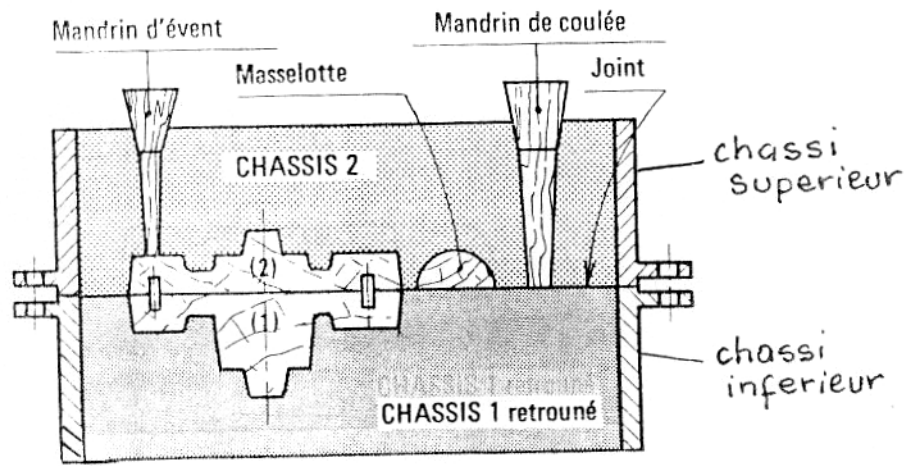
Dans le cas des sables spéciaux tels que le sable au silicate de soude, le sable soumis à l'action du gaz carbonique (CO_2), ils durcissent instantanément. Ces sables contiennent 95 à 97 % de sable quartzeux, 3 à 5 % d'argile, 5 à 7 % de verre soluble ou de sable auto-

durcissable, qui assure son durcissement pendant 3 à 5 min. Pour cela, on doit introduire dans le sable 5 % de verre soluble et 2 à 3 % de laitier contenant du Cr_2O_3 .

3.2.1.5. Le châssis

C'est un cadre rigide fabriqué en fonte, en acier ou en aluminium parfois en bois, sans fond, destiné à contenir et à soutenir le sable constituant le moule. Un châssis complet comprend au moins deux parties (fig. 205).

- Partie supérieure ou châssis de dessus.
- Partie inférieure ou châssis de dessous.



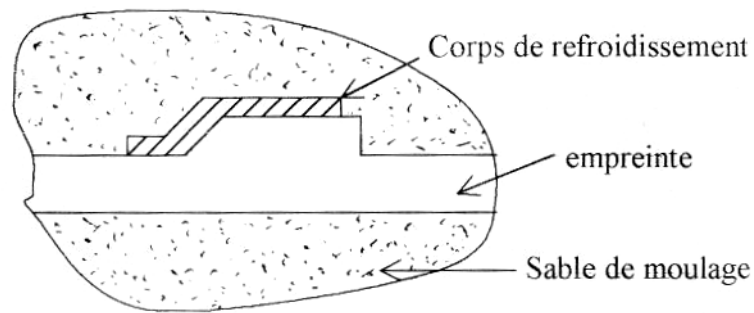
(fig. 205)

Les châssis sont nervurés intérieurement et dans le cas échéant, quand les conditions de moulage l'exigent, on ajoute une partie intermédiaire appelée chape (partie du moule intercalée entre le dessous et le dessus). Les châssis portent des oreilles percées permettant un repérage précis à l'aide de broches ou de goujons. On trouve également sur les cadres, des poignées de manœuvres et de pattes de crampons servant à placer des serre-joints ou des étriers destinés à empêcher la partie du moule de s'écraser sous la pression du métal liquide lors de la coulée (dans le cas des châssis en bois).

On appelle motte, le modèle dont on a enlevé le châssis, avant coulée pour l'utiliser de nouveau.

3.2.1.6. Les corps de refroidissement

Les corps de refroidissement forment une certaine partie à la surface de la pièce coulée et sont destinés à absorber rapidement la chaleur du métal coulé. Ils sont introduits dans le moule aux endroits favorisant les retassures (fig. 206). L'épaisseur du corps de refroidissement est d'environ 0,7 fois l'épaisseur de la paroi de la pièce.



(fig. 206)

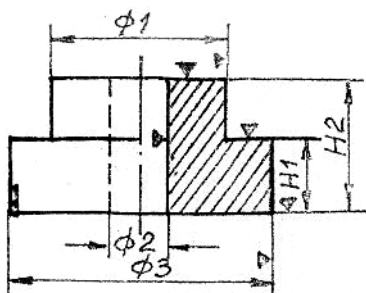
3.3. Opération d'exécution manuelle d'un moule en sable

Soit à exécuter le moule de la pièce représentée par son dessin de définition dont le modèle est représenté par la figure 207. L'exécution manuelle d'un moule en sable comprend les opérations suivantes :

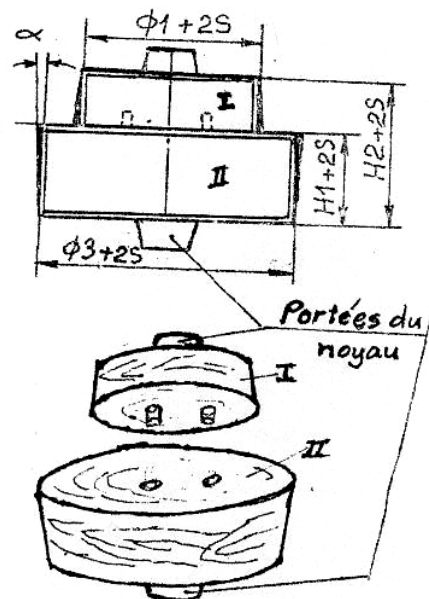
a. Confection de la partie inférieure du moule :

- La partie II du modèle est placée sur un marbre sur lequel se trouve le châssis inférieur.
- Le 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.
- Le 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 enfoncez légèrement le mandrin de coulée et le mandrin d'évent

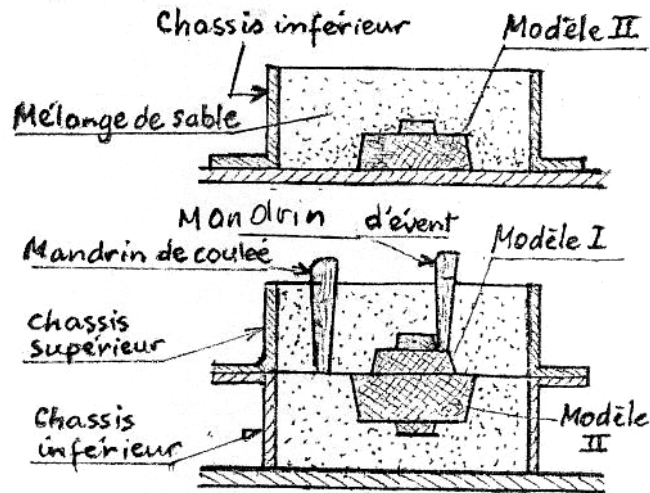
① Dessin de définition



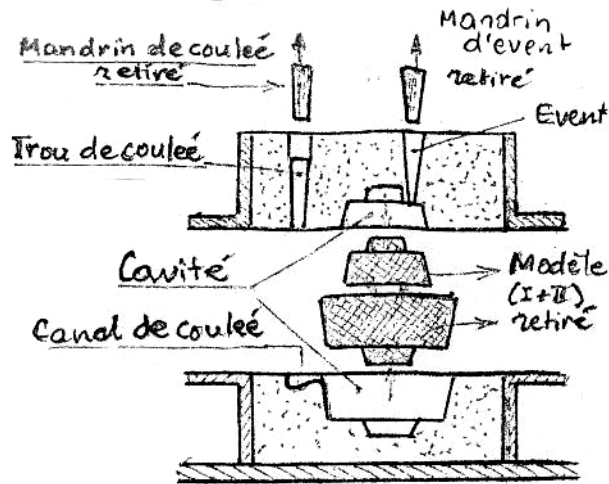
② Modelage



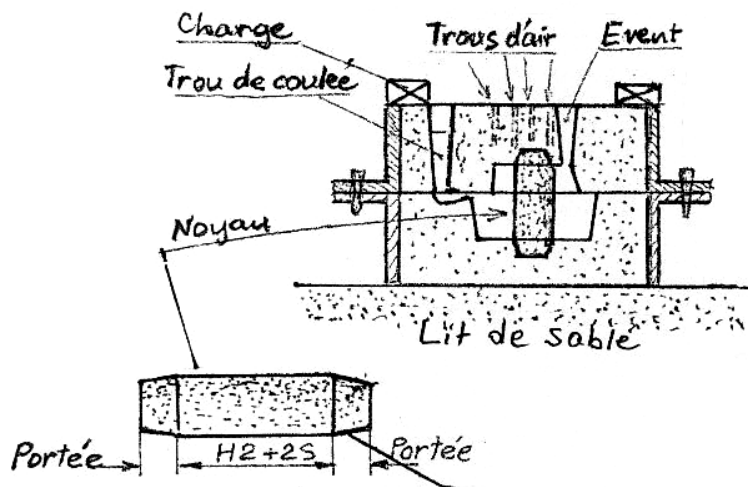
③ Moulage



④ Démoulage

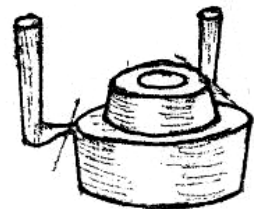


⑤ Remoulage



6. Coulé du métal

⑦ Pièce brute



(fig. 207)

b. Confection de la partie supérieure du moule :

