



Moulage en moule permanent (ou en coquille)

Guy Morin, ing.
Centre de Métallurgie du Québec

17 mai 2019

Moulage en moule permanent (ou en coquille)

Auteur : Guy Morin, ing.

1. Introduction

Le bas point de fusion de l'aluminium relativement à celui des métaux ferreux permet l'usage d'un moule permanent pour mouler l'aluminium. On distingue trois variantes de ce procédé :

- Moulage en moule permanent gravité
- Moulage en moule permanent par basculement
- Moulage en moule permanent basse pression
- Deux variations applicables à ces trois procédés sont le moulage semi-permanent où un noyau en sable à prise chimique est utilisé dans le moule et le surmoulage sur un insert en acier ou en cuivre placée dans le moule.

Le principal avantage du procédé est le refroidissement rapide assuré par le moule métallique parfois assisté de canaux de refroidissement à l'air ou par un fluide caloporteur. Le refroidissement rapide assure une structure métallurgique plus fine qu'en moulage au sable et diminue fortement la formation de microporosité. Il en résulte l'obtention des meilleures propriétés mécaniques parmi les procédés de moulage de l'aluminium et une très bonne étanchéité.

Les alliages d'aluminium de fonderie sont adaptés au moule permanent, particulièrement s'ils ont une bonne résistance à la fissuration à chaud étant donné la rigidité du moule. Ils sont aussi adaptés pour obtenir une bonne fluidité et d'autres propriétés telles que : usinabilité, aptitude à l'anodisation, soudabilité, résistance à haute température, étanchéité. Le silicium est l'élément d'alliage qui permet d'obtenir la majorité de ces propriétés.

Le moulage en moule permanent est bien adapté aux pièces de moyenne et grande série de complexité simple à moyenne (figure 1) et offre les meilleures propriétés mécaniques parmi les procédés de moulage pour l'aluminium.

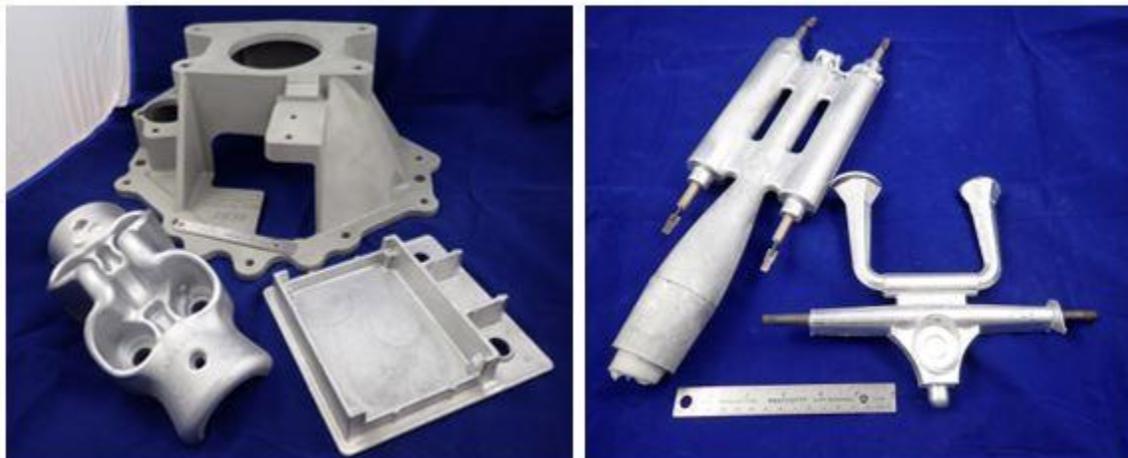


Figure 1. Pièces moulées et surmoulages réalisés en moule permanent

2. Éléments d'un moule permanent

Le moule permanent (figure 2) est constitué dans la majorité des cas de deux coquilles métalliques en alliage ferreux. Selon le nombre de pièces prévues, les matériaux utilisés pour la fabrication des coquilles sont :

- La fonte grise (séries de 1000 unités et moins)
- L'acier au carbone de type 1020,1045 ou l'acier allié 4140
- L'acier à outil de type H13.

