

# Chapitre I

## Notions de Fonderie

### I.1. Généralités

La fonderie est une activité de mise en forme. Elle est l'ensemble des opérations et des moyens qui permettent de produire des pièces brutes par moulage. La fonderie fait fondre des métaux ferreux, non ferreux et des alliages et les refaçonnent en produit de forme finie ou quasi finie par l'intermédiaire de la fonte en poche et de la solidification du métal fondu ou de l'alliage dans un moule. Donc elle englobe l'ensemble des techniques de mise en œuvre pour obtenir un objet par coulée d'un métal en fusion dans une empreinte appelée moule qui peut être en sable ou métallique.

L'industrie de la fonderie est une industrie différenciée et diverse. Elle consiste en un large éventail d'installation, de la plus petite à la plus grande taille; chacune avec une combinaison de technologie et d'opérations de l'unité de production choisies pour correspondre à l'instant, la taille de la série et le type de produit fabriqué dans l'installation spécifique.

Lemoulage est la reproduction d'un objet au moyen d'un moule. Il définit aussi l'action de verser dans des moules des métaux en fusion. Le moulage permet d'obtenir des pièces pleines ou creuses pouvant présenter des formes très compliquées, on réalise ainsi une sensibilité économie de matière et on réduit considérablement les frais d'usinage. Lemoulage des métaux s'effectue dans des fonderies, car il faut fondre le métal pour obtenir son état pâteux ou liquide. Actuellement le moulage en fonderie est encore le moyen le plus important de production des pièces.

La pièce obtenue doit répondre à quelques critères, en particulier, elle doit:

- Etre exempte de défauts apparents ou cachés; c'est la santé;
- Présenter la forme et les dimensions requises pour son utilisation; c'est la précision dimensionnelle;
- Etre susceptible de se laisser façonner à l'aide des outils courants; c'est l'usinabilité;
- Présenter une résistance suffisante vis-à-vis des diverses sollicitations auxquelles elle sera soumise afin d'assurer une tenue en service acceptable; c'est la résistance mécanique;

La réalisation d'une pièce de fonderie nécessite diverses opérations qui doivent se suivre :

- 1) Le modelage : confection des modèles,
- 2) Le moulage : confection des empreintes,
- 3) La fusion : obtention du métal liquide à partir de minerais et de lingots dans des fours,
- 4) La coulée : remplissage des moules à l'aide du métal liquide recueilli dans des poches de coulée,
- 5) Le décochage : extraction de la pièce par destruction du moule par vibrations,
- 6) Le dessablage : nettoyage des pièces par brosse métallique, par jets de sable ou de grenailles, etc...,
- 7) L'ébarbage : enlèvement des parties supplémentaires de métal : bavures, jets de coulée, etc... à l'aide de burin manuel, pneumatique, de meule à découper, etc...

### I.2. Vocabulaire technique utilisé en fonderie

**Modèle** : objet destiné à être reproduit. Il est l'œuvre du modèle.

**Moule** : corps suffisamment solide, façonné pour recevoir un métal ou un alliage en fusion.

**Châssis** : cadre en métal destiné à maintenir le sable comprimé autour du modèle (moulage non permanent).

**Dépouille** : elle est prévue sur le modèle afin de l'extraire sans provoquer l'effritement du sable lors de sa sortie.

**Masselotte** : excédent de matière qui permet de déplacer la retassure hors de la pièce.

**Retassure** : principal défaut de fonderie dont la cause est due à la contraction de l'alliage lors de sa solidification.

**Joint de moule (plan de joint)** : séparation entre les châssis. Une pièce peut être réalisée avec plusieurs châssis donc plusieurs plans de joints.

**Noyau** : réalisé en sable, il permet d'obtenir les formes intérieures. Il est réalisé dans une boîte à noyau (moulage non permanent).