- Engougonner 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 et d'évent.
- Séparer les deux châssis pour 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 la 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 défaut, 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 :

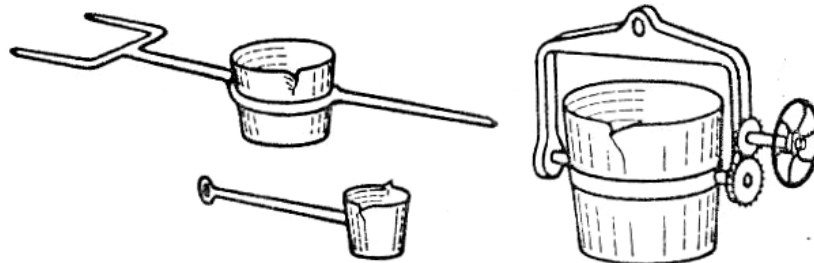
On peut utiliser le moule tel qu'il vient d'être réalisé et dans ce cas le moulage est dit moulage à vert (en raison de l'humidité du sable, des surfaces externes des pièces, surtout pour la fonte, sont durcies après refroidissement, ce qui peut provoquer la détérioration rapide des outils de coupe.

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.

La poche de coulée est transportée et manœuvrée à la main ou mécaniquement, cela dépend de la capacité de cette dernière.



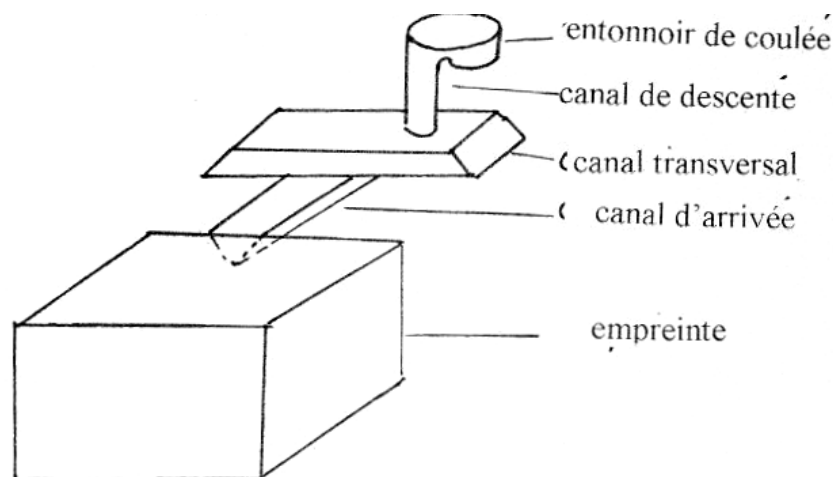
Poches de coulée.

(fig. 208)

Afin d'éviter les fuites du métal qui se produisent dans le plan de joint du moule à cause de la poussée verticale du métal arrivant dans l'empreinte, on charge le châssis avec des poids (fonte en gueuse par exemple) 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. 209), se compose de :



(fig. 209)

- **Entonnoir de coulée** : destiné à recevoir et à couler le métal liquide provenant de la poche de coulée vers le canal de descente.

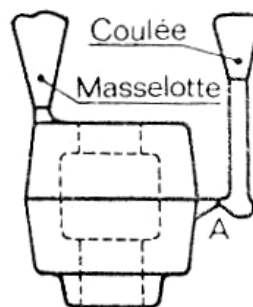
- **Canal de descente** : c'est un canal vertical, destiné à conduire le métal liquide vers les autres éléments du système de coulée
- **Canal transversal** : c'est un canal horizontal ayant, en plus du rôle de la conduite du métal, un autre rôle qui est la retenue des particules de la scorie et les autres impuretés non métalliques.
- **Canal d'arrivée** : il conduit le métal liquide directement dans l'empreinte du moule.

Le plus souvent l'entonnoir de coulée, le canal de descente et le canal transversal se trouvent dans la partie supérieure du moule (châssis supérieur). Les systèmes de coulée peuvent être à 2, 3 ou 4 éléments.

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 à l'aide d'un marteau sans détérioration de cette dernière (fig. 210).



(fig. 210)

g. Dessablage :

L'opération de dessablage est nécessaire, afin de débarrasser la pièce du sable qui adhère à 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. Le sable provenant du décochage et du dessablage est tamisé, régénéré ensuite réutilisé.

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.

i. Contrôle et traitement thermique : s'il y a lieu

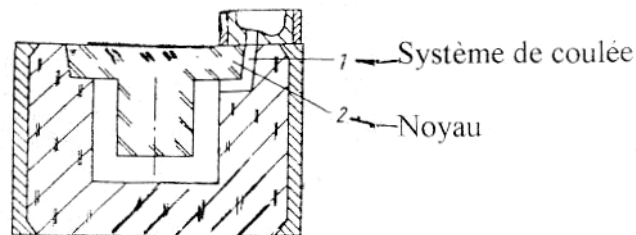
j. Usinage, finition et perçage : s'il y a lieu.

3.4. Différents types de moules

Les moules peuvent être confectionnées en une, deux ou plusieurs parties.

a. Moule à un élément :

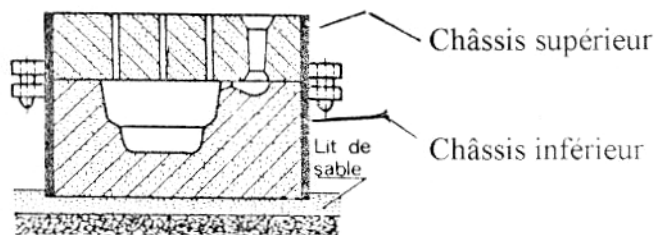
Ce type de moule se compose d'une seule partie et il est rarement utilisé. L'empreinte reste ouverte à la partie supérieure, ou elle peut être fermée par un noyau, (fig. 211).



(fig. 211)

b. Moule à deux éléments :

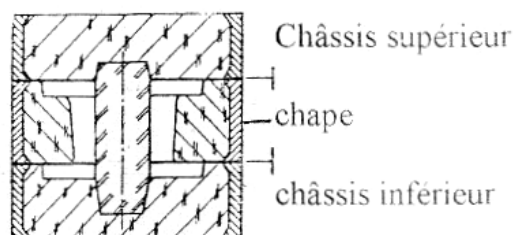
La plupart des moules en fonderie se compose de deux parties, le châssis supérieur et le châssis inférieur. Dans ce cas la plus grande surface des modèles doit se situer dans le plan de joint des châssis, (fig. 212).



(fig. 212)

c. Moule à plusieurs éléments :

Dans ce cas le moule est constitué de trois ou plusieurs éléments. Le châssis intercale entre le châssis supérieur et inférieur est appelé chape. Pour ce type de moule, le modèle doit avoir deux plans de joints, (fig. 213).



(fig.213)

Le rendement du moulage en sable manuel est très bas et ne peut être utilisé que pour une production du type grande série. Le plus souvent, on a recours au moulage à la machine ou aux procédés spéciaux tels que moulage en coquille sous pression, centrifuge, en carapace ou en cire perdue et autres.

3.5. Moulage à la machine (mécanique)

Le moulage à la main ne se pratique que pour un nombre de pièces réduits ou pour des pièces volumineuses, en plus le serrage du sable à la main est long, pénible et souvent peu régulier. De plus le démoulage est délicat car s'il n'est pas fait verticalement, les arrachements du sable imposent des retouches et peuvent rendre le moule inutilisable. Tous ces inconvénients peuvent être supprimés par le moulage mécanique. Donc dans le moulage mécanique, le sable est serré mécaniquement soit :

- Par pression.
- Par secousses.
- Le plus souvent par combinaison des deux procédés (pression et secousses).
- Par projection.