Le moule contient aussi des tiges d'éjection en acier trempé qui sont montées sur une plaque mobile qui sert au démoulage de la pièce après la solidification et un temps de prise raisonnable pour sortir la pièce sans la déformer. La plaque mobile est reliée à un cylindre hydraulique actionné après le temps de prise. La plaque retourne à sa position initiale à la fermeture du moule soit par le cylindre hydraulique ou par l'intermédiaire d'une contre tige qui repousse la plaque et les tiges lors de la fermeture du moule. Des noyaux mobiles actionnés par des cylindres hydrauliques sont utilisés pour les parties latérales qui ne se démoulent pas dans le sens de l'ouverture ou pour les cavités. Si le moule utilise des inserts pour le surmoulage ou des noyaux en sable, le moule comportera des portées pour placer ces éléments. Le moule et les boîtes à noyaux (si utilisées) appartiennent au client.

Le dernier élément du moule est l'ajout des poteyages. Ceux-ci sont à base de produits réfractaires isolants (mica, mullite, talc) servant à protéger le moule et ralentir la solidification ou encore lubrifiants et conducteurs de chaleur (graphite, nitrure de bore) servant à accélérer la solidification et assister au démoulage. Le choix du poteyage isolant ou conducteur permet de définir un profil thermique dans le moule afin de promouvoir la solidification dirigée. Le poteyage est appliqué hors ligne avant le début de la production puis entretenu par application pendant la campagne de coulée. Le poteyage donne un bon fini de surface de 125 micro pouces RMS et plus; une certaine rugosité aide à évacuer l'air à l'interface moule-métal.

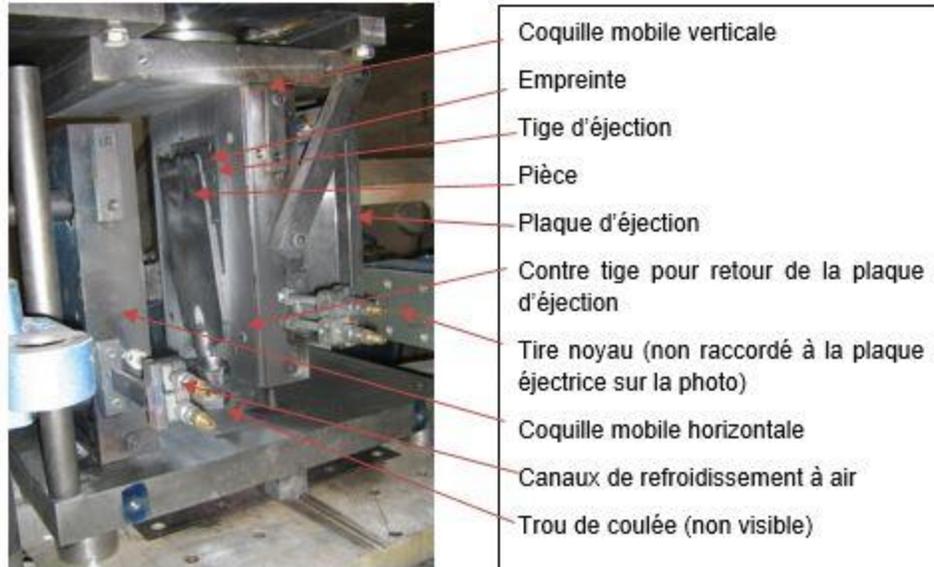


Figure 2. Éléments d'un moule permanent pour bloc à gradin (procédé basse pression)

L'extraction de l'air de la cavité est plus difficile en moule permanent qu'en moulage au sable puisque le moule est imperméable. Les moyens de sortie de l'air sont les évènements principaux (plus faciles à utiliser en mode gravité), les espaces entre les noyaux ou les tiges éjectrices, l'ajout de fines nervures sur les surfaces de partage du moule. Des trous additionnels peuvent être percés dans le moule, mais ceux-ci doivent être bloqués par des filtres ou des tiges carrées permettant seulement à l'air de passer.

Le fondeur est responsable de la conception du moule qui comprend les caractéristiques suivantes :

- Ajout du retrait de fonderie, car l'aluminium liquide se contracte lors de la solidification et à l'état solide. La contraction du liquide avant la solidification est habituellement compensée par les masselottes
- Ajout des angles de dépouille qui permet de retirer la pièce du moule
- Ajout des surépaisseurs d'usinage
- Conception du système d'alimentation pour remplir avec une vitesse optimisée qui réduit la turbulence et permet de remplir l'empreinte avant le début de la solidification
- Prévision de la solidification dirigée afin de terminer la solidification dans les masselottes, canaux d'alimentation ou encore dans des zones du moulage non- critiques au point de vue mécanique. Celle-ci est obtenue par le placement des canaux d'alimentation, de masselottes et de canaux de refroidissement au besoin
- Ajouts d'évidements pour localiser les noyaux ou les insertions si utilisés
- Conception des boîtes à noyaux s'il y a lieu.