**Event** : canal destiné à faciliter l'échappement des gaz formés au moment où le métal chaud entre en contact avec la surface de l'empreinte (même l'air présent dans le moule).

**Décochage** : opération qui consiste à libérer la pièce du moule lorsque le métal est solidifié.

**Ebarbage** : opération qui permet d'enlever les différentes parties superflues (canaux d'alimentation, masselottes, événements ...) pour obtenir la pièce brute.

**Chape** : tout châssis intermédiaire entre le châssis supérieur et le châssis inférieur.

### I.3. Matériaux utilisés en fonderie et leurs propriétés

Les métaux et les alliages utilisés en fonderie sont nombreux, par ordre d'importance on trouve :

- Les alliages ferreux : les fontes (fonte malléable, fonte grise) et les aciers ;
- Les alliages d'aluminium ;
- Les alliages cuivreux : bronze, laitons, etc... ;
- Les alliages de magnésium ;
- Les alliages blancs : zinc, plomb, étain, etc...

Les métaux utilisés en fonderie doivent être fluides à la température de fusion afin de pouvoir remplir convenablement les moules. Pour cela, pendant le processus d'élaboration d'une pièce, il faut prendre en considération deux propriétés essentielles à savoir :

- Coulabilité ;
- Retrait.

#### I.3.1. Coulabilité

C'est l'aptitude du métal liquide (fondu) de bien remplir le moule et de reproduire fidèlement son empreinte. Si le métal a une bonne coulabilité, le métal forme sans difficulté tous les éléments de la pièce, et le remplissage du moule sera assuré. Dans le cas contraire (mauvaise coulabilité), le remplissage du moule sera défectueux et la pièce est généralement rebutée.

Une bonne coulabilité des métaux peut être assurée avec l'élévation de la température.

#### I.3.2. Retrait

On sait que tous les matériaux métalliques s'allongent sous l'effet de l'élévation de la température, et rétrécissent sous la diminution de cette dernière. A cet effet, et après une série d'essais effectués par des technologues spécialistes en fonderie, ils ont remarqué que les dimensions des pièces moulées sont inférieures à celle du modèle ; et que cette différence dans les dimensions provient principalement du phénomène physique de retrait du métal au refroidissement. Ajouté à cela, ils ont aussi constaté que le retrait se manifeste dans toutes les directions et varie avec la nature du métal et le volume de la pièce. Donc on constate une diminution de volume de la pièce au cours de passage de l'état liquide à l'état solide ou bien pendant le refroidissement avant et après solidification. Cette contraction ou variation de volume (dimensions) doit être compensée, elle est généralement exprimée en millimètre par mètre.

Les valeurs moyennes de retrait observées lors de l'expérimentation sont les suivantes:

- 10 millimètres par mètre (soit 1,0 %) pour les fontes ;
- 20 millimètres par mètre (soit 2,0 %) pour les aciers ;
- 12 millimètres par mètre (soit 1,2 %) pour l'aluminium et ses alliages ;
- 15 millimètres par mètre (soit 1,5 %) pour le cuivre et ses alliages.

Pour pallier à ce problème et afin de ne pas commettre d'erreurs, les spécialistes de fonderie ont mis à la disposition des modeliers des instruments de mesure telle que le mètre à retrait, au lieu d'un mètre ordinaire :

- Pour la fonte, le mètre à retrait a une longueur de  $1000 + 10 = 1010$  mm divisés en 1000 parties égales, c'est à dire que chaque division vaut réellement 1,01 mm
- Pour le bronze, un régle à retrait de 500 mm a une longueur de  $500 + 7.5 = 507,5$  mm divisés en 500 parties égales, c'est à dire que chaque division vaut 1,015 mm

