Quelques éléments sur les procédés de moulage des métaux

BASES DU MOULAGE DES METAUX

- Technologie du moulage
- Chauffage et coulée
- Solidification et refroidissement

Moulage

Le moulage consiste à verser un métal liquide qui s'écoule par gravité ou sous pression dans un moule dans lequel il se solidifie en prenant la forme de l'empreinte réalisée dans la cavité du moule.

- Les étapes du moulage semblent simples :
  1. Fondre le métal
  2. Le verser dans le moule
  3. Le laisser refroidir

Possibilités et avantages du moulage

- Permet de réaliser des pièces de formes complexes
- Permet de réaliser des formes intérieures et extérieures
- Suivant les procédés de moulage on peut obtenir des pièces dont les dimensions sont plus ou moins proches de la pièce finie
- On peut réaliser des pièces de très grande dimension
- Certains procédés de moulage permettent une production en très grandes séries

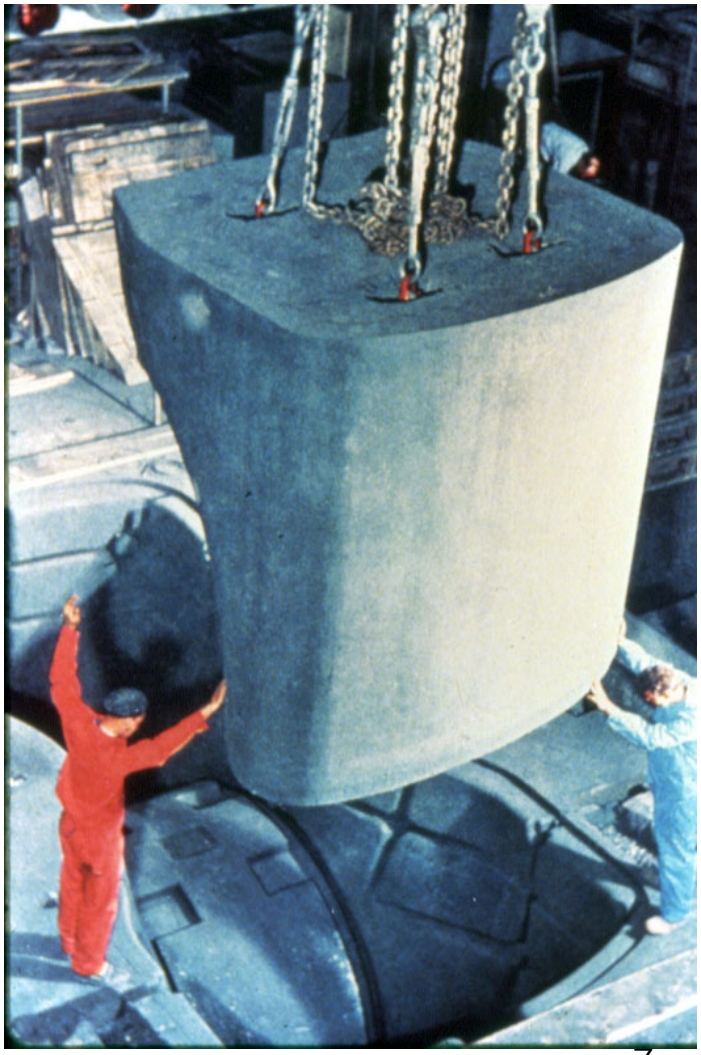
Inconvénients du moulage

- Les inconvénients dépendent des procédés de moulage :
  - Limitation des propriétés mécaniques des pièces (matériau)
  - Faible précision dimensionnelle et mauvais état des surfaces pour certains procédés (ex : moulage en sable)
  - Procédés dangereux du fait de la manipulation de métaux en fusion
  - Problèmes environnementaux (fumées…)

Les pièces réalisées par moulage

- Grandes pièces : carters moteur pour les véhicules, les poêle à bois, les bâtis de machine, les roues ferroviaires, les canalisations, les cloches d'église, les grandes statues…
- Petites pièces : couronnes dentaires, bijoux, petites statues, et poêles
- Tous les métaux peuvent être coulés : les ferreux et les non ferreux

Grandes pièces !



Le moule de fonderie

- Il contient une cavité dont la géométrie donne la forme de la pièce obtenue
  - Les dimensions et la géométrie de la cavité doivent être légèrement surdimensionnées pour tenir compte du retrait du métal pendant la solidification
  - Les moules peuvent être faits dans différents type de matériaux : sable, plâtre, céramique et métal…

Les deux grandes familles de procédés de moulage

1. *Procédés à moule non permanent – on utilise un moule qui doit être détruit pour extraire la pièce.*
   - Matériau constituant le moule : *sable, plâtre et matériaux semblables, plus des liants*
2. *Procédés à moule permanent* – on utilise un moule permanent qui peut être utilisé plusieurs fois pour produire plusieurs pièces
   - Fabriqué en métal ou plus rarement en céramique réfractaire

Avantages et inconvénients

- Moule non permanent : des géométries plus complexes sont possibles car on peut casser le moule pour extraire la pièce
- Les formes sont limitées en moule permanent car il est nécessaire de pouvoir ouvrir le moule pour extraire la pièce.
- Les procédés à moule permanant sont plus économiques en grande série

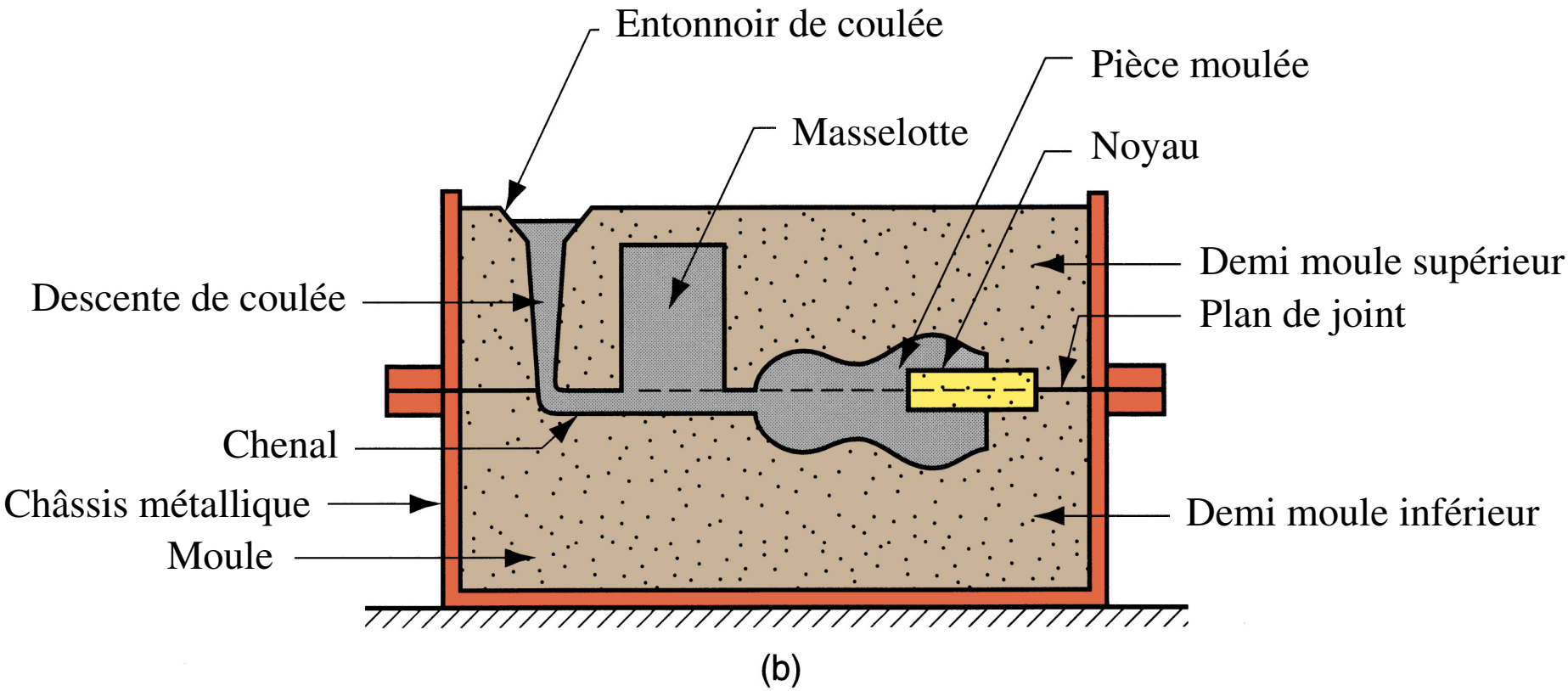


Figure 10.2 (b) Moulage en sable. Après solidification, la pièce est extraite en détruisant le moule en sable. Elle est ensuite achevée par tronçonnage des amenées de métal et des masselottes.

Réalisation de la cavité du moule

- La cavité du moule est réalisée en tassant le sable autour d'un modèle qui a la forme de la pièce à réaliser
- Lorsque le modèle est enlevé le moule a l'empreinte de la pièce
- Le modèle comprend les surépaisseur nécessaires pour compenser le retrait du métal pendant sa solidification
- Le sable utilisé est humide et contient un liant (argile) afin de maintenir sa forme

Les noyaux

- La cavité du moule permet d'obtenir la forme extérieur de la pièce
- En complément, une pièce peut avoir des formes intérieures qui sont obtenues au moyen de noyaux placés dans la cavité
- En moulage sable, les noyaux sont généralement fabriqués en sable

Le système de remplissage

Le conduit par lequel le métal fondu coule de l'extérieur vers la cavité est constitué :

- D'un entonnoir de coulée qui permet de réduire les éclaboussures et la turbulence pendant que le métal coule dans la descente
- Une descente de coulé par laquelle le métal entre dans…
- Les chenaux qui alimente la cavité

Masselotte

Volume de métal liquide qui permet d'alimenter la pièce pendant la solidification

- Les masselottes doivent être dimensionner de façon à se solidifier après la pièce

Chauffage du métal

- Des fours de chauffage sont utilisés pour chauffer le métal à une température suffisante pour effectuer la coulée.
- La chaleur nécessaire est la somme de :
  - La chaleur nécessaire pour atteindre le point de fusion
  - La chaleur nécessaire pour fondre tout le solide
  - La chaleur pour pouvoir verser le métal à la température souhaitée (perte dans le transport)

Coulée du métal liquide

- Pour que cette opération soit réussie il faut que le métal liquide ait le temps de remplir la totalité de l'empreinte avant de se solidifier.
- Facteurs important :
  - La température de coulée
  - La vitesse de coulée
  - La turbulence

Solidification du métal

Transformation, du liquide en solide

- La solidification diffère suivant qu'il s'agit d'un métal pur ou d'un alliage

Un métal pur se solidifie à une température constante égale à la température de fusion

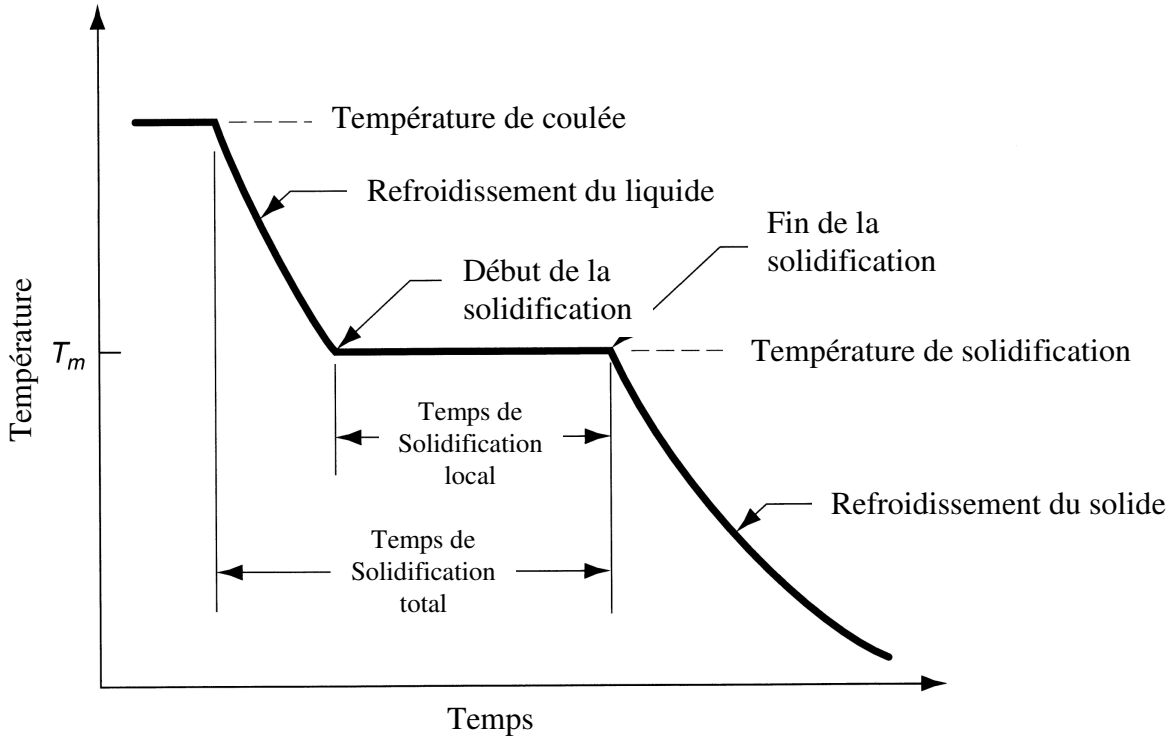


Figure 10.4 - Courbe de refroidissement d'un métal pur lors d'une opération de coulée