L'empreinte de la pièce n'est plus donnée par un modèle ordinaire, mais par un modèle fixe sur un support dont l'ensemble est appelé plaque modèle, d'où les pièces obtenues par moulage mécanique sont limitées en dimension par la grandeur des châssis.

3.5.1. Plaques modèles

a. Plaques modèles à double faces :

C'est une plaque métallique portant sur une face la forme du joint et du relief donnant une des deux parties du moule, et sur l'autre face, le joint et le relief de l'autre partie du moule. Après assemblage, ces deux parties doivent être en parfaite concordance (la surface de joint sépare le modèle en deux parties situées de part et d'autre d'une plaque d'épaisseur constante).

La plaque modèle double faces, porte souvent des tourillons qui sont montés dans des paliers de la machine à mouler et permettent à la plaque de tourner sur elle même. Une seule machine à mouler peut donc serrer alternativement les deux parties du moule en faisant faire à chaque fois un demi-tour à la plaque modèle.

b. Plaques modèles réversibles :

Cette plaque porte la même face, les modèles des deux faces d'une plaque double faces. Elles sont disposées de façon que le moule permet la coulée de deux pièces à la fois. Donc elle est composée de deux parties identiques retournées l'une sur l'autre.

3.5.2. Machine à mouler

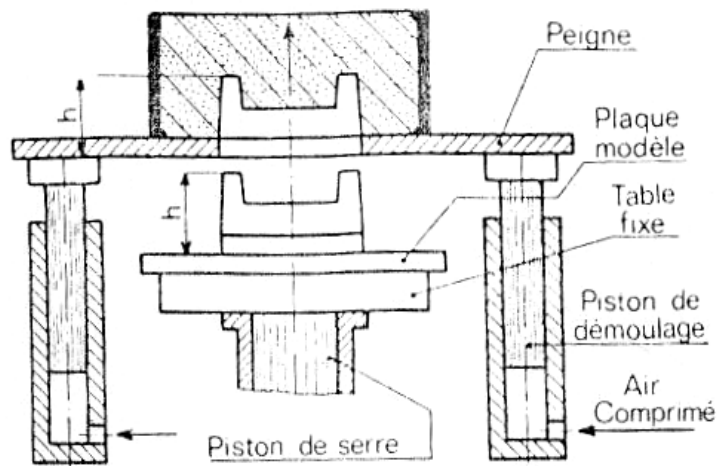
Les machines à mouler sont destinées au :

- Remplissage et serrage du sable dans le moule (moulage).
- Séparation du modèle du moule (démoulage).

Elles sont classées selon le principe de démoulage en :

a. Démoulage par montée du moule :

La table de travail demeure fixe dans sa position basse ou elle est revenue après la serrage du sable. Deux positions commandées mécaniquement ou par air comprimé soulèvent alors le moule, (fig. 214).

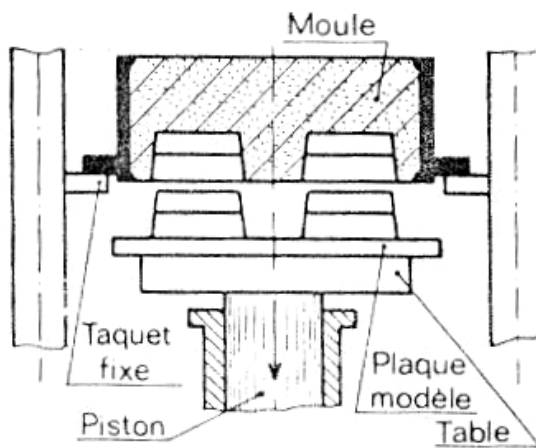


Démoulage par montée du moule.

(fig. 214)

b. Démoulage par descente du modèle

Le démoulage de la plaque se fait par descente de la table sur laquelle est fixée cette dernière, (fig. 215).

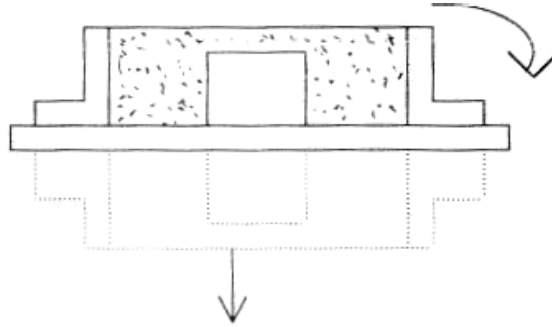


Démoulage par descente de la plaque

(fig. 215)

c. Démoulage par rotation de la plaque modèle :

Le démoulage est effectué grâce à la rotation de la plaque modèle.



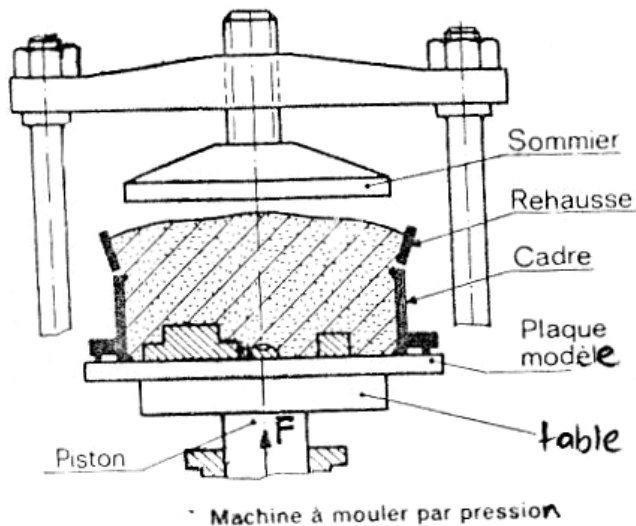
(fig. 216)

Selon la méthode de moulage et serrage du sable on distingue :

- Moulage par pression
- Moulage par secousses.
- Moulage par pression et secousses.
- Moulage par projection.

a. Moulage par pression :

La plaque modèle est généralement fixée sur la table de travail et reçoit le châssis surmonté d'une rehausse destinée à recevoir le volume du sable strictement nécessaire au serrage (fig. 217).

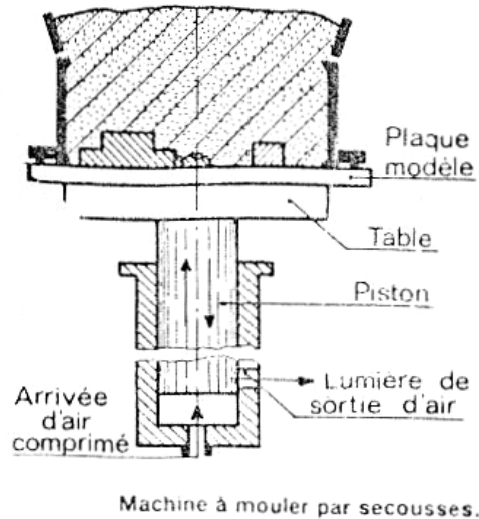


(fig. 217)

Le serrage du sable est possible grâce à la force de serrage F obtenue hydrauliquement, mécaniquement ou par air comprimé. Ce procédé donne une empreinte exacte, donc une pièce à faible tolérance, il est surtout utilisé pour les pièces à faible hauteur.

b. Moulage par secousses :

Un piston solidaire d'une table qui porte la plaque modèle et le châssis rempli de sable, le tout est soulevé à une hauteur (30 à 100 mm) grâce à l'air comprimé arrivant par l'entrée (fig. 218). Lorsque le piston arrive à l'orifice d'échappement, de l'air se dégage, ce qui provoque la chute brutale de la masse et donne le tassement du sable par inertie. Cette opération se répète périodiquement (30 à 60 fois pour chaque moule). La qualité du tassement du sable dépend du nombre de secousses et de la hauteur de la chute.