### I.4. Modelage et surépaisseur d'usinage

La confection du modèle qui servira à réaliser le moule, d'où sortira la pièce coulée (fondue) est appelé modelage. Le modèle est fabriqué à partir du dessin de définition de pièce à exécuter avec des dimensions légèrement accrues afin de compenser le phénomène de retrait du métal au refroidissement ; et doit être solide, précis et conservé cette précision d'origine malgré les manipulations répétées. Les modèles peuvent être monobloc ou être en deux ou plusieurs parties, dans ce cas chaque partie doit être pourvue d'une cheville et d'un trou, qui se correspondent pour assurer un alignement précis lors de l'assemblage. On attribue aussi généralement une légère pente appelée dépouille aux modèles afin de pouvoir les extraire sans abîmer le moule. Cette dépouille a souvent une valeur de 2 % sur la cote considérée. Pour des pièces à exécuter en grandes séries et avec des tolérances dimensionnelles serrées, les modèles sont métalliques et comportent les dispositifs de moulage, des orifices de coulée, des masselottes, des éventails. Bien entendu, ces modèles seront mis au point et

retouchés à l'occasion de chaquenouvelle mise en fabrication. Dans le cas de petite et moyenne série et de faibleprécision on peut utiliser un modèle aussi peu onéreux habituellement réalisé enbois. On peut aussi, en moulage main, surmouler une pièce irréparable que l'onutilise comme modèle pour fabriquer une pièce de remplacement.Lorsque les pièces présentent des évidements, le moulage avec noyau s'impose. Les noyaux sont façonnés dans des boîtes à noyaux cloisonnées. Après façonnage, ils sont cuits dans un four jusqu'à ce qu'ils soient assez résistants pour être manipulés.

Les surfaces fonctionnelles qui doivent satisfaire à de rigoureuses conditions de position et de précision sont usinées. Pour satisfaire cette condition, il est nécessaire de prévoir de la matière en surplus par rapport à la cote finie. Ce surplus de matière est appelé surépaisseurd'usinage. Il est calculé en processus de fabrication après unesimulation d'usinages et calcul du brut à partir d'une condition de fabrication sa valeur ne peut être fixée d'une manière absolue. Elle est fonction des spécifications géométriques, des tolérances dimensionnelles adoptées, du procédé d'usinage, des dimensions de la pièce et l'importance de la série. Par conséquent les dimensions à donner au modèle doivent tenir compte d'unretrait au refroidissement, éventuellement les portés des noyaux et prévoir lessurépaisseurs d'usinage. Il est bien évident que la qualité du modèle influeconsidérablement sur la qualité des pièces.

On adopte généralement l'ordre de grandeur suivant :

- 3 à 12 mm pour les moulages en fonte et en acier ;
- 1 à 6 mm pour les moulages en aluminium, en cuivre et de leurs alliages.

### I.5. Sable de fonderie

Le sable utilisé en fonderie contient suffisamment d'argile pour qu'une légère humidification avant usage lui donne de la cohésion. Pour cela, les qualités exigées d'un sable de fonderie sont les suivantes :

- **Infusibilité** : Le sable de fonderie doit avoir une résistance aux températures élevées. Cette qualité est obtenue grâce à l'utilisation d'une forte proportion de silice de 75 à 90 % ;
- **Plasticité** : C'est l'aptitude à épouser les formes du modèle. L'utilisation d'une faible proportion de résine avec le sable lui donne cette condition ;
- **Cohésion** : C'est l'aptitude à la conservation des formes. Elle s'obtient en incorporant au sable de 5 à 15 % d'argile et environ 8 % d'eau ;
- **Perméabilité** : Afin de permettre aux gaz formés durant la coulée d'être évacués sans difficulté, le sable formant le moule doit être perméable pour qu'ils puissent sortir. Cette perméabilité dépend de la grosseur des grains, et de l'intensité avec laquelle le sable a été comprimé (pressé). Pour améliorer la perméabilité, on ajoute de la houille (charbon) en poudre pulvérisée dans le sable. Les petites particules brûleront lors de la coulée du métal liquide, ce qui laissera des vides (infiniment petits) qui permettront aux gaz de s'évacuer ;
- **Recyclage** : Une économie de matériaux est assurée par recyclage des sables, après régénération et contrôle des caractéristiques.