Solidification d’un métal pur

- En raison de l'action de refroidissement de la paroi du moule, une peau mince de métal solidifié est formée juste après la coulée
- Au cours du refroidissement l'épaisseur de la peau augmente jusqu’à former une coquille solide à l’intérieur de laquelle se trouve le métal à l’état liquide.
- La vitesse de refroidissement dépend autant des transferts de chaleur dans le moule que des propriétés thermique du métal

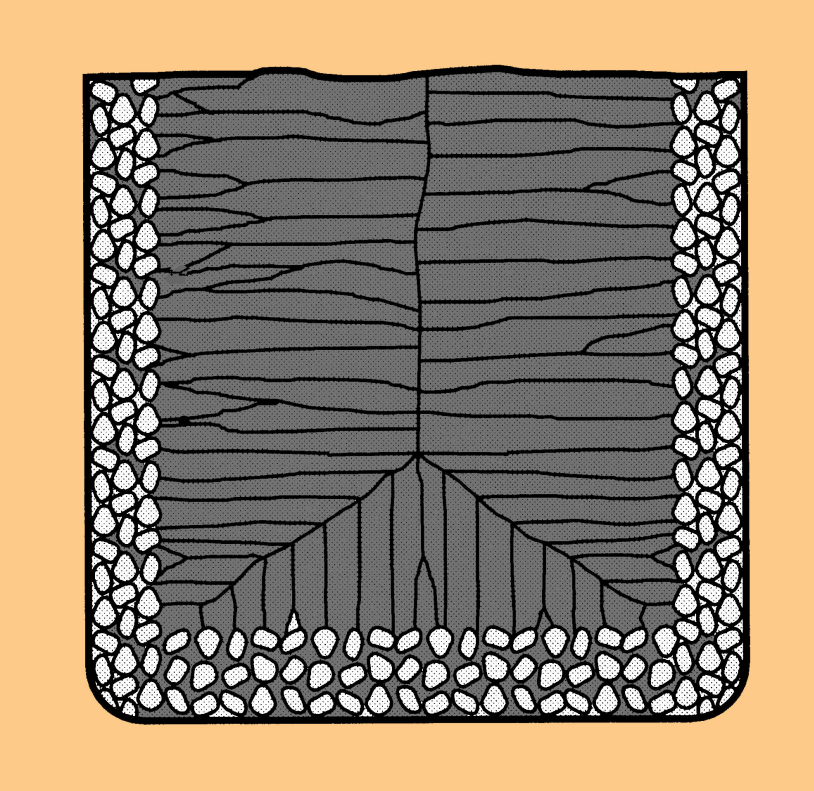


Figure 10.5 - Structure caractéristique des grains dans la coulée d'un lingot de métal pur.
En paroi, des grains de petite taille orientés aléatoirement et à cœur de large grains colonnaire orientés vers le centre du lingot.

La majorité des alliages se solidifient sur un intervalle de température plutôt qu'à une température donnée.

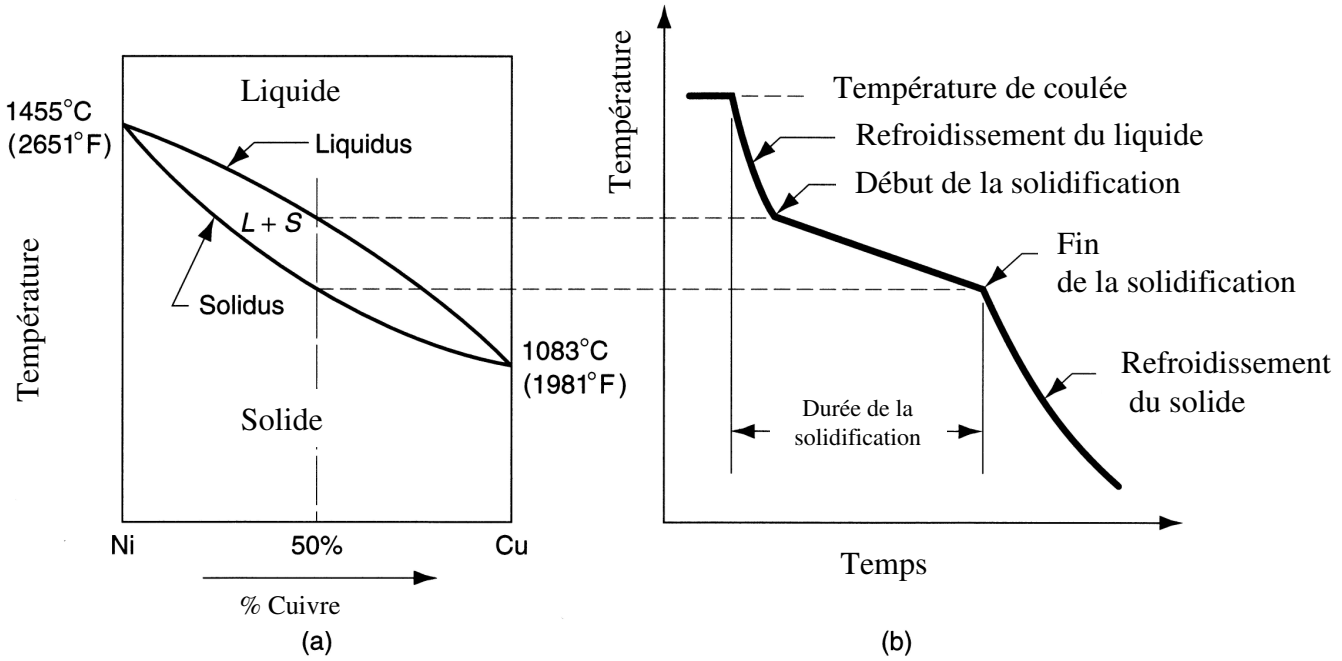


Figure 10.6 -
(a) Diagramme de phase de l'alliage Cuivre Nickel
(b) Courbe de refroidissement associée pour un alliage à 50%Ni-50%Cu

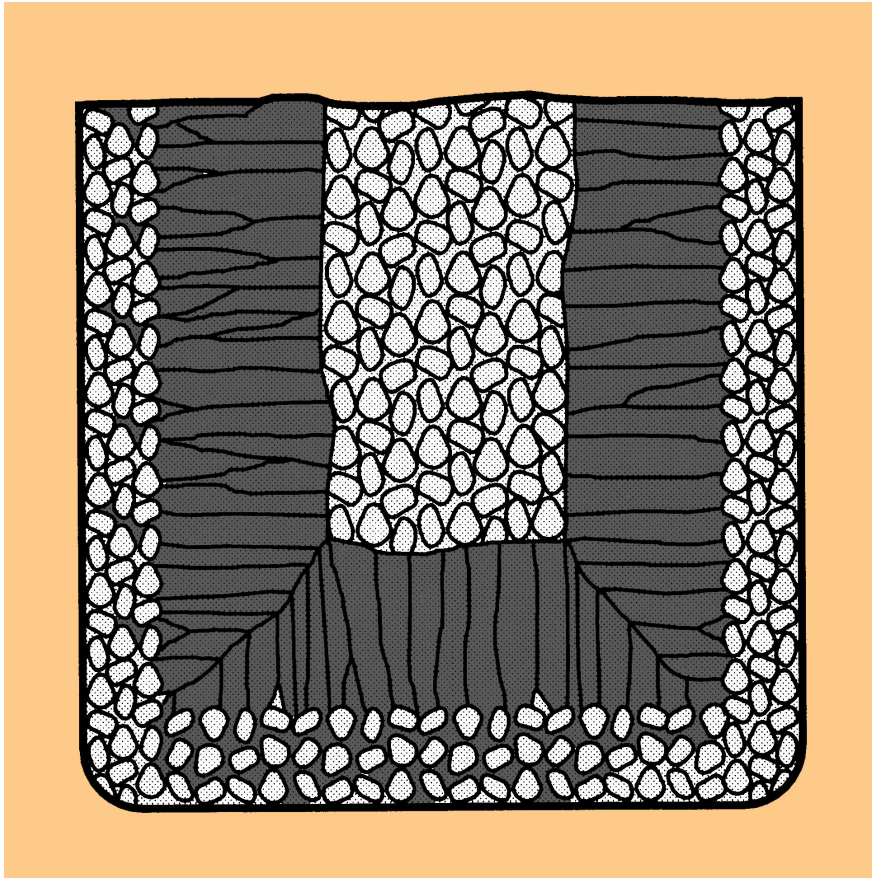


Figure 10.7 - Structure caractéristique d'un alliage métallique coulé. Il y a ségrégation des éléments d'alliage dans le centre du lingot.

Temps de solidification

- La solidification prend un certain temps
- Temps total de solidification *TTS* = temps nécessaire à la pièce pour se solidifier après la coulée.
- *Le TTS* dépend de la taille et de la forme de la pièce (méthode des modules)

Méthode des modules

$$TTS = \left(K_m \left(\frac{V}{S} \right) \right)^n$$

TTS : temps total de solidification

V : volume de la pièce

S : surface enveloppe de la pièce

n : exposant généralement fixé à 2

K : un coefficient qui dépend de la nature de l'alliage et du moule

Valeur de *K*

- *K* dépend du matériau constituant le moule, des propriétés thermiques du métal constituant la pièce et de l'intervalle de température entre la température de coulée et la température de solidification.
- La valeur de *K* pour une opération de moulage peut être basée sur les données expérimentales des opérations précédentes effectuées en utilisant le même matériau de moule, le même métal, et la même température de coulée, même si la forme de la pièce est très différente

Que nous dit cette formule ?

- Une pièce avec un rapport volume sur surface plus élevé se solidifiera plus lentement qu'une pièce avec un ratio moins élevé
  - Pour alimenter en métal liquide la pièce, le TTS de la masselotte doit être plus élevé que celui de la pièce
- Puisque *K* est identique pour la masselotte et pour la pièce alors, il faut dessiner la masselotte de façon à avoir un rapport volume sur surface plus élevé. Ainsi la pièce se solidifiera en premier.
  - Ceci limitera les effets du retrait.

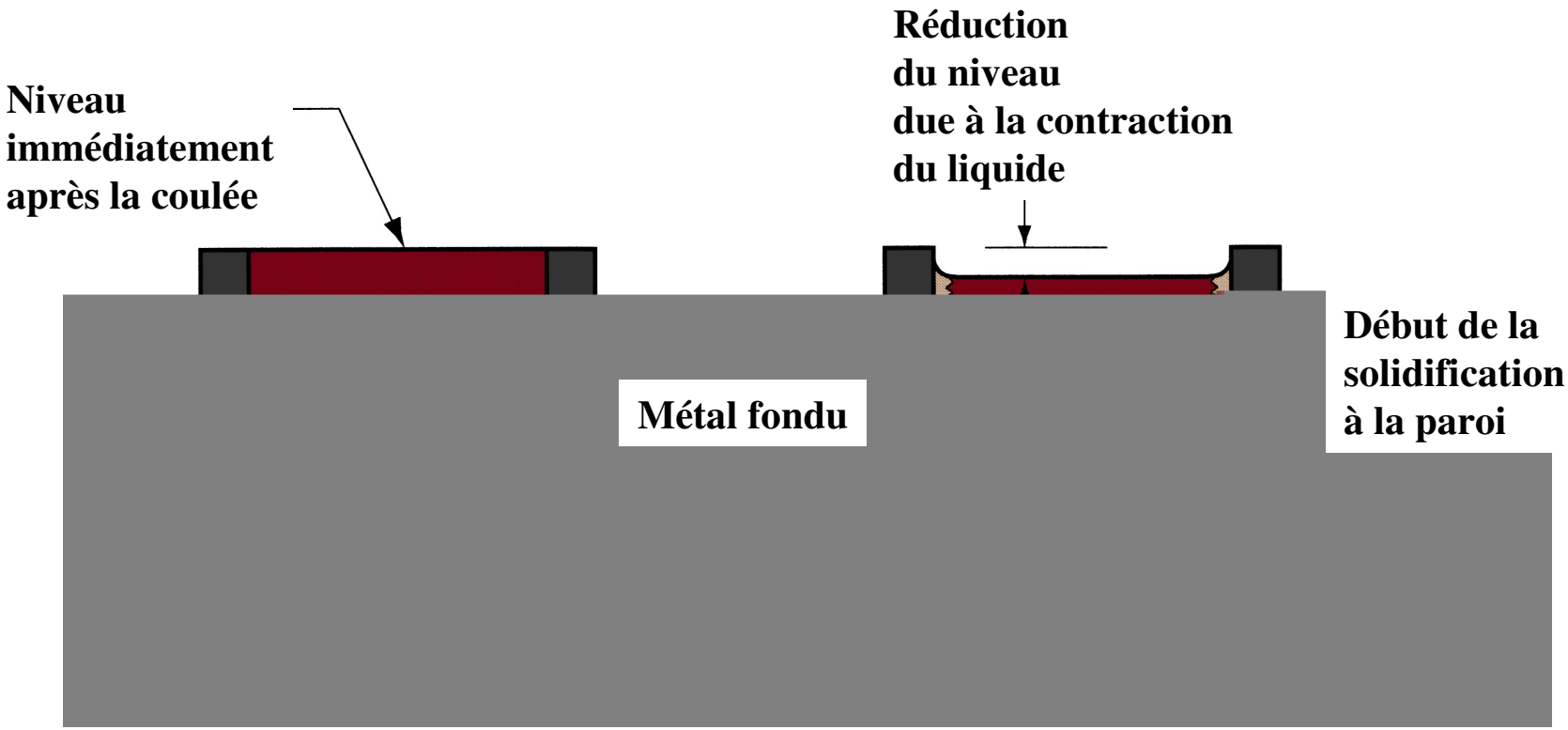


Figure 10.8 - Contraction d'un lingot cylindrique durant la solidification et le refroidissement :