Le fondeur peut s'appuyer sur des logiciels de simulation de remplissage et de solidification pour concevoir le système d'alimentation et masselottage du moule.

Une conception de pièce adaptée à la fonderie dès le départ augmente le degré du succès de la mise en production d'une pièce par moulage en moule permanent. Il est recommandé de :

- Utiliser des sections uniformes
- Éviter les masses de métal isolées loin des canaux d'alimentation
- Utiliser des rayons et limiter les angles vifs
- Tenir compte des axes de démoulage et de la perte de degrés de liberté de conception due au moule métallique
- Tenir compte des tolérances dimensionnelles plus élevées entre points situés de part et d'autre du plan de contact des 2 demi-moules
- Prévoir que le moulage aura des angles de dépouille et des marques faites par les tiges d'éjection.

3. Thermique du moulage permanent

Le défi du procédé est d'obtenir un profil thermique de moule assurant la solidification dirigée. On y parvient par :

- Une température de coulée stable établie par une cadence de coulée régulière qui permet de conserver la température du moule stable (autour de 400 °C. Ce cycle est : fermeture du moule, coulée, temps de solidification, temps de prise (assez long pour obtenir un gain de propriétés mécaniques et éviter les déformations au démoulage, mais aussi court pour éviter la fissuration dans le moule), ouverture du moule et démoulage, opérations d'entre coulée et attente avec moule ouvert si requis
- Un contrôle local de l'extraction de chaleur assuré par le choix des poteyages isolants ou conducteurs
- L'usage de canaux refroidis à l'air comprimé ou par un fluide caloporteur
- Des matériaux plus conducteurs comme un alliage cuivreux (cupro-aluminium afin d'éviter la dissolution du cuivre dans l'aluminium) peuvent être insérés dans le moule à certains endroits.

4. Avantages et capacités du moulage en moule permanent

Le moulage en moule permanent offre les meilleures propriétés mécaniques parmi les procédés de moulages à partir du métal liquide surtout les procédés par basculement et basse pression où la turbulence du remplissage est limitée. Ceci est dû à l'absence d'inclusion et au refroidissement rapide du métal. Le procédé permet la coulée de parois minces et épaisses.

Les tolérances dimensionnelles sont meilleures qu'en moulage au sable, car le moule ne change pas de dimension avec le temps. La perte au niveau des tolérances est liée à l'utilisation d'un poteyage neuf en début de campagne et à

l'accumulation de poteyage dans l'empreinte du moule pendant la campagne de coulée.

La conception de la pièce doit tenir compte du mouvement des deux coquilles au démoulage.

En général le procédé devient plus économique que le procédé au sable à partir de 3000 unités pour les petites pièces. Si la quantité de pièces dépasse les 10 000 pièces, il faut envisager le moulage sous pression si la géométrie est adaptée et que la pièce n'est pas trop épaisse. Un moule permanent peut avoir une durée de vie de 10 000 à 100 000 pièces.

Un autre avantage est l'élimination de défauts dû au sable de fonderie. Finalement le procédé est écologique en ce sens qu'il présente une économie en énergie de préparation du sable et n'émet aucun gaz nocif.

5. Marchés du moulage en moule permanent

En résumé le procédé offre les caractéristiques suivantes :

- Économie de la fabrication des moules au sable si la quantité le permet.
- Bonnes tolérances dimensionnelles, bon fini de surface plus rugueux et plan de joint peu visible.
- Optimisé pour les moyennes à fortes séries.
- Usinage requis après le moulage, mais certains détails fonctionnels comme des hauteurs ou longueurs. Tous de détails fonctionnels peuvent être moulés sans usinage.
- Adapté à la production de pièces simples à moyennement complexes avec un degré de liberté de conception plus limité, aussi limité au niveau des alliages.