### I.6. Moulage avec noyau

Les parties intérieures d'une pièce sont souvent des parties en contre dépouille.Pour réaliser ces formes, on place des masses de sable aggloméré ou des brochesmétalliques coulissantes à l'intérieur de l'empreinte. Ces masses de sable sontobtenues dans des boites à noyaux. L'empreinte est complétée par des portéesqui permettent de tenir le noyau dans le moule.

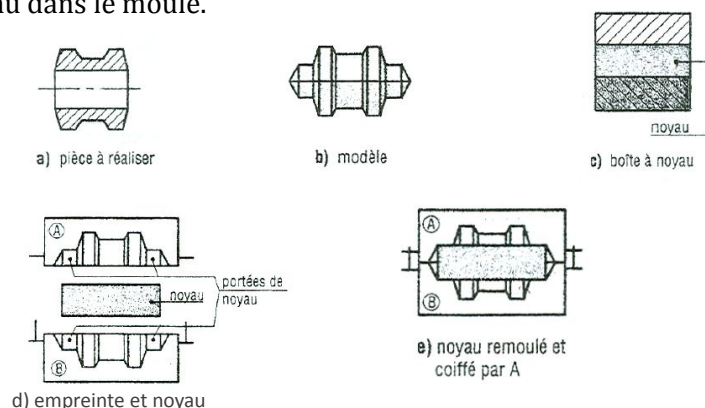


Figure1 : Moulage avec noyau

Les noyaux doivent être :

- Solide afin de résister à la poussée que le liquide exerce sur lui ;
- Perméable aux gaz produits au moment de la coulée ;
- Infusible pour éviter la pénétration à l'intérieur du métal ;
- Pouvoir se désagréger facilement après la coulée, pour qu'on puisse aisément enlever le sable demeuré dans les parties creuses des pièces.

### I.7. Moulage au sable

Le sable est serré à l'intérieur d'un châssis, cadres rigides généralement métalliques pourvus de poignées de manœuvres, de dispositifs de repérage (Figure1). Un moule comporte au moins deux parties ; avec des surfaces de séparation appelées joint. Ce joint doit passer par une section maximum du modèle pour que celui-ci puisse être enlevé après serrage, sans détérioration du moule ; les arrachements de sable sont à éviter par la pente ou la dépouille (Figure2).

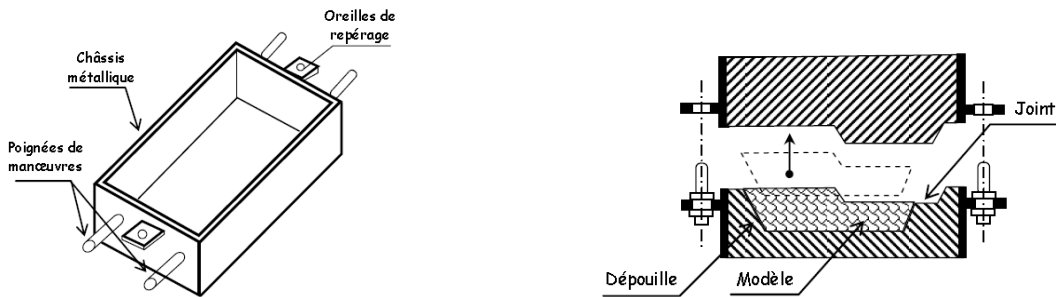


Figure2: Schéma d'un châssis Figure3: Présentation des moules

#### I.7.1. Moulage naturel sur modèle

Le moulage à l'aide de modèles de forme simples, et ne présentant pas d'évidements importants, est appelé moulage naturel sur modèle. Le modèle exécuté auparavant par le modelleur et ayant une forme semblable à la pièce définie par le dessin va être utilisé afin de fabriquer le moule.