(0) niveau de liquide juste après la coulée

(1) réduction du niveau causée par la contraction du liquide

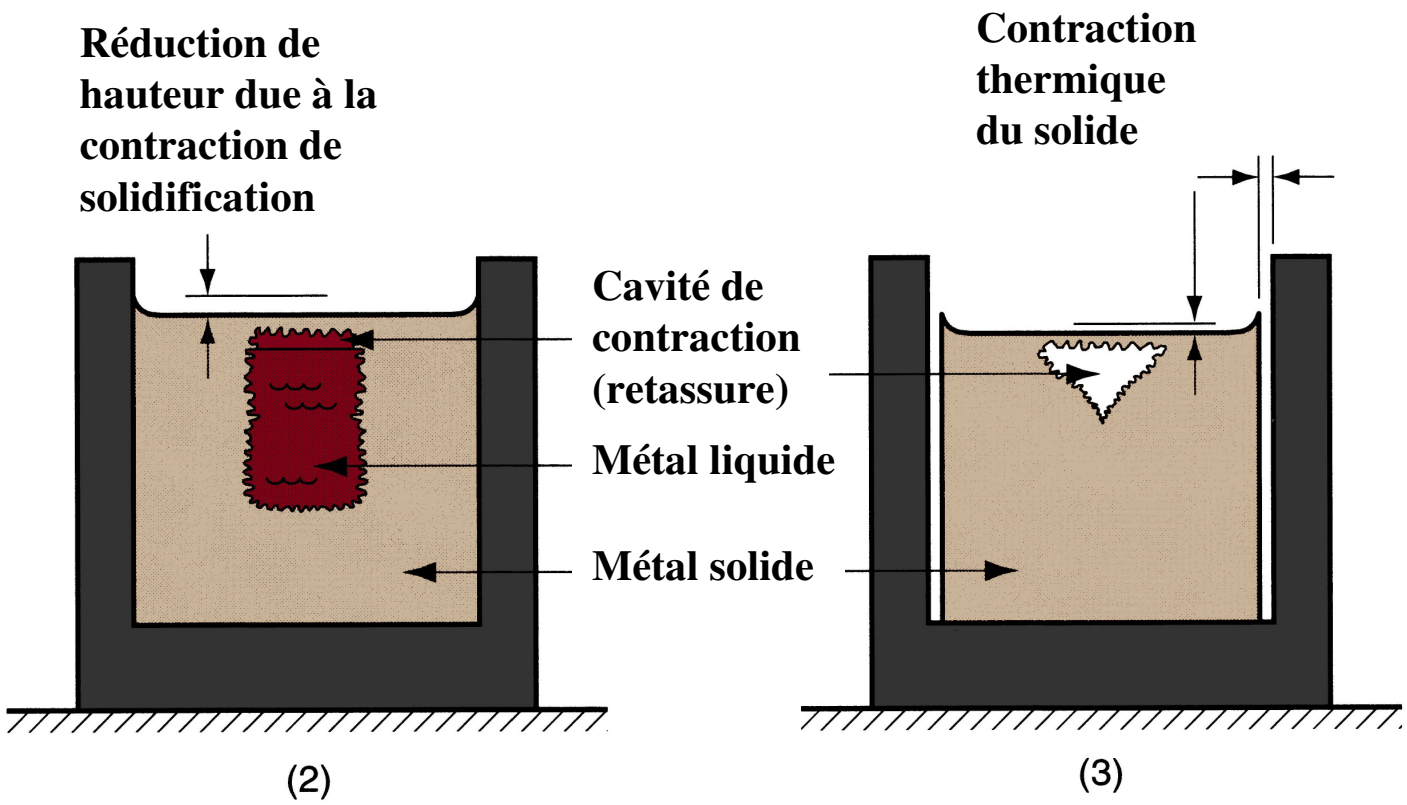


Figure 10.8 -

(2) Réduction du niveau et formation de retassures (cavités) dues à la contraction de solidification

(3) Réduction de hauteur et de diamètre dues à la contraction thermique du refroidissement du solide

Retrait de solidification

- Apparaît presque dans tous les métaux car la phase solide a une densité supérieure à la phase liquide
- Ainsi, la solidification induit une réduction de volume par unité de masse de métal

Répartition des retraits

- Les modeleurs compensent le retrait de la pièce en réalisant des cavités surdimensionnées
- Les dimensions de la pièce sont exprimées linéairement. La répartition des surépaisseurs est appliquée directement sur chaque dimension

Solidification orientée

- Pour limiter les dommages du retrait sur la pièce, il est préférable d'orienter la solidification des parties les plus éloignées du métal liquide vers les masselottes.
  - Ainsi, le métal liquide contenu dans les masselottes est toujours disponible pour compenser les effets du retrait.
  - Le terme solidification orienté traduit cet aspect du refroidissement et la méthode utilisée pour la contrôler.

Comment orienter la solidification ?

- La direction de solidification est obtenue en utilisant la méthode des modules pour dessiner la pièce elle même, pour l'orienter dans le moule et pour dimensionner le système de masselottes qui l'alimente
- Il faut placer les sections de la pièce qui ont le rapport *V/S* le plus faible loin des masselottes, ainsi le refroidissement a d'abord lieu dans ces régions, et le passage du métal liquide est toujours possible pour le reste de la pièce.
- *Refroidisseurs* - masse présentant une bonne conductibilité thermique et ayant une capacité thermique suffisante. Disposés soit :
  - En surface de la pièce - il constitue un élément de la paroi de l'empreinte (refroidisseur externe)
  - Soit dans l'empreinte - il sera noyé dans la pièce (refroidisseur interne)

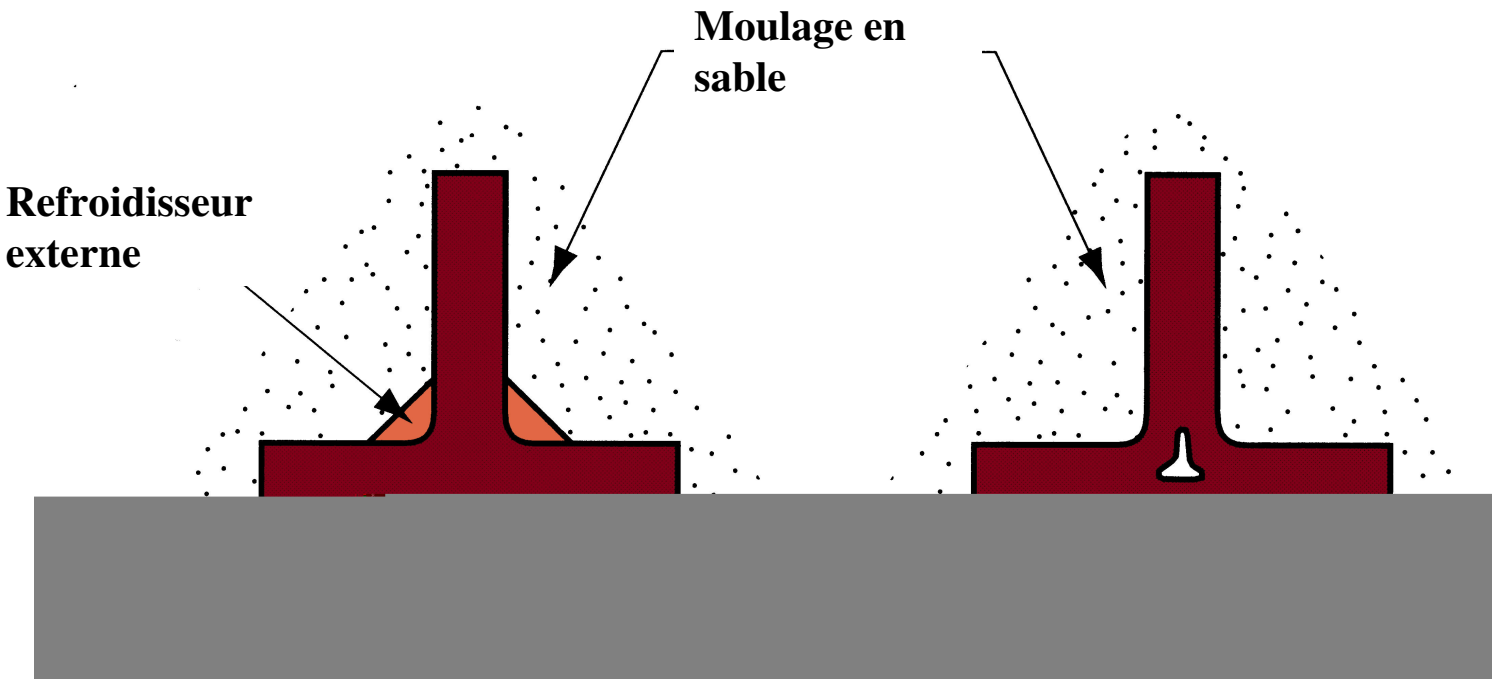


Figure 10.9 - (a) Refroidisseur externe pour accélérer le refroidissement du métal liquide dans les zones massives ; (b) résultat obtenu sans refroidisseurs

Conception des masselottes

- Les masselottes sont des parties qui sont séparées de la pièce finales puis mises au rebut pour être refondues afin de réaliser de nouvelles pièces
- Afin de limiter la perte de métal due à l'utilisation de masselottes il faut réduire au maximum leur volume.
- Pour cela la géométrie des masselottes est choisie de façon à maximiser le rapport *V/S*

LES PROCEDES DE MOULAGE DES METAUX

- Moulage en sable
- Autre procédés à moule non permanent
- Procédés à moules permanents
- Qualité des pièces de fonderie

Les différentes catégories de procédés de moulage des métaux

1. *Moules non permanents* – le moule est détruit pour extraire la pièce
   - Avantages : des formes pls complexes sont possibles
   - Inconvénients : la cadence de fabrication est souvent limitées. Le temps de réalisation du moule est plus élevé que la coulée.
2. *Moule permanent* – Le moule est souvent métallique et peut être réutilisé
   - Avantage : cadences de production plus élevées
   - Inconvénients : géométrie limitées car il faut pouvoir démonter le moule

Le moulage en sable

- Procédé le plus couramment utilisé en proportion de la masse totale de pièces moulées
- Presque tous les métaux peuvent être moulés en sable, même ceux dont la température de fusion est élevée (Ex : aciers nickels et titanes)
- Pièces très petite ou très grandes
- Séries : de 1 pièce à un plusieurs millions

Les étapes du moulage en sable

1. Verser le métal liquide dans le moule
2. Attendre la solidification
3. Casser le moule et extraire la pièce (décochage)
4. Nettoyer et inspecter la pièce
5. Traitements thermiques

Réalisation du moule en sable

- L'empreinte dans le moule en sable est réalisée en tassant le sable autour du modèle. On sépare les différentes parties du moule et on retire le modèle
- Le moule doit également contenir le système d'alimentation et les masselottes
- Pour obtenir des surfaces intérieures il faut également placer des noyaux dans le moule
- Un nouveau moule doit être fabriqué pour chaque pièce fabriquée

Propriétés souhaitées pour le moule

- *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
- *Réutilisable* - le sable peut-il être réutilisé pour fabriquer d'autres moules ?