(fig. 218)

c. Moulage par secousses et pression :

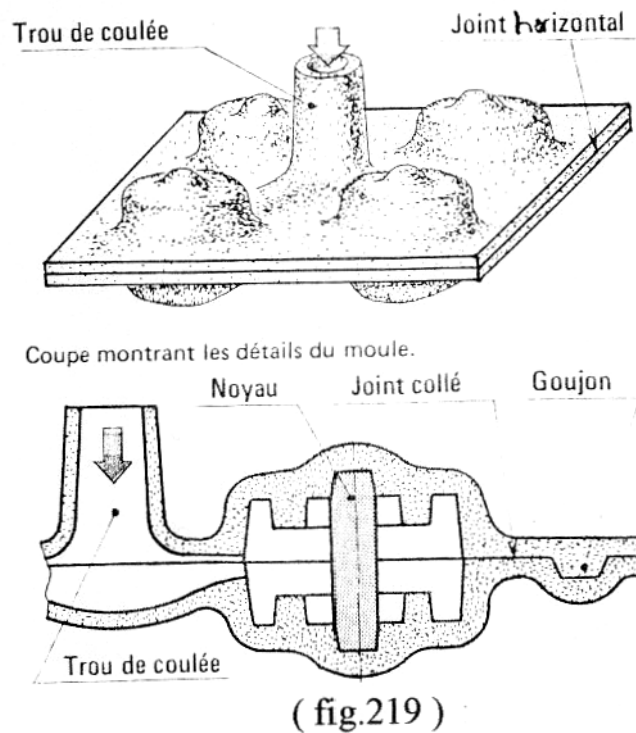
Afin d'éviter les inconvénients du moulage par pression et par secousses, on utilise actuellement la combinaison des deux principes où le serrage du sable est plus uniforme au sein de la masse entière du moule. Ce type de machines procèdent par secousses dans une première action et par pression dans l'action qui suit. Les inconvénients de ces machines est le développement de bruit.

3.6. Moulage en carapace (Procédé Croning)

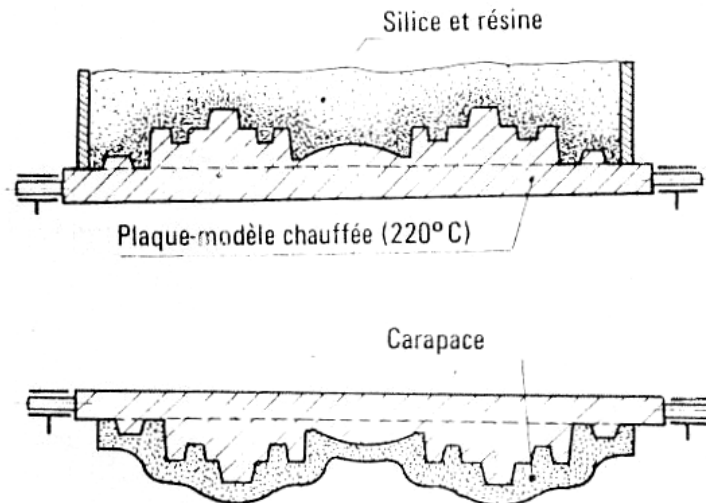
Le moulage en carapace est comme le moulage mécanique en sable et dont il a un aspect particulier. Le métal liquide est coulé dans un moule constitué de deux coquilles appelées carapaces ou masques (fig. 219).

Principe du procédé du moulage en carapace :

1. Préparation du sable de moulage (séchage. additions).
2. Chauffage de la plaque modèle (réversible) jusqu'à 200 à 300°C après pulvérisation d'une émulsion destinée à empêcher le collage ultérieur du masque. Le chauffage de la plaque est effectué par un dispositif incorporé à la machine et dont la puissance de chauffage est réglable.



3. Verser sur la plaque-modèle chauffée, un mélange de grains de silice (sable) et de résine thermodurcissable (indéformable à la chaleur après solidification). C'est ce mélange de sable qui est en contact de la plaque modèle chaude qui formera ainsi en 15 secondes une carapace solide d'épaisseur uniforme d'environ 5 mm et qui constitue le moule (fig. 220).

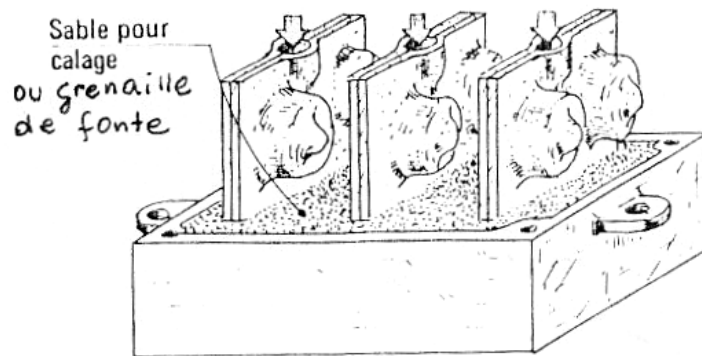


(fig. 220)

4. L'ensemble caisson et plaque modèle est retourné (basculé) pour laisser tomber le mélange de sable et de résine qui n'a pas adhéré à la plaque modèle.

5. La plaque modèle et la carapace sont ensuite placées dans une étuve pendant 1 à 2 minutes à la température de 350°C. La carapace devient alors très dure et rigide. La surface intérieure en contact avec la plaque modèle est parfaitement lisse, ce qui va donner à la pièce moulée un très bon état de surface.
6. La deuxième partie est préparée identiquement mais la plaque modèle est munie de mandrin de coulée facilement adaptable et démontable.
7. Les carapaces ainsi formées sont assemblées, éventuellement avec des noyaux collés. Les trous d'évent ne sont pas indispensables. Les carapaces étant perméables. Après l'assemblage, le moule est alors prêt pour la coulée.
8. Les pièces moulées sont décochées facilement en brisant les carapaces et le sable de moulage est régénéré ensuite (réutiliser).

Les moules à joints verticaux sont placés dans un châssis et calés avec du sable ou de la grenaille de fonte (fig. 221).



(fig. 221)

Lors de la coulée, la résine brûle en contact avec le métal en fusion en provoquant une excellente porosité. Ce procédé s'applique à tous les métaux et permet d'obtenir des pièces brutes avec des tolérances dimensionnelles et de formes beaucoup plus faibles qu'avec le moulage en sable traditionnel. Les frais d'usinage sont alors diminués. Le coût de fabrication élevé de la plaque modèle et le prix non négligeable de la résine font que ce procédé n'est utilisé que pour mouler des pièces petites ou moyennes en grande série.

3.7. Moulage à la cire perdue

Les différents procédés de moulage étudiés précédemment partent tous du principe suivant : le moule est en deux ou plusieurs parties afin de pouvoir en sortir le modèle ou donner l'empreinte voulue à chacune des parties. L'expérience montre qu'un tel moule, même si les différentes parties sont assemblées avec beaucoup de soins, ne permet pas d'atteindre une grande précision.

De l'idée de faire un moule en une seule pièce pour obtenir un moulage très précis, le moulage à la cire perdue est un moulage de précision dont le but est de supprimer tout ou

en partie l'usinage s'il y a lieu. La précision maximum pratiquement obtenue est de l'ordre de $\pm 0,07\text{mm}$ est couramment de 0,3 % en valeur relative.

Ce mode de moulage est connu depuis la plus haute antiquité. Les chinois et les grecs l'utilisent pour la fonderie d'objet d'art, il s'est conservé à peu près intégralement pour la fonderie artistique et s'est perfectionné de nos jours pour la coulée de bijouterie et la fabrication de prothèses dentaires en or ou en acier inoxydable, exigeant une grande précision. Il s'est enfin étendu à la production de petites pièces mécaniques à partir de tous les alliages.

Principe du procédé du moulage à la cire perdue :

Le moule est construit autour d'un modèle en cire, lequel ensuite est éliminé par fusion pour libérer l'empreinte formée. L'obligation de détruire le modèle enfermé, impose de fabriquer, non seulement un moule par pièce, mais un modèle par moule II faut donc fabriquer en série des modèles fusibles.

La gamme de fabrication d'une pièce par ce procédé est la suivante :

1. Créer un modèle inerte généralement en bronze ou en laiton usiné avec une grande précision et parfaitement polis. Ses dimension sont déterminées en tenant compte des retraits de la cire, du métal coulé et de la dilatation du revêtement réfractaire du moule.
2. Confectionner une coquille à l'aide du modèle inerte ou confectionner une coquille de mutable reproduisant rigoureusement le modèle inerte.
3. Injecter la cire sous pression dans la coquille pour obtenir successivement autant de modèles fusibles qu'on le désire. Aujourd'hui on remplace de plus en plus la cire par une résine thermoplastique telle que la polystyrène qui commence à fondre vers 150 à 200°C et brûle à 450°C et n'est pas récupérée. Les grappes de modèle sont obtenus directement par injection de polystyrène dans des moules métalliques portant les empreintes.
4. La trempe et enveloppement du modèle s'effectue par projection d'une très fine couche (quelque dixième de mm) d'un enduit réfractaire très fin (silice et liant) ensuite séchage à l'air.
5. Fusion du modèle perdu par élimination du modèle par chauffage à une température de 200°C.
6. Confection du moule et coulée du métal.