Les principales phases d'exécution d'un moule sont (Figure3) :

- 1) Mise en place du modèle sur le marbre à l'intérieur du châssis supérieur et remplissage de ce dernier par le sable (le modèle est posé sur un fond) ;
- 2) Tourner le châssis supérieur de 180° et faire un lissage du joint, en passage de l'enduit (pour éviter le collage des deux parties) et serrage du dessus ;
- 3) Mise en place du noyau, pour la réalisation des évidements au sein de la pièce (les noyaux fabriqués dans une boîte à noyaux) ;
- 4) Remplissage de ce dernier par le sable (le modèle est posé sur un fond) ;
- 5) Séchage du sable (par chalumeaux ou sous des étuves) à une température de 200 à 250 °C,
- 6) Enlèvement du modèle ;
- 7) Nettoyage à l'aide l'air comprimé ;
- 8) Réparation des dégradations éventuelles des parois ;
- 9) Exécution des tranchées de coulées (chenal de coulée, trou de coulé, trous évents. etc...) ;

Notons, que pour éviter la séparation des deux parties du moule sous la poussée du métal liquide au moment de la coulée, les deux châssis doivent être solidement réunies (par agrafes ou charges pesantes).

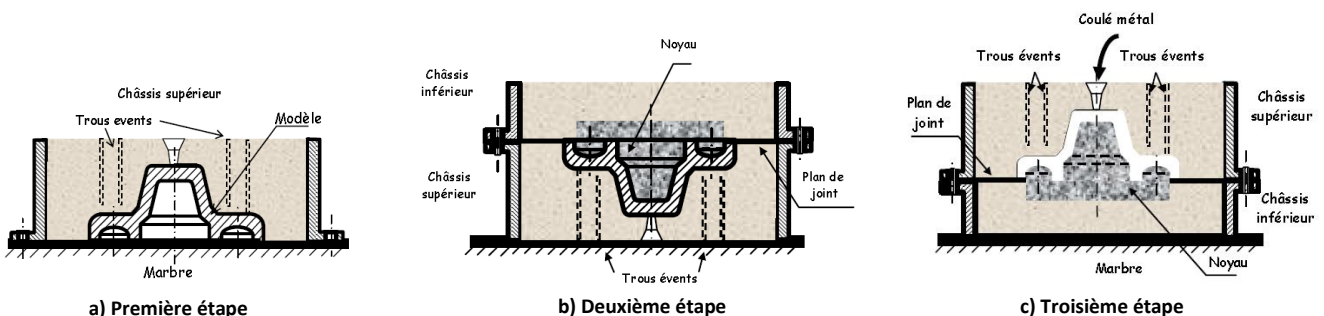


Figure4: Principales phases d'exécution d'un moule

### 1.7.2. Moulage mécanique

De nombreux types de machines ont été créés pour réaliser le remplissage, le serrage et le démoulage mécaniquement. Le sable est serré mécaniquement contre la plaque-modèle selon plusieurs techniques (pression, secousses, pression et secousses, projection). L'empreinte de la pièce n'est plus donnée par un modèle ordinaire, mais par un modèle fixe sur un support (plaque) dont l'ensemble est appelé plaque modèle. Le moulage mécanique permet la réalisation des pièces de toute forme et de la petite à la très grande série, mais il est limité par la capacité des machines (4m<sup>2</sup>). Les moules sont réalisés le plus rapidement possible (prix) et rigoureusement semblables (Exactitude, tolérances). Les cadences de moulage sont très élevées (100 à 200 moules par heure selon dimensions des pièces, 400 moules par heure avec plaque modèle double face).