Autres procédés en moule non permanent

- Moulage en coquille
- Modèle en polystyrène expansé
- Modèle en cire perdue
- Moule en plâtre ou en céramique

Moulage en carapace

Procédé de moulage dans lequel le moule est une fine couche de sable aggloméré au moyen d'une résine thermodurcissable

- Développé en Allemagne vers 1940

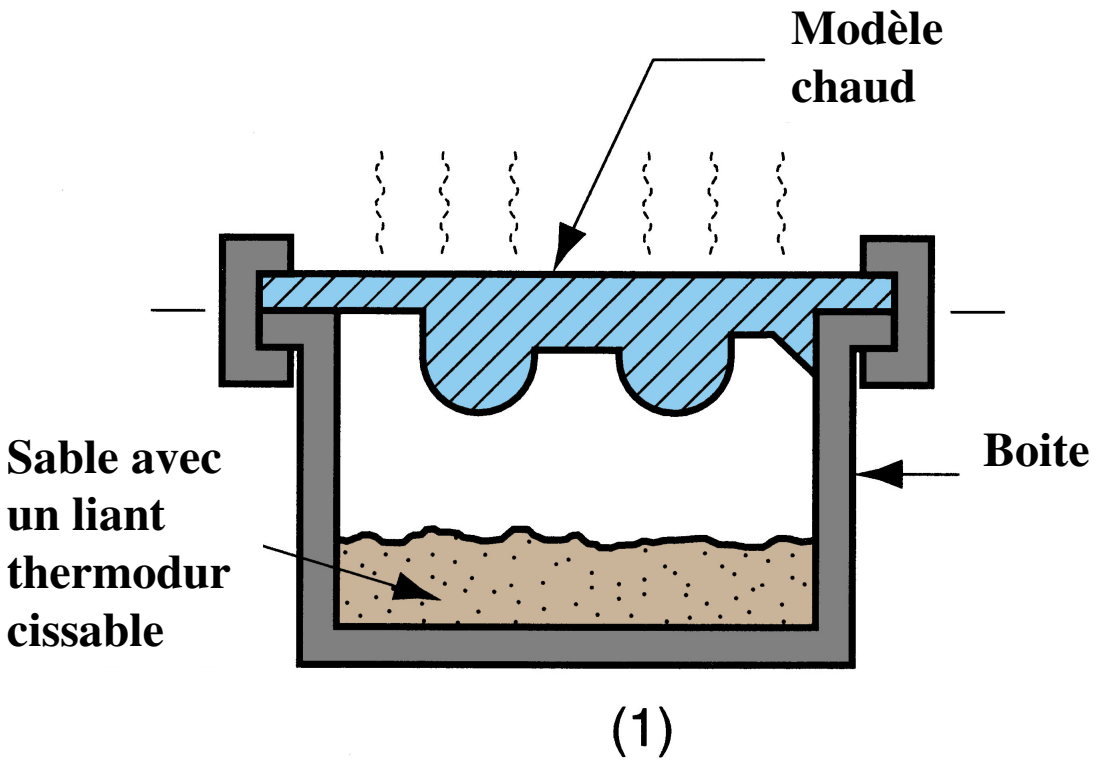


Figure 11.5 - Étapes du moulage en carapace :
(1) un modèle en métal est chauffé et placé au-dessus d'une boîte contenant le sable mélangé à de la résine thermodurcissable

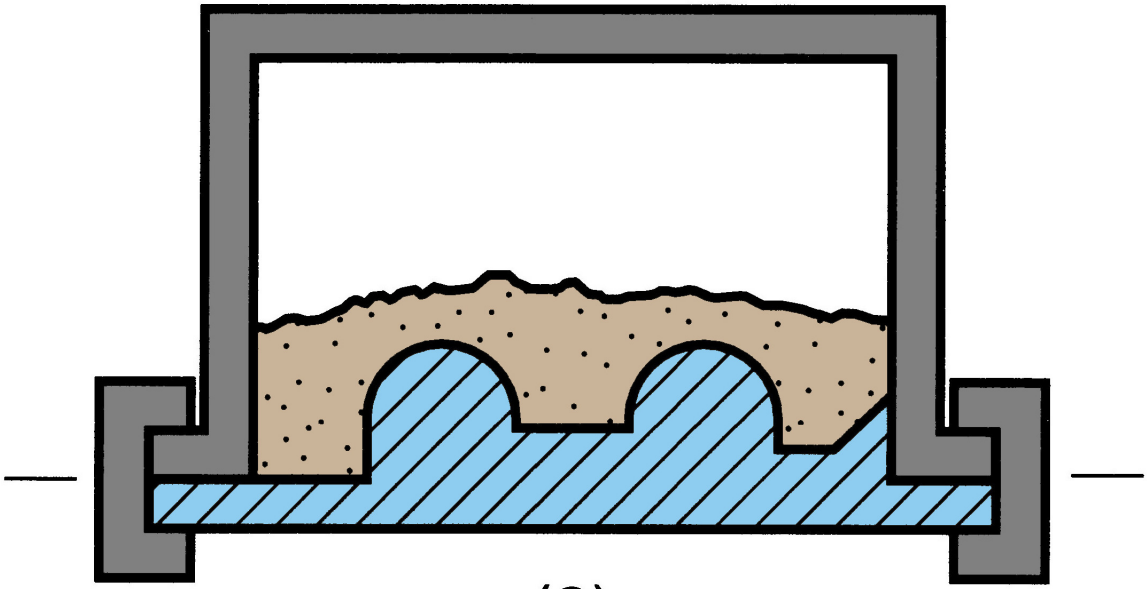
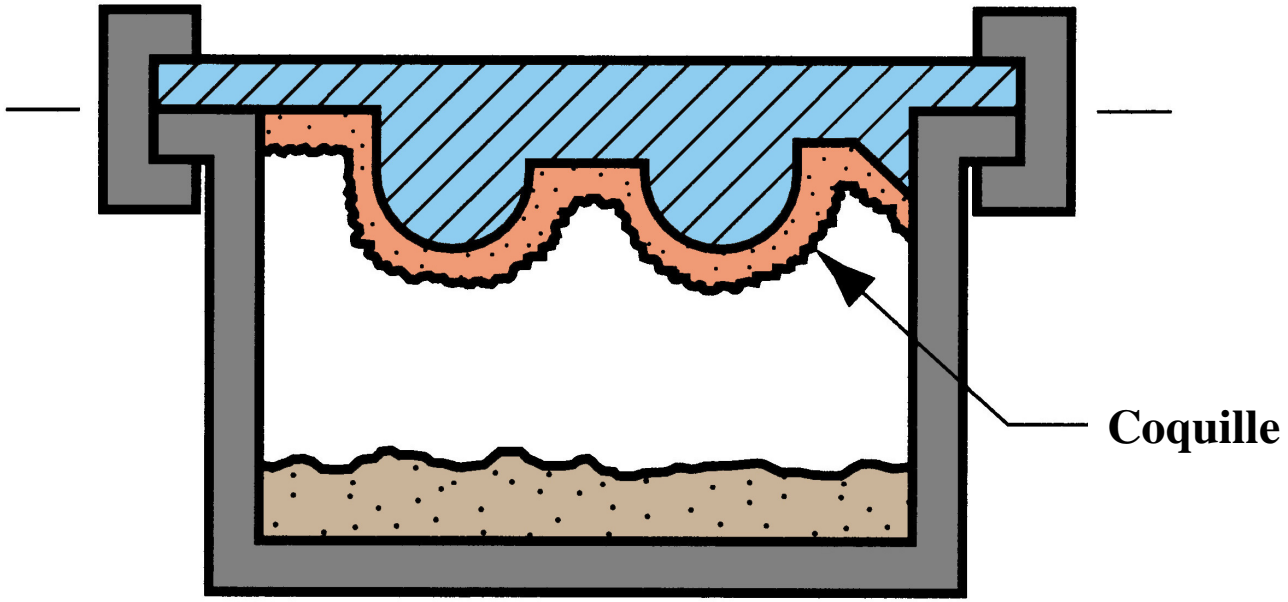
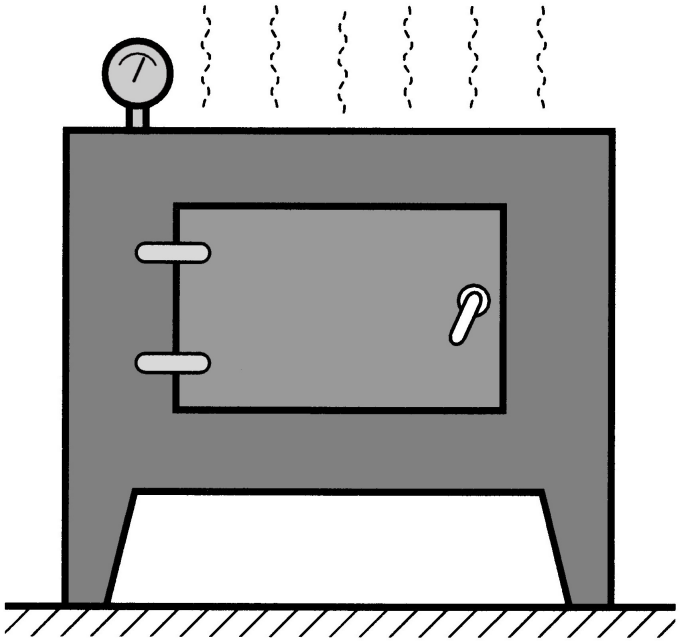


Figure 11.5 - Les étapes du moulage en carapace :
(2) la boîte est renversée de sorte que le sable et la résine tombent sur le modèle chaud. Une couche du mélange est polymérisée à la surface de la plaque modèle et forme une coquille dure

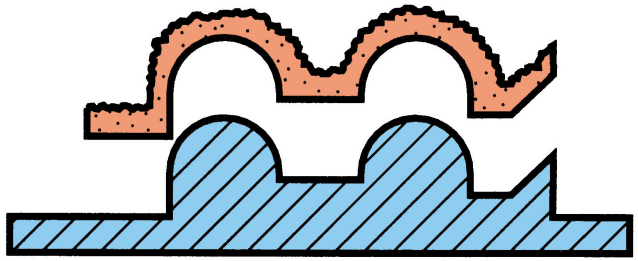


(3)

Figure 11.5 - Les étapes du moulage en carapace :
(3) la boîte est replacée de sorte que les particules non solidifiées tombent dans la boite



(4)



(5)

Figure 11.5 - Étapes du moulage en carapace :
(4) La coquille de sable et de résine est chauffée plusieurs minutes afin de compléter la polymérisation
(5) La coquille est séparée de la plaque modèle

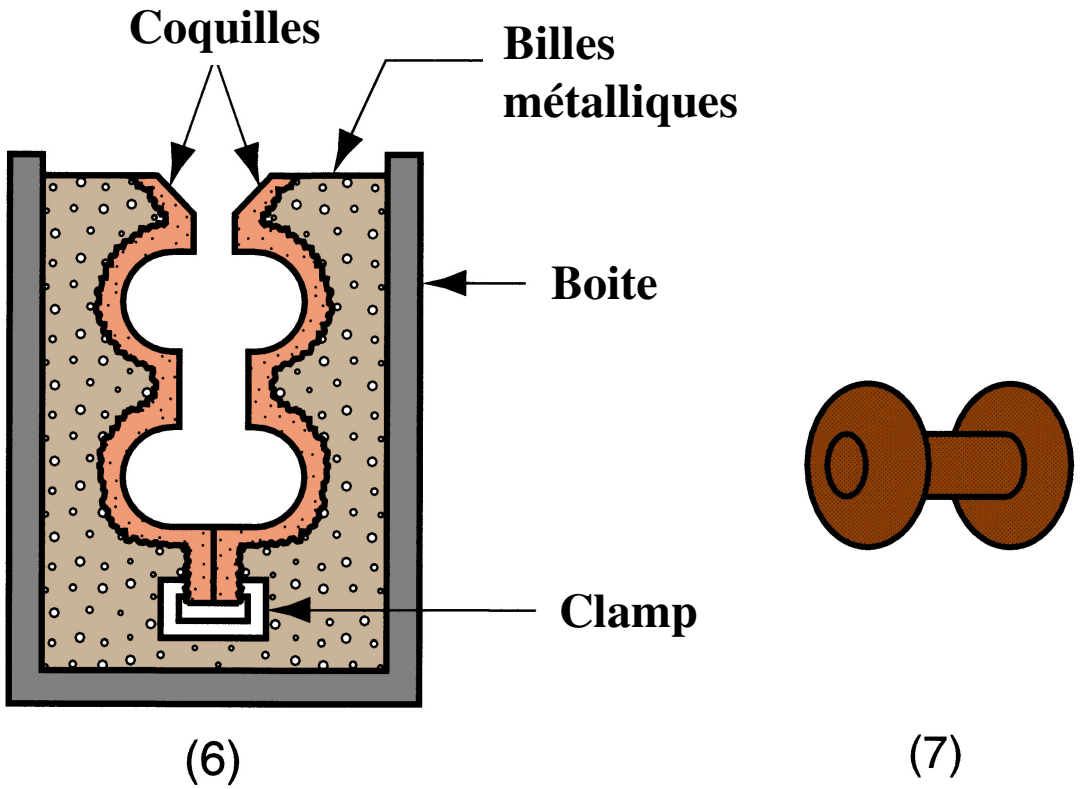


Figure 11.5 - Étapes du moulage en carapace :

(6) Les deux parties du moule en coquille sont assemblées et maintenue par du sable ou des billes de métal dans une boite. La coulée peut être effectuée

(7) La pièce finie est extraite

Avantages et inconvénients du moulage en carapace

- Avantages :
  - L'empreinte a un meilleur état de surface ce qui facilite l'écoulement du métal liquide et conduit à un meilleur état de surface des pièces finies
  - Bonnes précisions dimensionnelles
  - Ne nécessite pas obligatoirement de machine
  - L'aptitude au débourrage des noyau permet d'éviter la formation de fissures dans la pièce
  - Peut être mécanisé pour une production en série
- Inconvénients :
  - Plaques modèle plus coûteuses
  - Difficilement justifiable pour une petite série

Modèle en polystyrène expansé

On utilise un modèle en sable compacté autour d'un modèle en polystyrène expansé. Le modèle est sublimé lorsqu'on coule le métal en fusion.