Applications :

Tous les métaux ferreux et non ferreux peuvent être moulés par ce procédé. On peut classer les applications d'après la nature des alliages comme suit :

- Alliages réfractaires ou inoxydables.
- Alliages impossibles ou difficiles à forger et à usiner.

- Alliages faciles à usiner mais dont l'usinage ultérieur serait trop complexe.

Les pièces fabriquées ont un poids variant de quelques grammes à quelques kilogrammes. Des épaisseurs de l'ordre du demi-millimètre peuvent être obtenues. Ce procédé permet d'obtenir le moulage de pièces de formes très compliquées, irréalisables par les autres procédés de moulage. Il permet aussi la fabrication d'outils en acier rapide ou en alliages spéciaux à coupe ultra rapide, à leur forme définitive et utilisables sans autre usinage que l'affûtage.

3.8. Moulage en moule métallique

On a vu que les procédés de moulage déjà étudiés exigent la destruction du moule pour récupérer la pièce moulée. Certes le moulage en sable est le plus répandu, mais il présente beaucoup d'inconvénients tels que :

- Il exige une importante quantité de sable et des équipements pour la préparation du sable de moulage.
- Les pièces obtenues ne sont pas précises et présentent des surépaisseurs, ce qui exige des opérations d'usinage coûteuse.

Le souci d'obtenir avec un moule permanent une série de pièces dont la forme et les dimensions soient identiques a conduit à la réalisation de moules métalliques permettant deux méthodes de moulage.

- Moulage à la pression atmosphérique ou moulage en coquille.
- Moulage sous pression.

3.8.1. Moulage en coquille

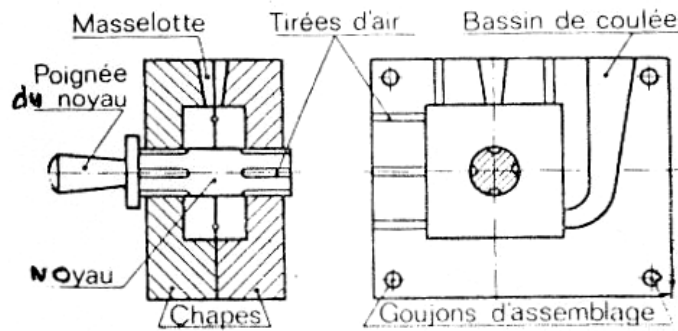
Le moulage en coquille est un procédé qui permet de couler par gravité le métal en fusion directement dans un moule métallique en fonte ou en acier appelé coquille.

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).

Le moule est constitué de deux ou plusieurs parties appelées chapes, formant l'empreinte, de trou de coulée et les événements (fig. 222), les chapes sont solidement assemblées pendant la coulée du métal afin d'éviter leur séparation.

Le métal liquide remplit les cavités du moule sous l'effet de son propre poids (par gravité). Les masselottes, le trou de coulée doivent être situés dans le plan de joint avec des formes permettant le démoulage.

Les joints ont généralement des surfaces finement striées, ce qui permet l'évacuation des gaz lors de la coulée du métal. Dans certains cas les événements sont réalisés dans les noyaux.



Moule pour coulée en coquille.

(fig. 222)

Les coquilles résistent à quelques centaines de coulées et pour élever la ténacité de leur surface intérieures qui entrent en contact avec le métal en fusion, elles sont protégées par un film d'enduit appelé poteyage. La nature de ce dernier permet ainsi d'agir sur l'intensité des échanges thermiques entre pièce et moule. L'enduit est porté sur la surface par pulvérisateur ou un pinceau.

Avant chaque moulage, les coquilles sont chauffées jusqu'à une température de 200 à 350°C (tout dépend de la température de coulée du métal), afin d'éviter le refroidissement trop rapide du métal, dans certains cas le chauffage doit être poursuivi pendant la coulée. C'est lorsque le métal est suffisamment solidifié, qu'on procède au démoulage de la pièce.

Donc les opérations à effectuer pour chaque coulée sont :

- Poteyage du moule.
- Fermeture du moule et mise en place de la broche.
- Coulée du métal.
- Quand le métal est solidifié, extraction de la broche et ouverture du moule.
- Démoulage de la pièce.

Les avantages du moulage en coquille sont :

- Précision dimensionnelle.
- Bon état de surface.
- Réduction des surépaisseurs d'usinage.
- Rendement assez élevé.
- Réduction du rebut.
- Texture plus fine et caractéristiques mécaniques élevées.

Le seul inconvénient réside dans le prix de revient des coquilles qui est très cher.

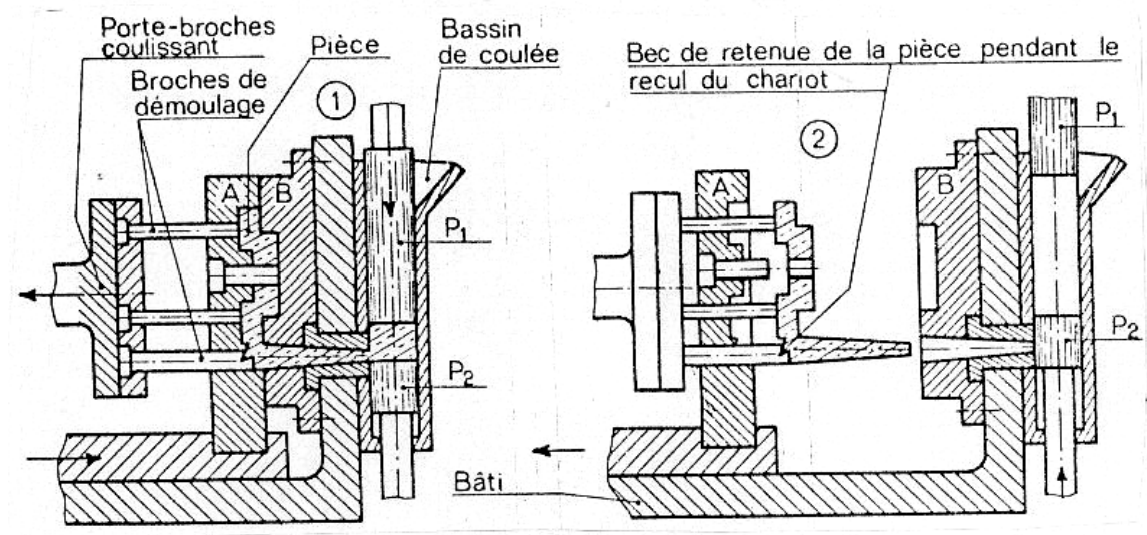
3.8.2. Moulage sous pression

Dans ce procédé, le métal liquide est injecté dans le moule de la machine à mouler sous pression (30 à 100 MPA). Ce procédé permet d'obtenir des pièces ayant une configuration très compliquée avec des dimensions très précises, ce qui permet de supprimer partiellement

ou totalement l'opération d'usinage.

A cause des coûts très élevés des moules, le moulage sous pression est rentable seulement pour des productions en série. Donc les machines à mouler sous pression permettent de réaliser de très grandes séries et avec des cadences de production extrêmement rapides (1000 pièces de faible volume/heure) et sont destinés surtout pour les alliages tels que Plomb, Zinc, Aluminium, Magnésium, Cuivre, etc.

Les machines, quelque soit le type, comprennent toujours un dispositif de fermeture et d'ouverture du moule avec serrage énergique au moment de l'injection du métal sous pression. Le moule comprend deux blocs (chapes), l'un fixé sur le bâti de la machine et sur lequel l'empreinte doit être minimum et l'autre est monté sur le chariot mobile de la machine à mouler et comportant la majeure partie de l'empreinte. ainsi que les éjecteurs qui éjectent la pièce moulée (fig. 223).



(fig. 223)

La chape B est solidaire du bâti de la machine, l'autre chape A est montée sur un chariot qui assure la fermeture et l'ouverture du moule. Lorsque le moule est fermé, le piston P_2 est au niveau inférieur du trou de coulée et le piston P_1 est en position haute. Le métal versé dans le cylindre et ensuite pressé par le piston P_1 , emplit le moule jusque dans ses moindres détails. Après refroidissement, le piston P_2 monte et sectionne le talon de coulée, le chariot recule entraîne avec lui la pièce hors de la chape B et le porte-broches la détache.