Les machines à mouler sont classées selon la méthode de serrage en :

- a) **Serrage par pression** : Ce procédé est obtenu par la descente d'un piston ou la montée de la table. 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 (Figure 5a). 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) **Serrage 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 -100mm) grâce à l'air comprimé arrivant par l'entrée (Figure 5b). Lorsque le piston arrive à l'orifice d'échappement, de l'air se dégage et ce qui provoque la chute brutale de la masse et donne le tassement du sable par inertie. Cette opération se répète périodiquement (30 -60 fois pour chaque moule). Les secousses peuvent avoir jusqu'à 20 mm d'amplitude à des fréquences de 350 coups/minute. La secousse peut être franche (la table retombe sur une masse fixe), ou en l'air (la masse sur laquelle retombe la table est montée sur ressorts) ; dans ce cas, l'amplitude n'est que de 3 à 5 mm. La qualité du tassement au sable dépend du nombre de secousses et de la hauteur de la chute.

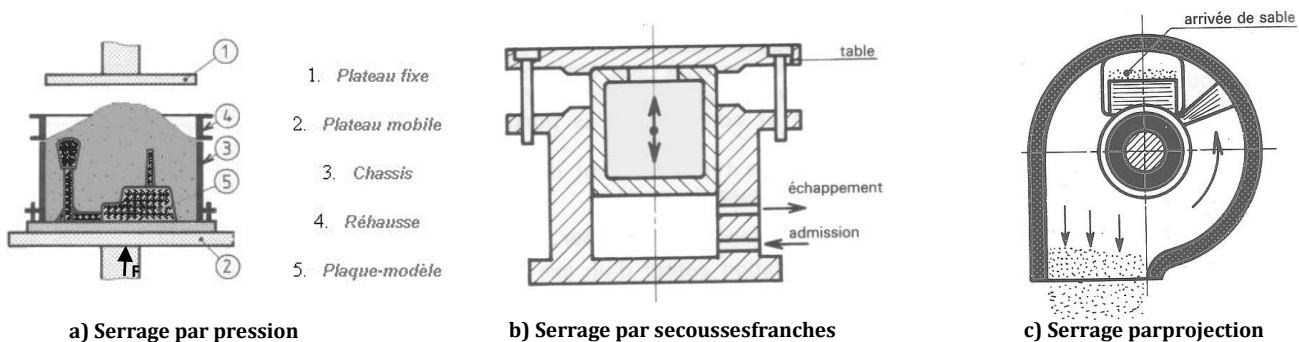


Figure 5: Serrage du sable mécaniquement

- c) **Serrage par secousses et pression** : Ce mode de serrage est le plus employé en fonderie moderne. Afin d'éviter les inconvénients du moulage par pression et par secousses, on utilise actuellement la combinaison des deux principes où la serre du sable est plus uniforme au sein de la masse entière du moule. Ce type de machines procède par secousses dans une première action et par pression dans l'action qui suit. Les différentes machines utilisent comme agent moteur la force humaine, l'eau sous pression et surtout l'air comprimé. Le démoulage est obtenu par soulèvement du châssis à l'aide d'un piston de démoulage ou par descente du piston de serrage après retournement. L'inconvénient de ces machines est le développement de bruit.
- d) **Serrage par projection** : Le sable est mis en mouvement par une palette tournant à grande vitesse (turbine) qui le projette violemment et verticalement dans le châssis. Le remplissage et le serrage se font simultanément (Figure 5c). La turbine est montée à l'extrémité de deux bras mobiles permettant le serrage des moules de grandes dimensions. Ce type de moulage est économique par la simplicité du matériel et des machines. En effet, le serrage peut s'effectuer dans un châssis ou un châssis ouvrant donnant des mottes.

Les machines à mouler sont classées selon le principe de démoulage en :

- 1) Démoulage par montée du moule;
- 2) Démoulage par descente du modèle;
- 3) Démoulage par la rotation de la plaque modèle.

Les plaques-modèles sont confectionnées en bois, plâtre, métal, plastique selon l'importance de la série, elles permettent non seulement d'obtenir les formes de la pièce, mais également la surface du joint (plan de joint) et les éléments de coulée (canal, événements, masselottes).