- Autres noms : *lost-foam process*, *lost pattern process*, *evaporative-foam process*, et *full-mold process*
- Le modèle en polystyrène expansé comprend les masselottes, le système d'alimentation et les noyaux
- Le moule n'a pas besoin d'être ouvert

Avantages et inconvénients du procédé de moulage avec modèle en polystyrène expansé

- Avantages :
  - Il n'est pas nécessaire de retirer le modèle du moule
  - Fabrication plus simple et plus rapide des moules. Il n'est pas nécessaire d'utiliser un moule en plusieurs parties comme dans le moulage classique en sable
- Inconvénients :
  - Un nouveau modèle est nécessaire pour chaque pièce
  - L'intérêt économique du procédé dépend directement du coût de fabrication du modèle.

Application du procédé avec modèle en polystyrène expansé

- Production en série de pièces moulées pour l'automobile
- Automatisation des procédés de fabrication pour
  - Mouler le modèle en polystyrène expansé

Moulage à la cire perdue

Pour fabriquer le moule on utilise un modèle en cire qui est ensuite recouvert de matériau réfractaire. La cire est ensuite fondue et évacuée par gravité du moule. On coule ensuite le métal dans l'empreinte.

- C'est un procédé de précision qui permet de réaliser des pièces d'une grande précision.

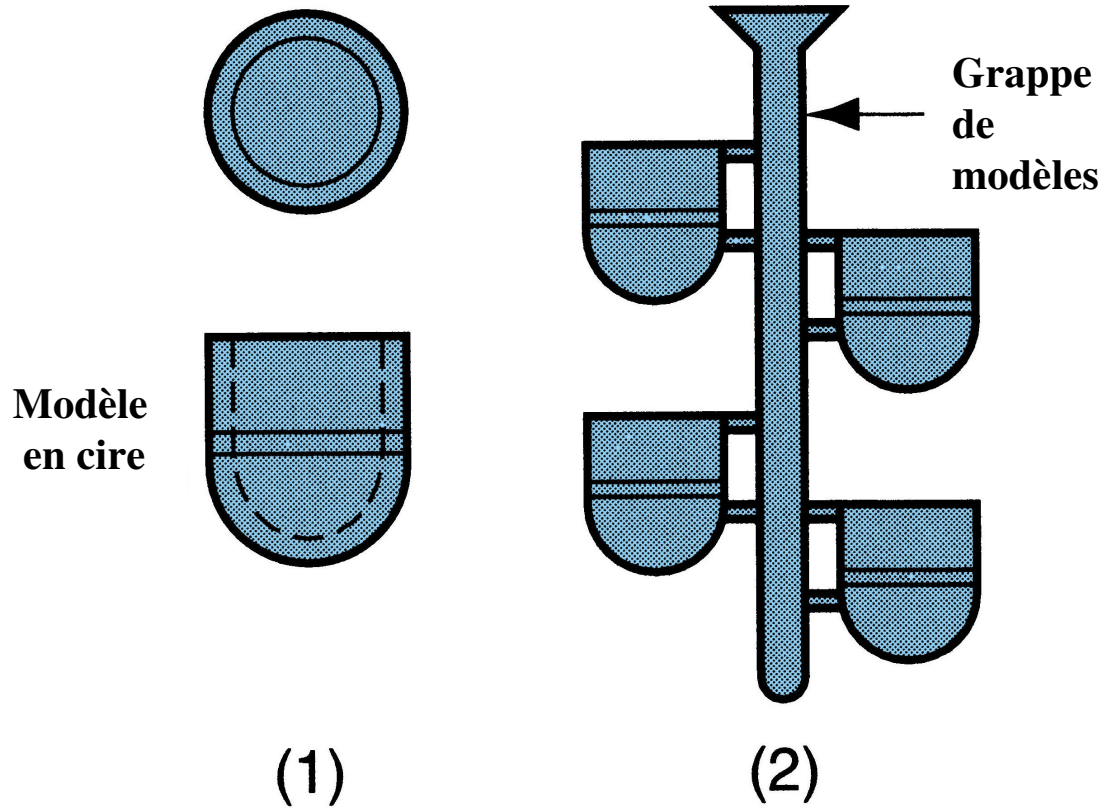


Figure 11.8 - Étapes du moulage à la cire perdue :
(1) On réalise des modèles en cire
(2) Plusieurs modèles sont attachés ensembles de façon à former une grappe

Figure 11.8 - Étapes du moulage à la cire perdue :

(3) La grappe de modèles est recouverte d'une fine couche de matériau réfractaire

(4) Le moule complet est formé de plusieurs couches afin d'obtenir un moule rigide

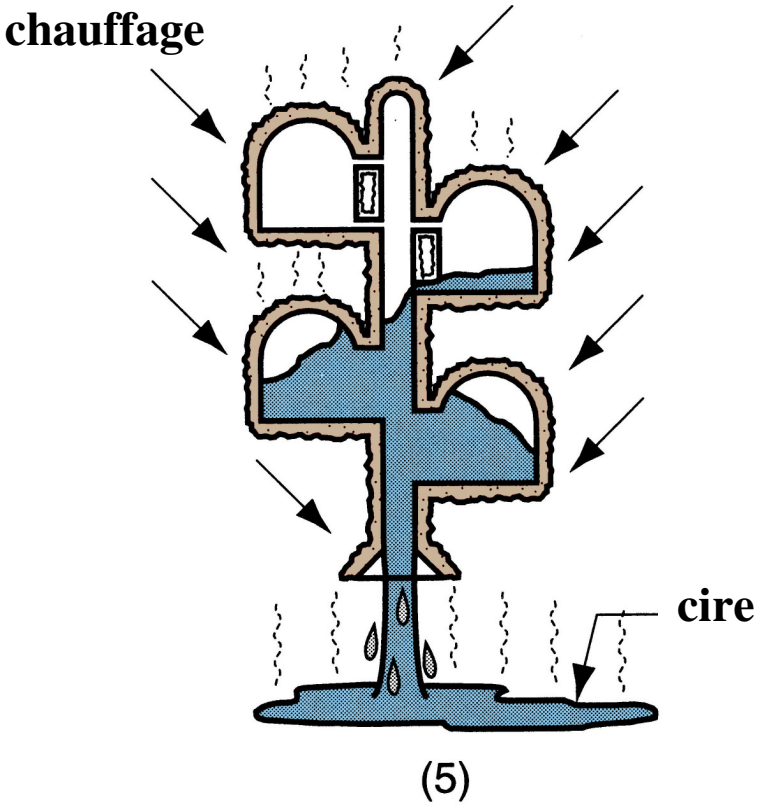
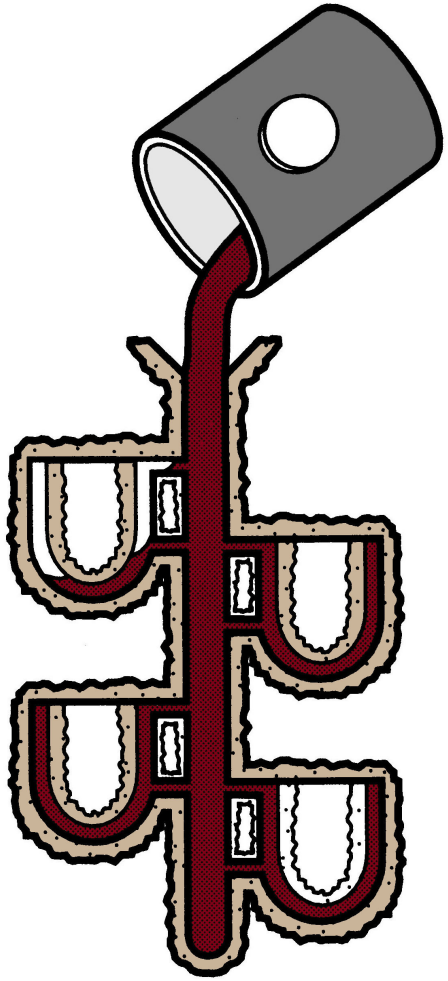


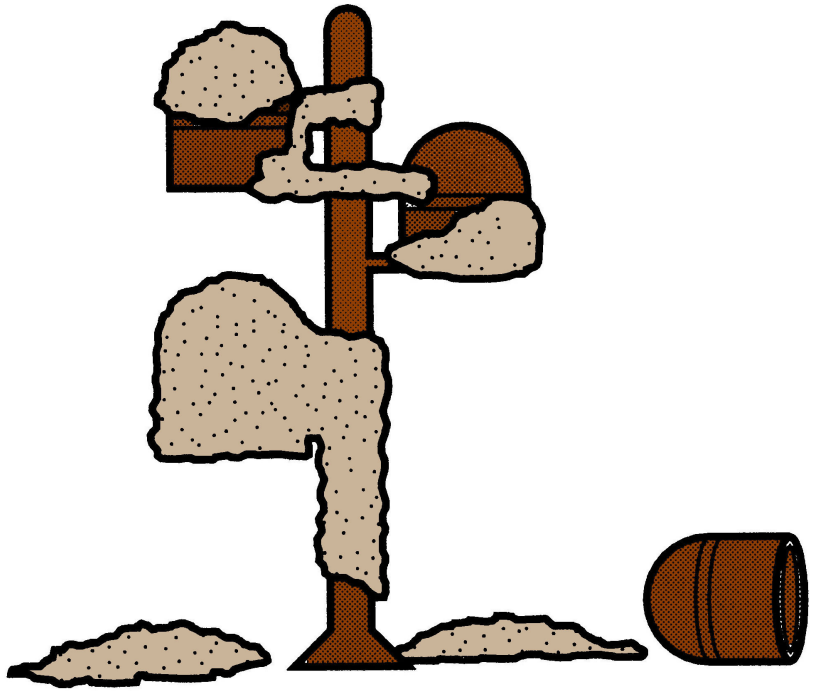
Figure 11.8 - Etapes du moulage à la cire perdue :
(5) Le moule est retourné puis chauffé afin d'évacuer par gravité la cire fondue



(6)

Figure 11.8 - Les étapes du moulage à la cire perdue :

(6) Le moule est préchauffé à haute température ce qui permets d'évacuer toutes les impuretés. Cela facilite également le remplissage dans détails du moule. Le métal est coulé et la pièce se solidifie



(7)

Figure 11.8 - Etapes du moulage à la cire perdue :

(7) Le moule est cassé et les pièces sont séparées de la grappe

Avantages et inconvénients du moulage à la cire perdue

- Avantages :
  - Des pièces d'une grande précision sont réalisables
  - Bonnes précision dimensionnelle et bon état de surface
  - La cire est recyclable
- Inconvénients
  - De nombreuse étapes dans le procédé
  - Procédé assez cher

Procédés en moules permanents

- Moulage en coquille
- Moulage en coquille sous pression
- Moulage par centrifugation

Le procédés de moulage en coquille

On utilise un moule permanent constitué de deux parties conçues pour permettre une fermeture et une ouverture précise

- Les moules utilisés pour mouler des alliages à basse température de fusion on utilise généralement de l'acier
- Les moules utilisés pour mouler de l'acier doivent être réalisés dans un matériau réfractaire du fait de la température de fusion très élevée.