Le moulage sous pression peut se faire sans dépouille et il assure une précision d'un dixième de mm évitant tout usinage pour certaines pièces d'automobile, d'appareils ménager ou électriques, d'horlogerie, de jouets.

Pour résister aux fortes pressions de moulage, les moules sont façonnées dans des aciers spéciaux, pour maintenir la température du moule constante, ces derniers sont refroidit ou chauffés.

Il est possible d'insérer dans le moule, avant chaque coulée, des éléments métalliques

afin :

- D'assurer une plus grande résistance, dureté ou autres propriétés (axe en acier, bague en bronze etc.
- De réaliser des conduites qui ne peuvent pas être noyautées (tube).
- D'assurer un assemblage qui serait plus difficile et coûteux par d'autres moyens.

Le poteyage de l'empreinte du moule est nécessaire afin d'éviter le collage des pièces et faciliter le démoulage. L'application du produit de poteyage est effectuée sur les parties de l'empreinte là où il y a risque d'étamage (broche, points chauds etc.), on évitera ainsi le dépôt de poteyage qui serait dû à une application massive et ponctuelle.

La composition du produit de poteyage est variable peut être d'un mélange de plomb, d'eau, de silicate de soude etc.

Principe de fonctionnement du moulage sous pression :

La chape solidaire du bâti de la machine est la chape fixée sur le chariot mobile assurant la fermeture et l'ouverture du moule forment principalement le moule de coulée.

Après la mise en place du noyau, s'il y a lieu, et lorsque le moule est fermé, le métal liquide est versé manuellement à l'aide d'une louche ou automatiquement dans l'orifice de coulée. Ensuite commence le mouvement d'injection qui se compose de 3 phases réglables et dépendantes l'une de l'autre.

- **1^{ère} Phase** : Approche lente du piston de conduite du métal vers l'empreinte du moule.
- **2^{ème} Phase** : Mouvement à grande vitesse du deuxième piston pour injection, ou remplissage du moule.
- **3^{ème} Phase** : Pression de maintien, après remplissage du moule, elle agit sur le métal encore liquide en donnant une densité plus élevée à la pièce coulée.

Après refroidissement, le piston revient dans sa position initiale et suivi par l'ouverture du moule, qui s'effectue par déplacement du chariot avec la chape mobile, ce dernier entraînera avec la pièce refroidit hors du moule fixe et le détachement de la pièce s'effectuera par éjection.

Tout le cycle de l'opération s'effectue automatiquement.

Les paramètres essentiels pouvant exercer une influence sur la qualité des pièces coulées sous pression sont :

- La température de coulée du métal liquide.
- La température du moule.
- Le volume du dosage.
- La pression d'injection.
- La durée du cycle d'injection.
- Le réglage de la machine.

3.9. Moulage par centrifugation

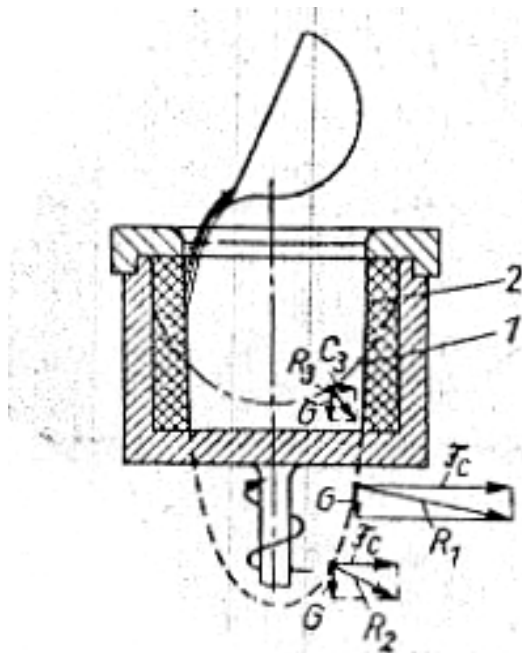
La densité d'un métal coulé, dépend essentiellement de la pression P avec laquelle le métal liquide se trouve durant le processus de refroidissement. Pour la coulée normale (par gravitation), la pression P est déterminée à partir de la hauteur de coulée du métal liquide dans le moule et de sa densité.

Une pression importante peut être obtenue grâce à une rotation rapide du métal liquide dans le moule. Suite à la rotation du métal liquide coulé, les particules sont soumises à une force centrifuge de la forme :

$$F_c = m r \cdot \omega^2 \quad [\text{N}]$$

La force centrifuge peut être augmentée, par augmentation du nombre de tours (vitesse angulaire) et ce qui conduit à l'augmentation de l'action de la force de pesanteur. Cette augmentation répartit toute la nasse du métal liquide uniformément sur toute la longueur du moule cylindrique.

La figure 224 représente comment les particules du métal liquide sont réparties suivant les différents vitesses.



(fig. 224)

1. Pour de petites vitesses.
2. Pour des vitesses élevées.

F_c : Force centrifuge.

G : Poids.

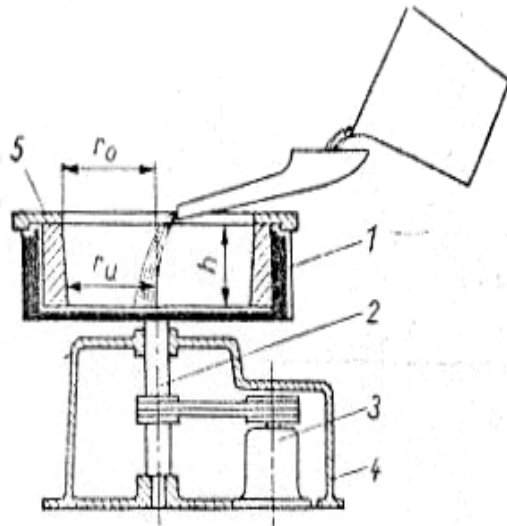
R : Force résultante.

La coulée par centrifugation s'est beaucoup développée en raison des avantages qu'elle présente. Ce procédé est utilisé surtout pour les pièces de révolution tels que tubes, couronnes, etc.

En général le moule est métallique, mais il peut être garni intérieurement d'un revêtement réfractaire. Le métal liquide est coulé à partir d'une poche à travers une gouttière, le volume du métal coulé est déterminé à l'avance. Le remplissage du moule se fait soit par la

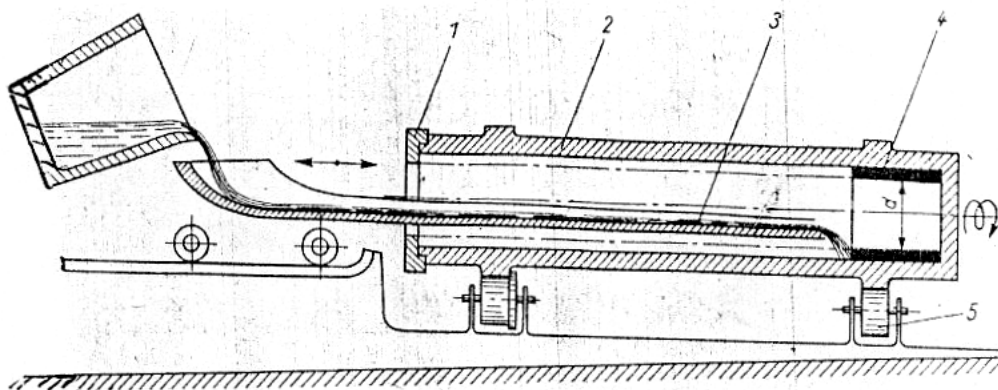
rotation du moule, soit par rotation de la gouttière. Le moulage par centrifugation peut être vertical (fig. 225) ou horizontal (fig. 226).

Le moulage horizontal est utilisé lorsque la longueur du cylindre à mouler est très supérieure à son diamètre.



1. Coquille.
2. Arbre de transmission.
3. Moteur.
4. Carcasse.
5. Couronne de déversement

(fig. 225)



(fig. 226)

1. Couronne de déversement
2. Coquille.
3. Entonnoir de coulée.
4. Tube coulé.
5. Galet

Les avantages que présente ce procédé sont :

- Aucune perte de métal.
- Propriétés mécaniques élevées du produit coulé.
- Structure à grains fins.

- Possibilité d'obtenir des pièces bimétalliques.
- Rendement élevé.

L'inconvénient réside dans le coût élevé des équipements et installations.

3.10. Défauts de moulage (de fonderie)

La diminution ou l'élimination des défauts des pièces moulées est une question économique importante. Une solution rapide peut aider à augmenter la qualité des pièces moulées et diminuer le pourcentage de rébus.