On distingue :

- a) **Les plaques-modèles simple face** où les deux parties de modèle sont fixées sur deux plaques indépendantes qui permettent de mouler séparément la partie de dessus et la partie de dessous du modèle (Figure 6a);
- b) **Les plaques-modèles double face** où les deux parties de modèle sont fixées de part et d'autre d'une même plaque, le moulage est réalisé de part et d'autre de la plaque sur la même machine (Figure 6b);
- c) **Les plaques-modèles réversibles** où les deux parties de modèle sont fixées symétriquement sur la même face d'une plaque de telle façon qu'une partie du moule soit complémentaire d'une autre partie identique (Figure 6c).

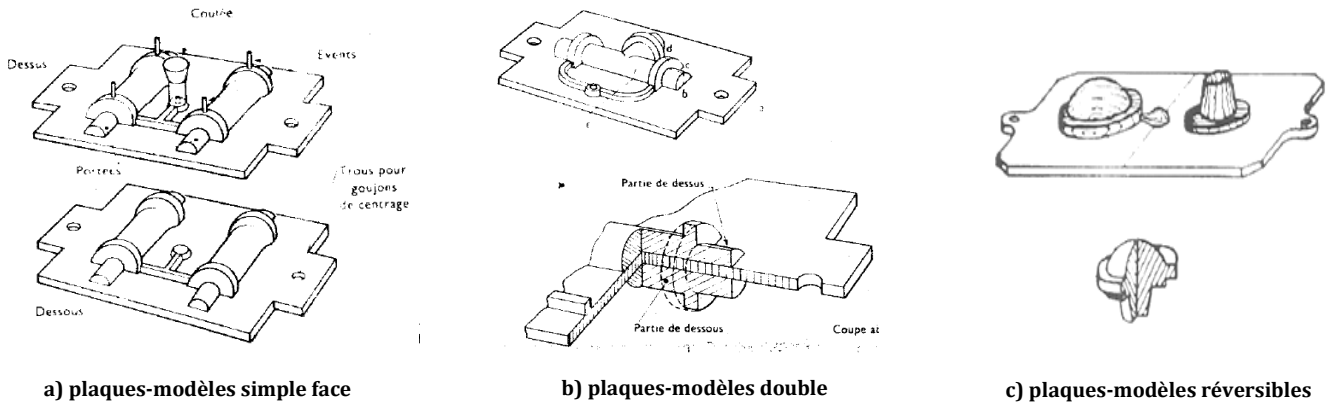


Figure 6: plaques-modèles

### 1.8. 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 et alliages non ferreux à point de fusion relativement bas, possédant de bonnes propriétés de fonderie.

Le moule est constitué de deux ou plusieurs parties appelées chapes, formant l'empreinte, de trou decoulée et les événements, 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. Les coquilles résistent de quelques centaines de coulées et pour élever la ténacité de leurs surfaces

### 1.9. Moulage à la cire perdue

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 là 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.

Ce procédé repose sur l'utilisation de moules sans joint. Il s'agit de faire un modèle dans un matériau facile à mettre en forme et dont il est facile de se débarrasser avant ou pendant la coulée. Typiquement ce matériau est du polystyrène qui brûle au feu et au moment de la montée du métal liquide, ou bien de la cire qui ont des bas points de fusion qu'on peut fondre et évacuer avant la coulée (procédé à cire perdue). Une fois le modèle réalisé, on l'enrobe de sable, de plâtre réfractaire ou d'une carapace céramique. On se débarrasse du modèle en le fondant ou en le brûlant. Enfin, le moule est rempli de métal liquide. Le moule est alors réalisé en une seule partie autour d'un modèle sans possibilité de démoulage. Le modèle comporte la forme de la pièce ainsi que le système de remplissage et d'alimentation.