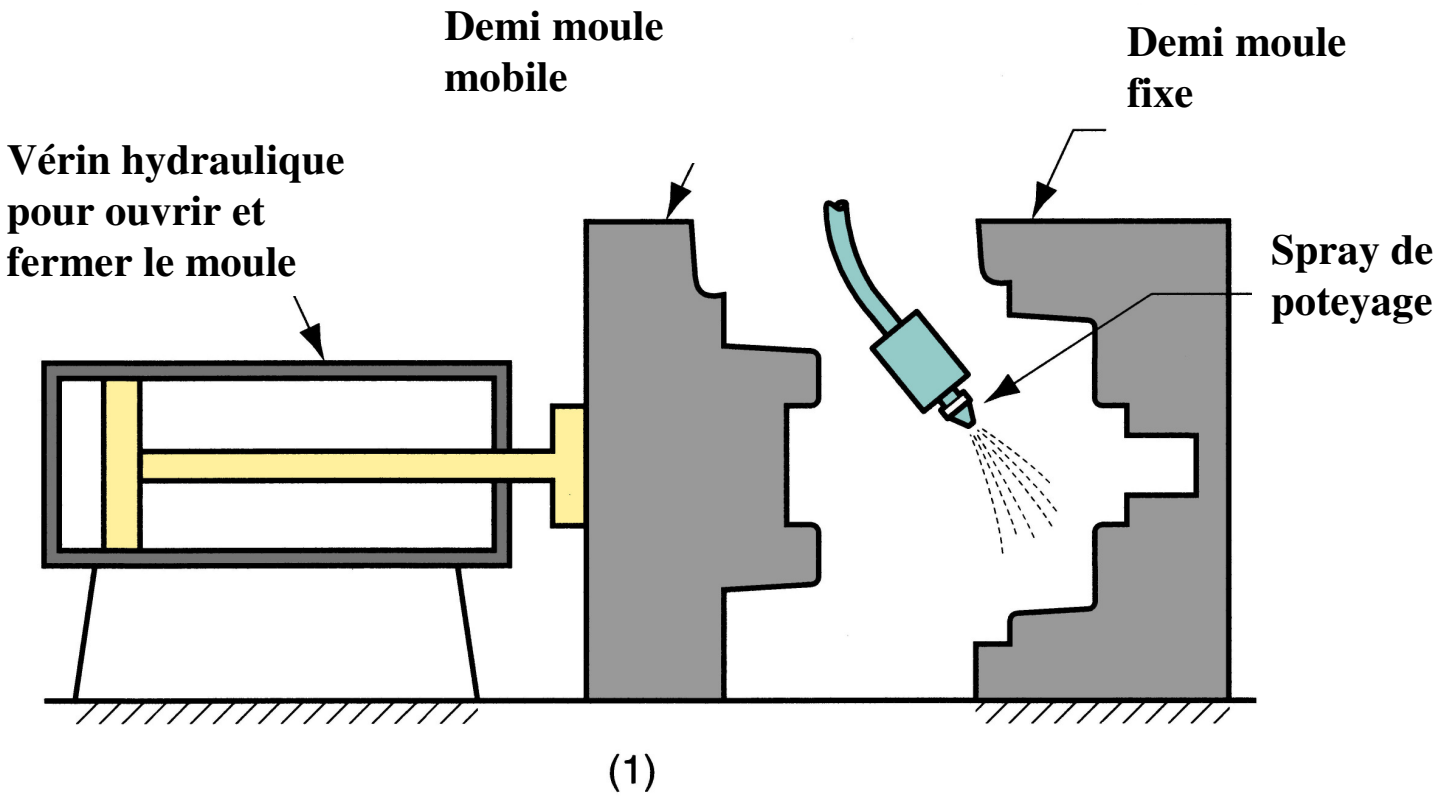


Figure 11.10 - Etapes du moulage en coquille :
(1) Le moule est préchauffé et recouvert de poteyage

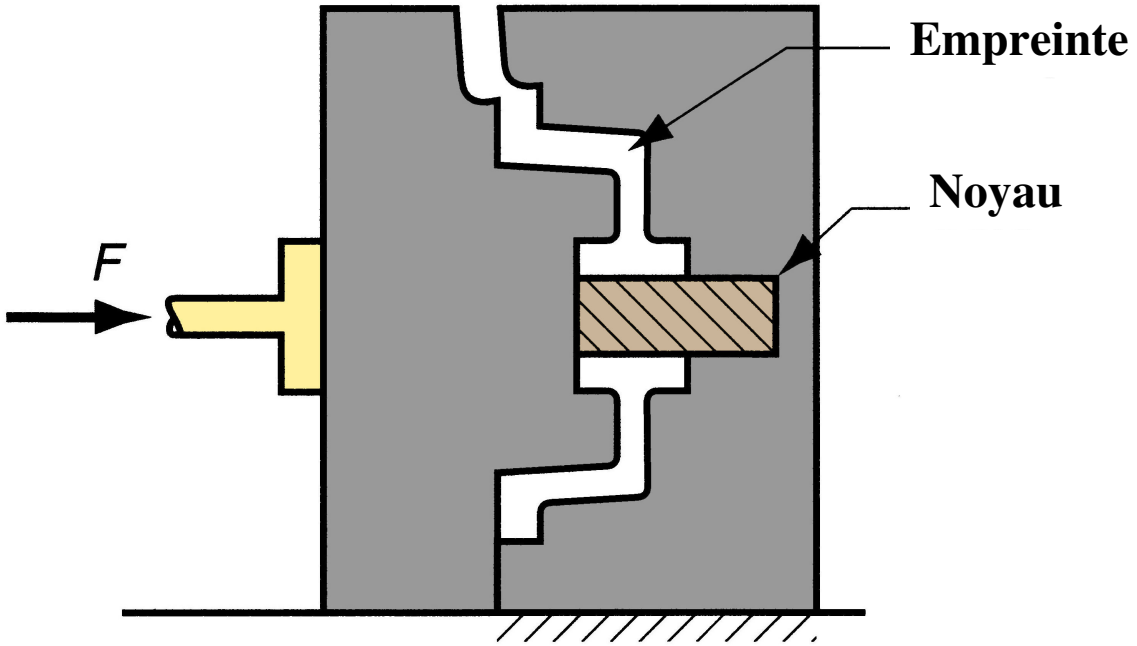


Figure 11.10 - Etapes du moulage en coquille :
(2) Les noyaux (si nécessaire) sont placés dans le moule qui est ensuite fermé

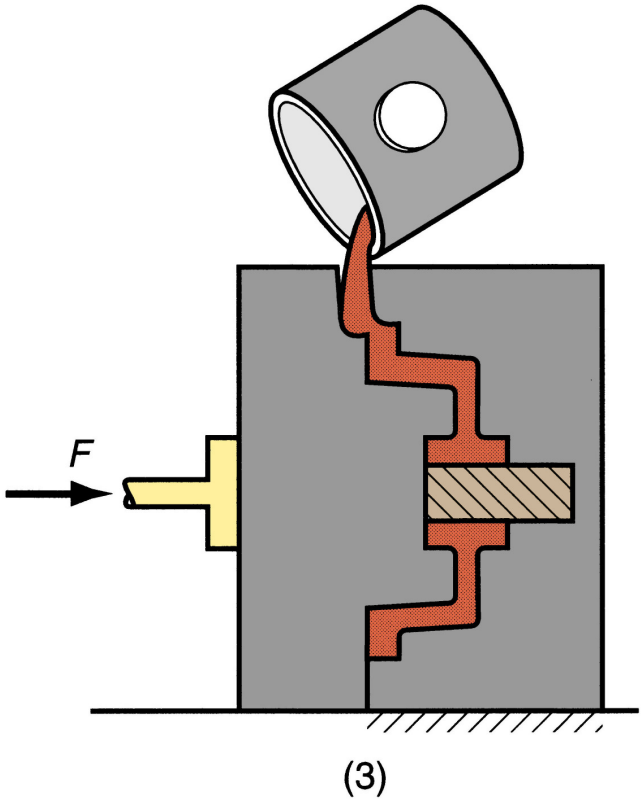


Figure 11.10 - Etapes du moulage en coquille :
(3) Le métal fondu est versé dans le moule

Avantages et inconvénients du moulage en coquilles

- Avantages :
  - Bon control des dimensions et de la qualité des surfaces finies
  - Solidification plus rapide due au moule métallique. On obtient des grains plus fins ce qui améliore les caractéristiques mécaniques des pièces moulées
- Limitations :
  - Habituellement limité au matériau à basse température de fusion
  - Les formes sont plus simple qu'en moulage en sable car le moule doit être ouvert
  - Coût élevé du moule

Application du moulage en coquille

- Du fait du coût élevé du moule, le procédé est mieux adapté aux grandes séries et peut être automatisé.
- Pièces typiques : pistons de moteurs thermiques, corps de pompe, pièces d'avion et de missiles
- Métaux couramment moulés : aluminium, magnésium, alliages de cuivre…

Moulage en coquille sous pression

Le métal liquide est injecté sous haute pression dans le moule

- La pression est maintenue pendant la solidification, ensuite le moule est ouvert et la pièce injectée.
- L'injection sous haute pression est ce qui distingue ce procédé des autres procédés à moule permanent

Les machines de moulage en coquille sous pression

- Conçues pour ouvrir et fermer les moules, pour maintenir les deux parties du moule lorsque le métal est injecté dans l'empreinte.
- Deux types de machines :
  1. Machines à chambre chaude
  2. Machine à chambre froide

Moulage en coquille sous pression en chambre chaude

Le métal est fondu dans un conteneur et un piston l'injecte liquide sous pression dans l'empreinte

- Cadence de production élevée - 500 pièces par heure ne sont pas rares
- Application aux alliages à faible température de fusion afin de ne pas endommager le piston et les autres composants
- Métaux moulés : zinc, étain, magnésium…

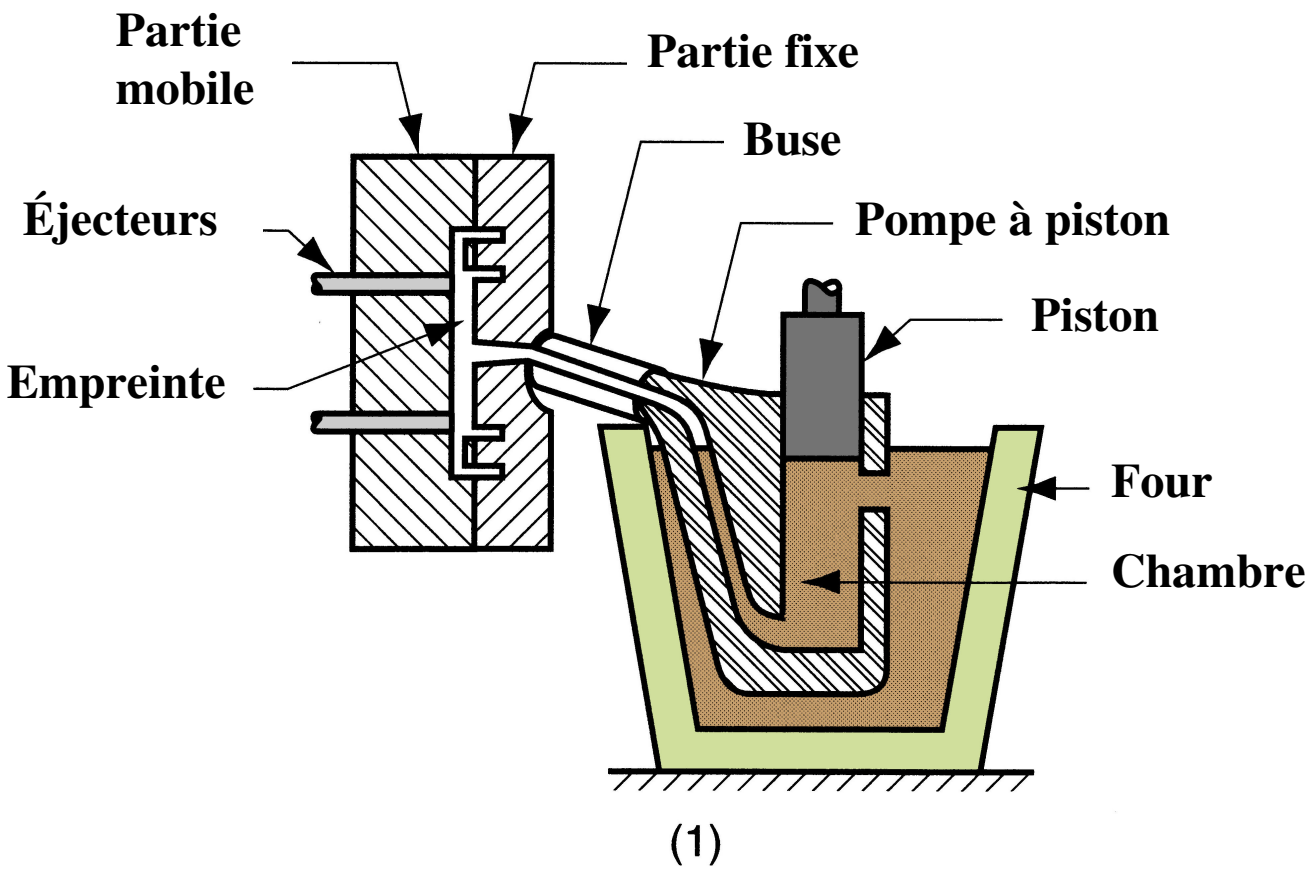
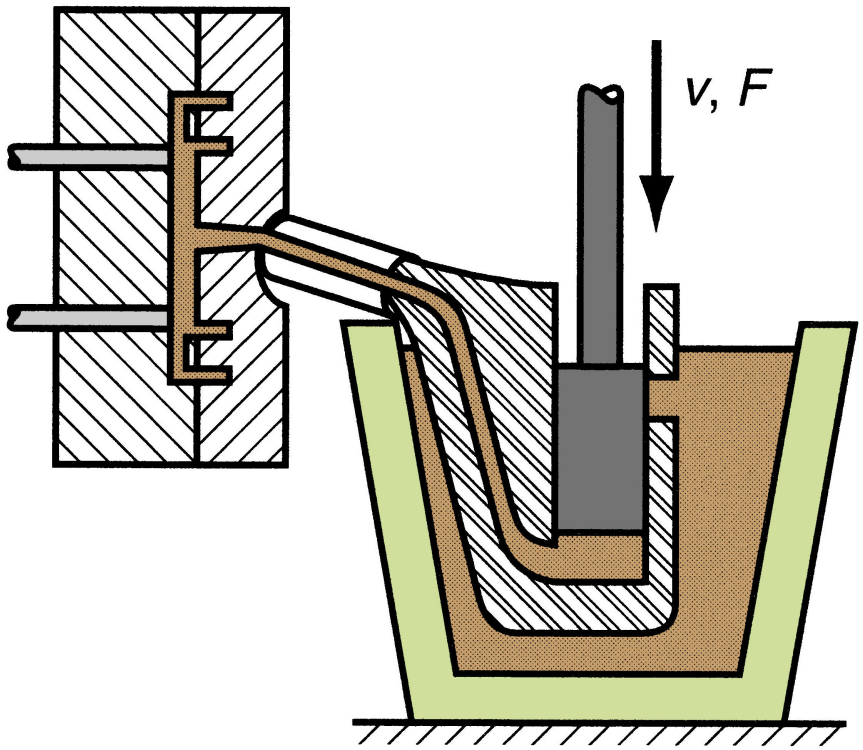