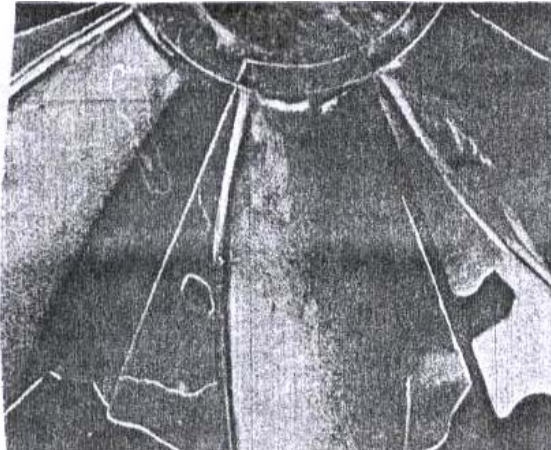
Les défauts de fonderie sont classés selon leurs aspects et leur formes d'apparition. Chaque défaut peut entraîner une diminution de la qualité, c'est l'étendu du défaut et la destination d'utilisation de la pièce qui décident, si cette dernière est considérée comme rébus ou non. Beaucoup de défauts peuvent être éliminés par un traitement ultérieur.

Dans cette partie, nous allons traiter les types de défauts rencontrés le plus souvent en moulage.

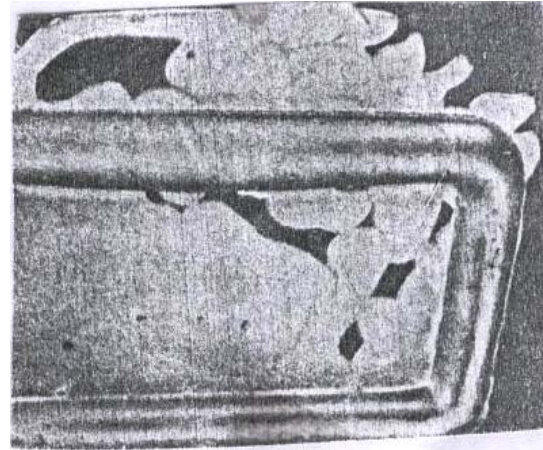
3.10.1. Défauts affectant la surface

Ce sont des défauts non souhaités tels que saillies, bavures, épaissements qui sont visibles à l'œil nu et se différencient suivant leur forme et leur cause de formation. Ils n'affectent généralement pas la qualité de la pièce, mais exigent des opérations supplémentaires d'usinage.

Ce sont, le plus souvent, les bavures, les épaissements, les saillies, etc. Leur formation s'effectue généralement dans le plan de joint du moule et au niveau du noyau.

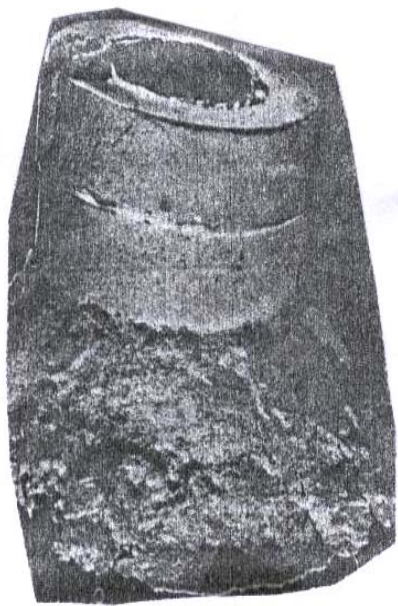


(fig. 227)

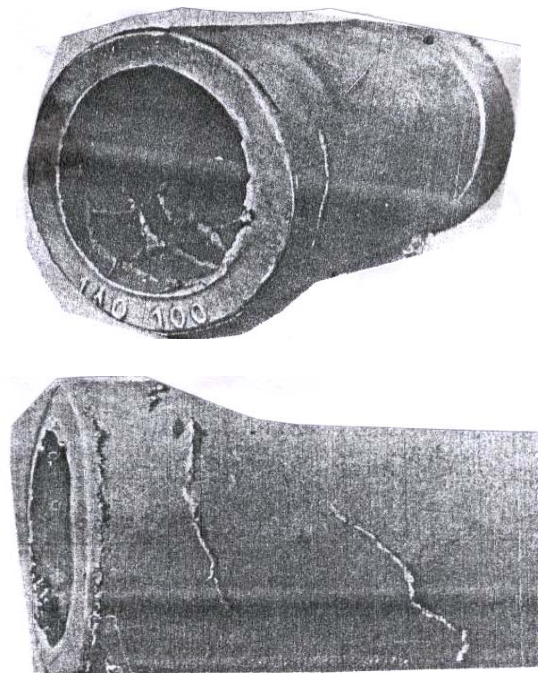


(fig. 228)

Et aussi à cause du décollement (détachement) dans le moule ou fissuration du sable de moulage ou sable de noyau comme le montrent les figures 229 et 230.

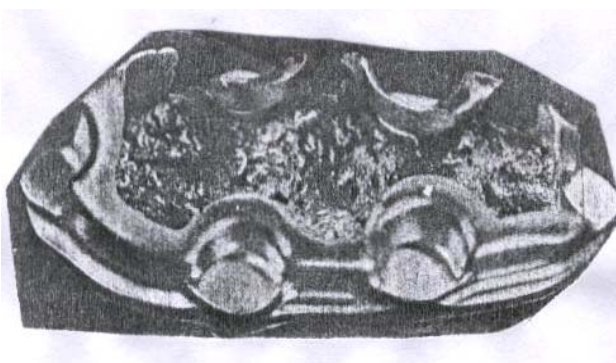


(fig. 229)

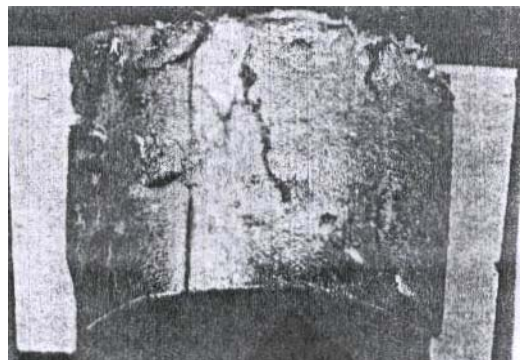


(fig. 230)

Ou encore à des arrachements de sable sur les figures 231 et 232.



(fig. 231)

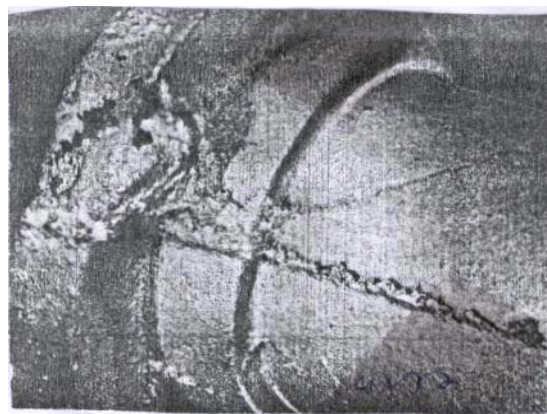


(fig. 232)

Ecrasement du moule et du noyau sur les figures 233 et 234.

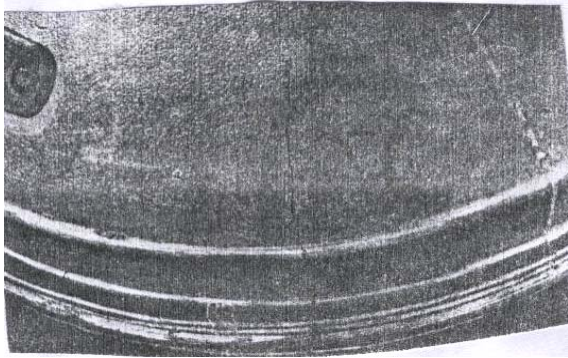


(fig. 233)

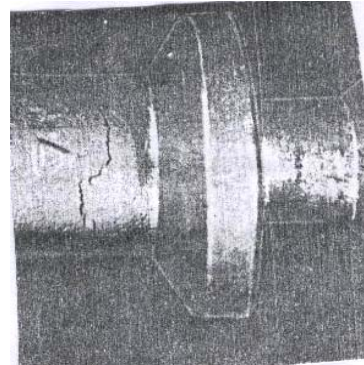


(fig. 234)

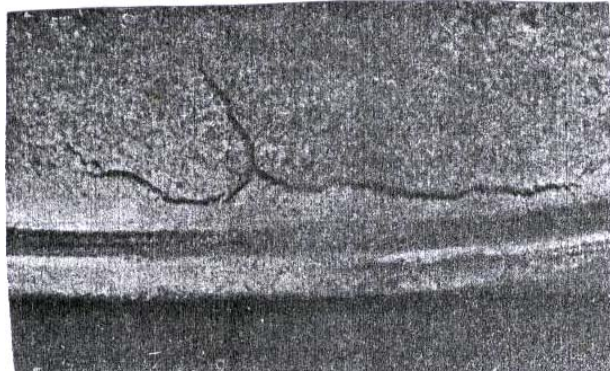
Les criques, fêlures et ruptures sont dues aux tensions internes provenant des retraits de refroidissement et apparaissent souvent après une longue période d'utilisation et à la suite de chocs comme le montrent les figures 235, 236 et 237.