Figure 11.13 - Cycle du moulage en chambre chaude :
(1) Lorsque les coquilles sont fermées et que le piston est remonté le métal liquide rempli la chambre



(2)

Figure 11.13 - Cycle du moulage en chambre chaude :
(2) Le vérin force le métal à remplir les coquilles et maintien la pression durant le refroidissement et la solidification

Moulage en coquille sous pression en chambre froide

Le métal est coulé dans une chambre non chauffée et un piston injecte le métal dans les coquilles sous pression

- Cadence élevée mais moins qu'en chambre chaude à cause de la phase de remplissage de la chambre
- Métaux moulés : alliages d'aluminium, de magnésium…
- Technologie mieux adaptée aux alliages à plus haute température de fusion qu'en chambre chaude

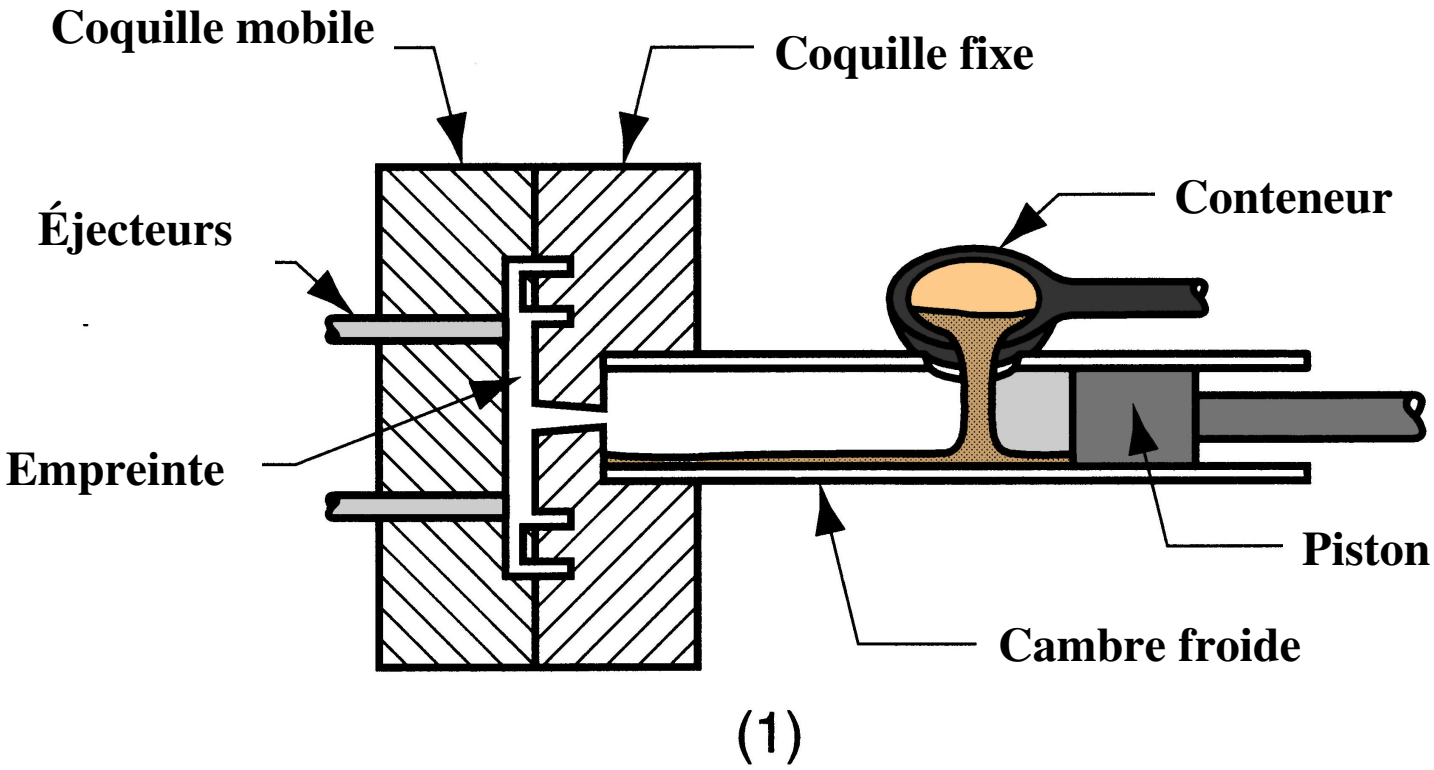
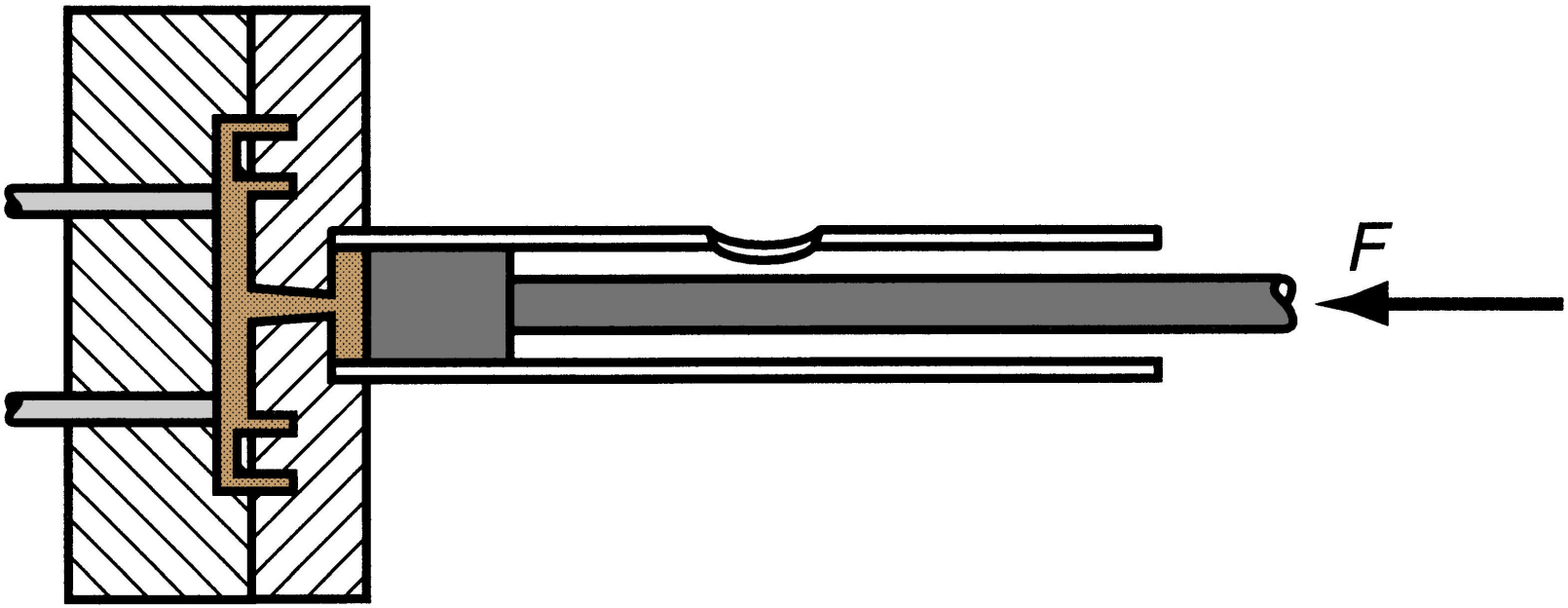


Figure 11.14 - Cycle de moulage en chambre froide :
(1) Lorsque les coquilles sont fermées le métal est coulé dans la chambre



(2)

Figure 11.14 - Cycle de moulage en chambre froide :
(2) Le piston force le métal dans l'empreinte et maintien la pression durant le refroidissement et la solidification

Les moules pour le moulage en coquille

- Habituellement réalisés en acier
- En tungstène et en molybdène (bonne propriétés réfractaires) pour mouler de l'acier
- Des éjecteurs sont nécessaires pour extraire la pièce
- Il faut lubrifier les coquilles pour prévenir le collage

Avantages et inconvénients du moulage en coquille

- Avantage :
  - Économique pour les grandes séries
  - Bonnes précisions dimensionnelle et bons états de surface
  - Des section fines sont réalisables
  - Le refroidissement rapide diminue la taille des grains ce qui augmente les propriétés mécaniques des pièces moulées
- Inconvénients :
  - Généralement limité aux métaux à faible température de fusion
  - La géométrie des pièces doit permettre le démoulage

Moulage par centrifugation

Ensemble des procédés pour lesquels le moule est entraîné en rotation à grande vitesse. Les forces d'inertie distribuent le métal liquide dans l'empreinte

- On peut citer :
  - La centrifugation à axe horizontal
  - A axe oblique
  - A axe vertical

Moulage par centrifugation

Le métal liquide est coulé dans un moule rotatif pour produire des tubes

- Dans certaines opérations la rotation du moule commence après que le métal soit versé
- Pièces : tuyaux anneaux…
- La forme extérieur peut être cylindrique, octogonal, hexagonal… mais la forme intérieur est théoriquement parfaitement cylindrique du fait de l'axi symétrie de révolution

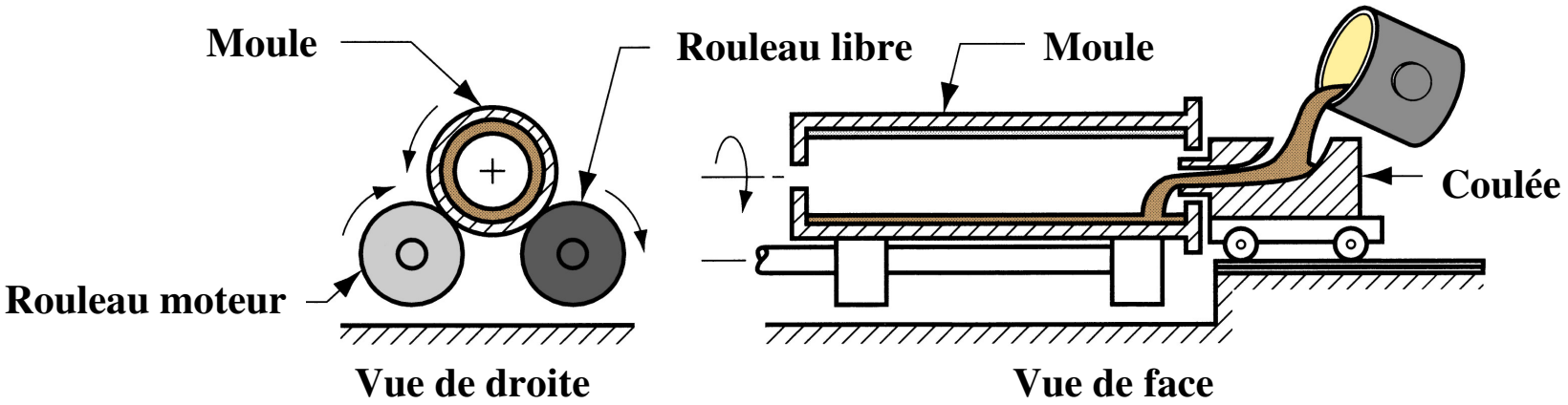


Figure 11.15 - Mise en oeuvre du moulage par centrifugation

Qualité des pièces moulées

Les défauts peuvent être classés de la façon suivante :

- Défauts communs à tous les procédés
- Défauts propres au moulage en sable

Défaut de remplissage

La pièce s'est solidifiée avant de remplir complètement l'empreinte

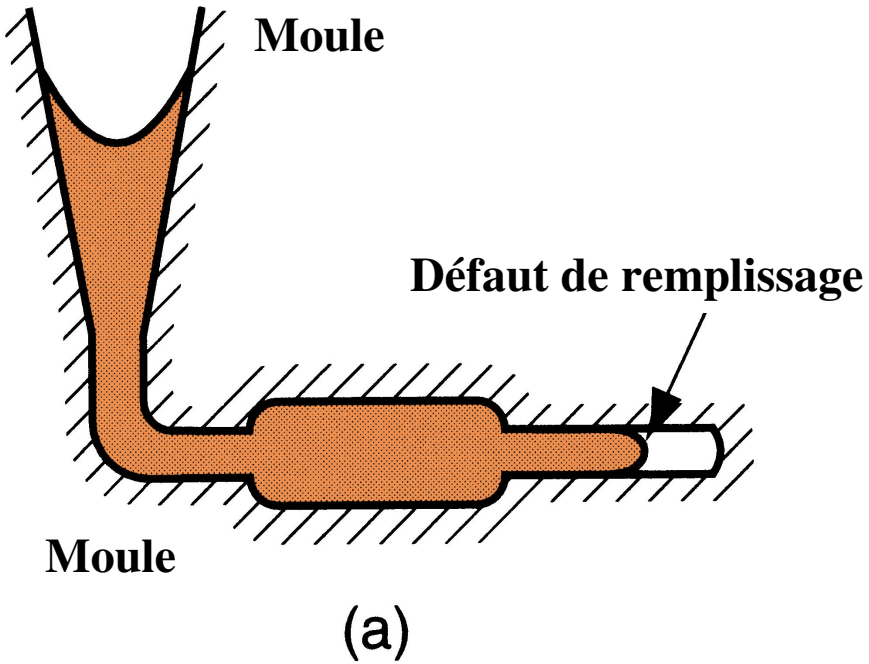


Figure 11.22 - Quelques défauts communs en fonderie : (a) défaut de remplissage

Soudure froide

Deux écoulements se rencontrent mais un refroidissement prématuré empêche la soudure de se faire

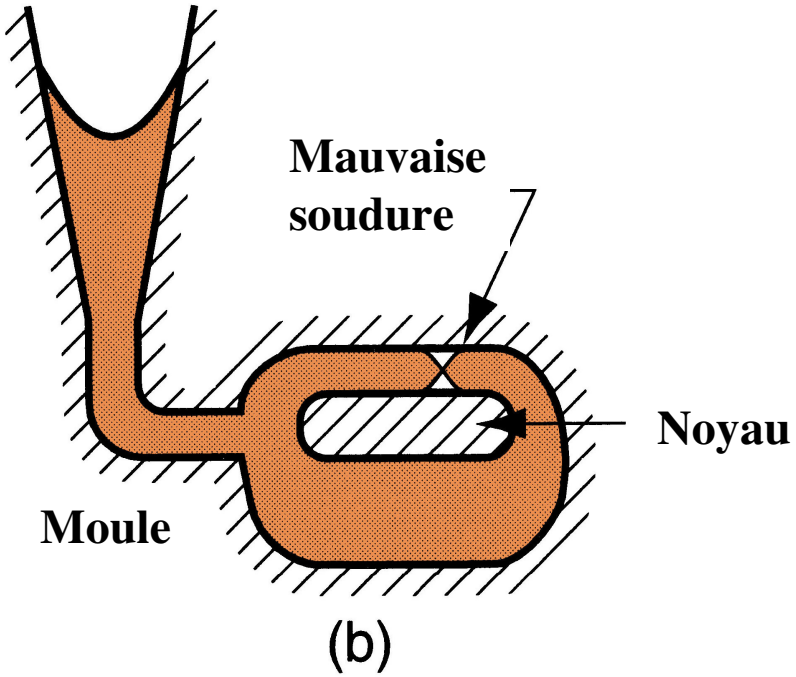
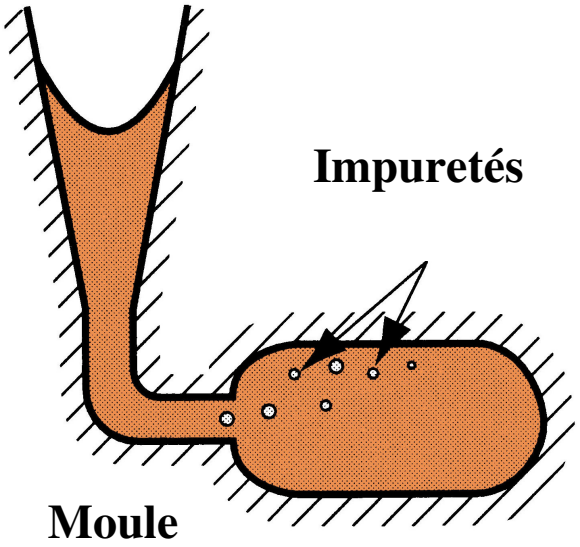


Figure 11.22 - Quelques défauts communs en fonderie : (b) soudure froide

Impuretés

Des impuretés peuvent être entraînées lors de la coulée et se trouve prises dans la pièce



(c)

Figure 11.22 -

Retassures

Dépression en surface ou vides internes causés par le retrait de solidification

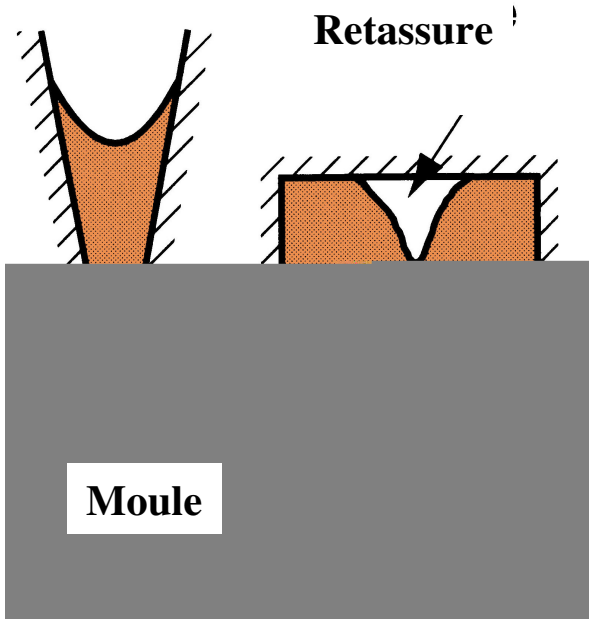


Figure 11.22 - Quelques défauts communs en fonderie : (d) Retassures

Soufflures

Cavité sphérique due a l'emprisonnement de gaz durant la coulé

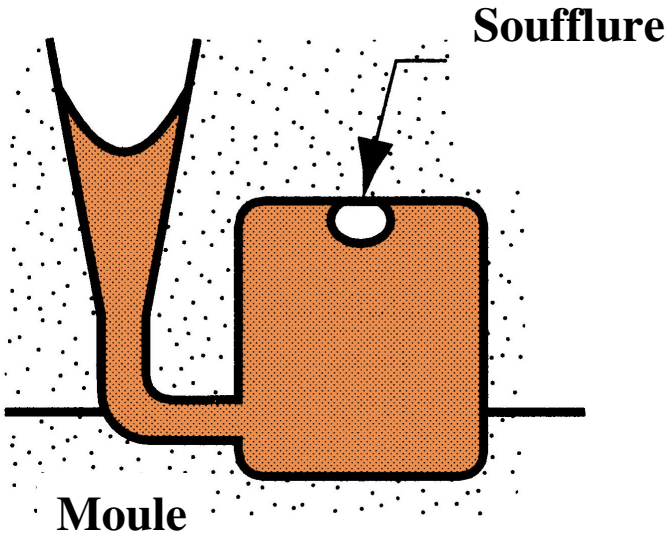
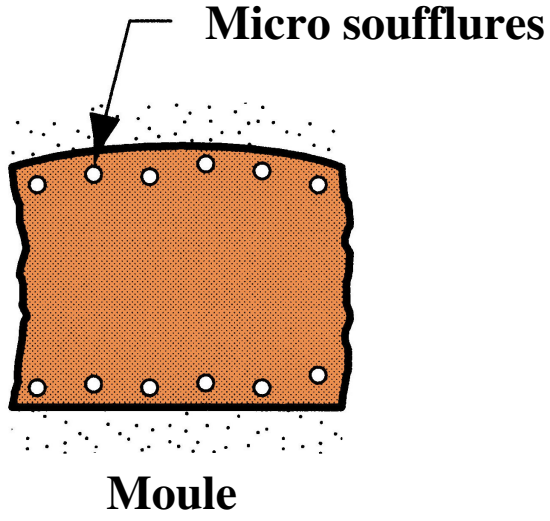


Figure 11.23 - Common defects in sand castings: (a) sand blow

Micro soufflures

Formation de micro-cavités sphériques de gaz sur ou près de la surface de la pièce



(b)

Figure 11.23 - Défauts communs en fonderie : (b) micro soufflures

Pénétration

Quand le métal fluide est très fluide il peut pénétrer dans les porosités du sable. La surface de la pièce est un mélange de métal et de sable.

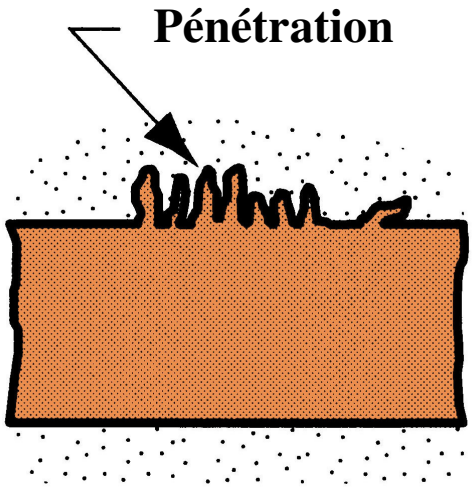


Figure 11.23 - Défauts en moulage en sable : (e) pénétration

Défaut de joint

Défaut de mise en position des deux demi moule l'un par rapport à l'autre

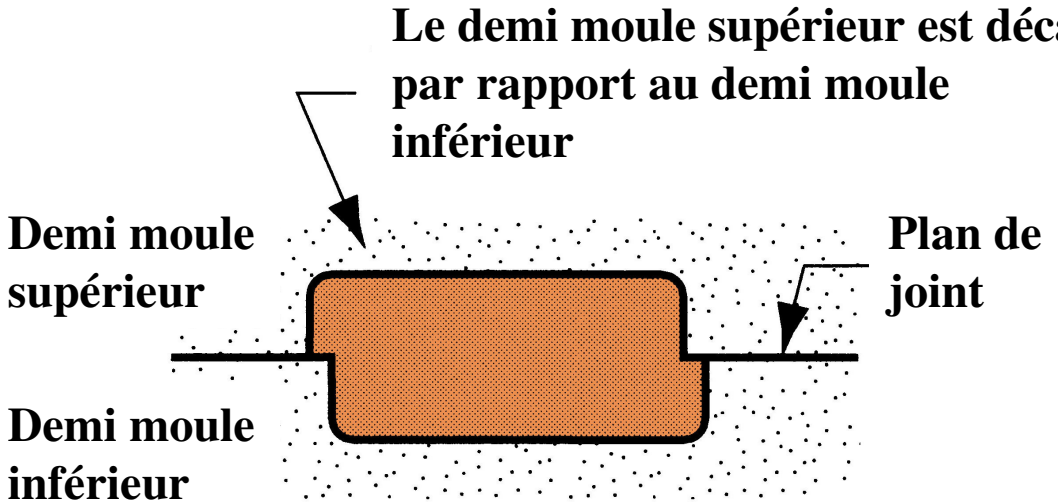


Figure 11.23 - Défaut de moulage en sable : (f) défaut de joint