(fig. 235)



(fig. 236)

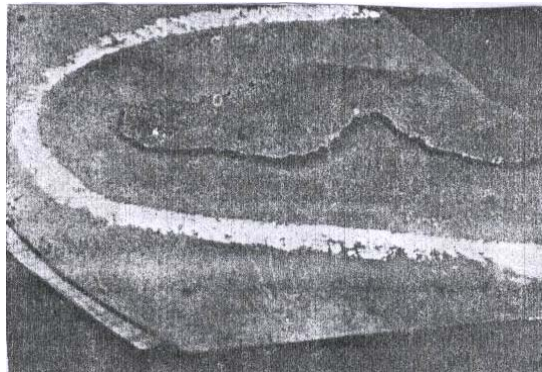


(fig. 237)

D'autres types de défauts pouvant exister sur les pièces moulées sont :

- Rugosité superficielle.
- Différence de forme et de dimension.
- Pièce moulée incomplète.

Un autre type de défaut est celui des brûlures du sable apparaissant lors de la coulée à haute température. Ce type de défaut n'est pas rencontré dans les alliages d'aluminium (fig.238).

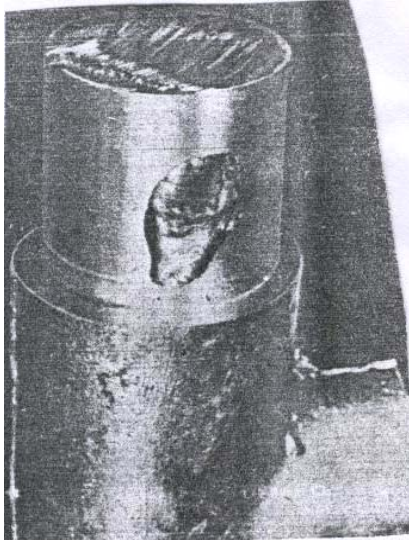


(fig. 238)

3.10.2. Défauts affectant la masse ou le volume

Ils ne sont pas tous perceptibles à l'œil nu, mais leur présence influe sur les propriétés mécaniques des pièces. Parmi ces défauts, on distingue :

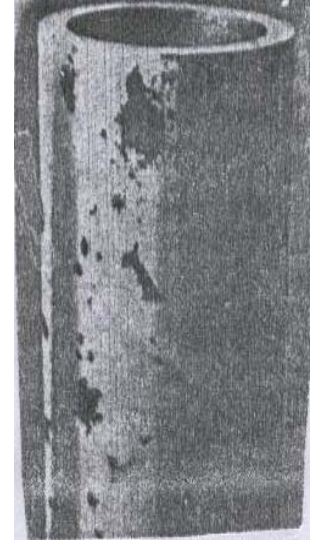
- **Les inclusions d'air** : (figures 239, 240 et 241).



(fig. 239)



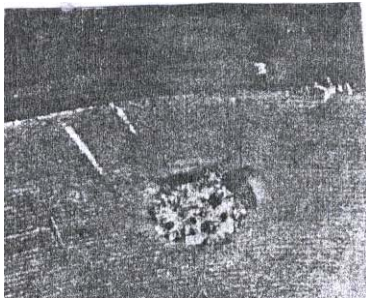
(fig. 240)



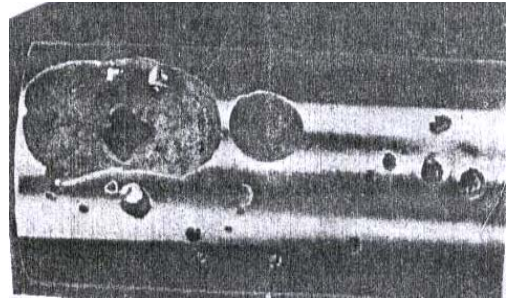
(fig. 241)

- **Les soufflures** :

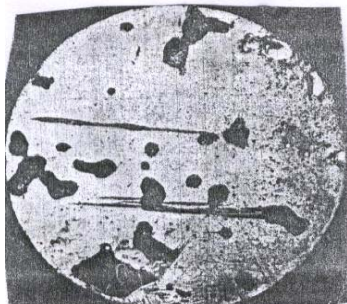
Les gaz dissous dans le métal liquide provoquant des creux et le plus souvent à cause d'une serre du sable de moulage localement trop prononcée. Des exemples de soufflures sont donnés sur les figures 242, 243, 244 et 245.



(fig. 242)



(fig. 243)



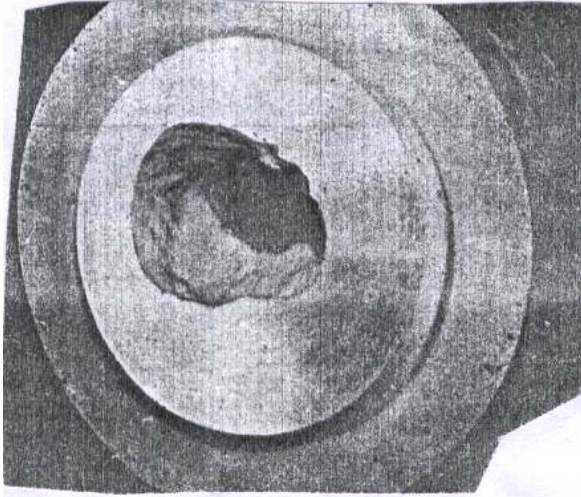
(fig. 244)



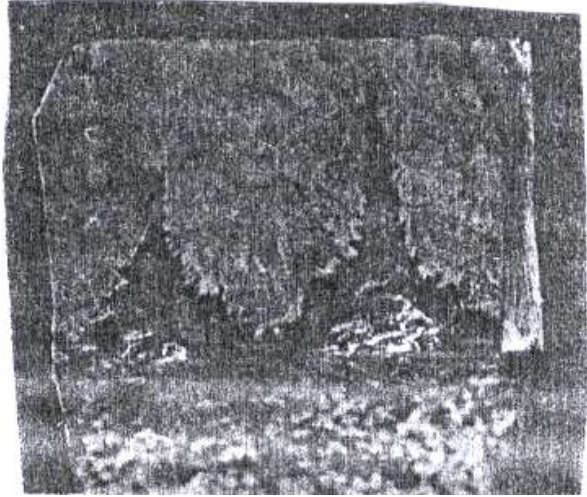
(fig. 245)

- Les retassures :

Presque tous les métaux et alliages présentent à de basses températures une grande densité qu'aux hautes températures, ce qui conduit à une contraction du volume (défaut) lors du refroidissement, c'est à dire, les parois minces se refroidissent en premier et les masses adjacentes se creusent. Ce retrait du métal est appelé retassure. Les exemples sont donnés dans les figures 246, 247, 248 et 249).



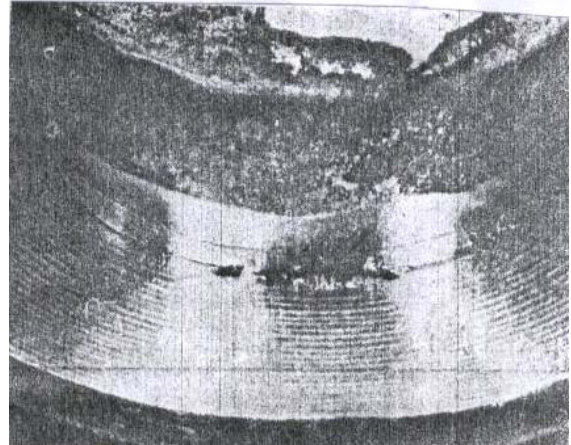
(fig. 246)



(fig. 247)



(fig. 248)



(fig. 249)