Le marché du moulage en moule permanent est centré sur les pièces de séries. L'usage structural est possible après traitement thermique. On trouve des pièces commerciales : attaches, boîtiers, pièces d'équipement électrique, attaches structurales, pièces automobiles structurales (piston, tête de moteur, roue en aluminium).

6. Moulage en moule permanent gravité

Le moule permanent est rempli en mode statique par le haut. Le procédé est utilisé pour de petits moules habituellement simples (figure 3). Le moule peut être monté sur des charnières ou sur une presse à ouverture avec plan vertical avec utilisation de tiges éjectrices pour des moulages plus complexes.

L'aluminium est un métal qui s'oxyde facilement et doit être coulé en source c'est-à-dire par une descente de coulée unique qui va jusqu'en bas du moule et qui est restreinte à cet endroit afin d'engorger la descente de liquide. Cela permet le remplissage lent du bas vers le haut du moule sans entrainement d'air. Le principal problème du procédé est l'augmentation de la vitesse de remplissage au bas du moule dès que le moule dépasse 40 cm de hauteur qui s'accompagne de formation d'oxydes dans le moule. De plus, le métal le plus froid remonte en haut et le bas du moule s'échauffe rapidement après quelques cycles de coulée; on obtient un profil thermique de moule désavantageux avec le bas du moule chaud et le haut froid ce qui est contraire au principe à la solidification dirigée si une masselotte est placée au-dessus de la pièce dans le moule.

On élimine ces problématiques par le procédé de moulage par basculement.



Figure 3. Moule permanent gravité monté sur charnières pour le moulage de barreaux de traction coulés à part (gauche); moule permanent gravité basculé (droite)

7. Moulage en moule permanent par basculement

Le moule est monté sur une presse basculante (figure 4). Le moule est en position horizontale pour opérations entre les coulées (éjection du moulage, retouches du poteyage, installation de filtre et de noyaux semi-permanents). Des godets fixés au moule sont remplis de métal liquide en position horizontale et dès la fin du remplissage, le moule est basculé lentement habituellement à la verticale. Le basculement contrôlé du moule permet de ralentir le remplissage et de diriger le métal à diverses hauteurs dans le moule en terminant avec du métal chaud dans le haut du moule et les masselottes.

Le moule est souvent alimenté des deux côtés simultanément à partir de deux godets placés de chaque côté du moule. Le bas du moule (en position

horizontale de la coquilleuse basculante) est habituellement fixe et le haut du moule est mobile et contient les tiges éjectrices.

Ce type de moulage est très répandu; il produit des pièces d'excellente qualité métallurgique et assure une bonne productivité. L'usage d'inserts métalliques ou de noyaux semi-permanents est possible.



Figure 4. Moulage par basculement (photo Paber Aluminium)

8. Moulage en moule permanent basse pression

Le moule permanent est placé sur une presse au-dessus d'un four et relié au bain de métal par un tube de transfert immergé dans le bain d'aluminium liquide (figure 5). Pendant la phase de coulée, une pression d'air inférieure à 1 bar est appliquée pour remplir le moule par le bas. Cela permet d'éliminer la turbulence par un remplissage contrôlé du moule. De plus, une pression s'approchant de 1 bar est appliquée en fin de remplissage afin d'aider à l'alimentation et à la réduction de la porosité. Une pression de 1 bar correspond à une tête de métal d'environ 3 mètres de haut. Puisque la pression est relâchée avant le gel dans le tube de transfert il n'y a pas de métal consommé pour alimenter le moule ce qui donne un rendement de métal pouvant atteindre 90 %.

Le moule est monté sur une presse et le dessus du moule est installé sur le plateau mobile, un cylindre hydraulique actionnant la plaque qui contient les tiges éjectrices est installé du côté du plateau mobile. Le moule peut aussi contenir des parties (noyaux) mobiles ou encore utiliser des noyaux en sable.

Le moulage basse pression est désavantageux au niveau de la conception, car le moule ne peut être alimenté qu'à partir du centre de la cavité car la solidification doit se terminer dans le tube d'alimentation de la pièce. Pour cette raison, il est bien adapté à la coulée de jantes automobiles et de pièces de géométrie circulaire. Pour les pièces plus complexes, le métal peut être amené par 2 ou 3 points d'entrée. On peut aussi utiliser des moules multi-empreintes alimentées par des canaux disposés en étoile et connectés au tube de transfert central.

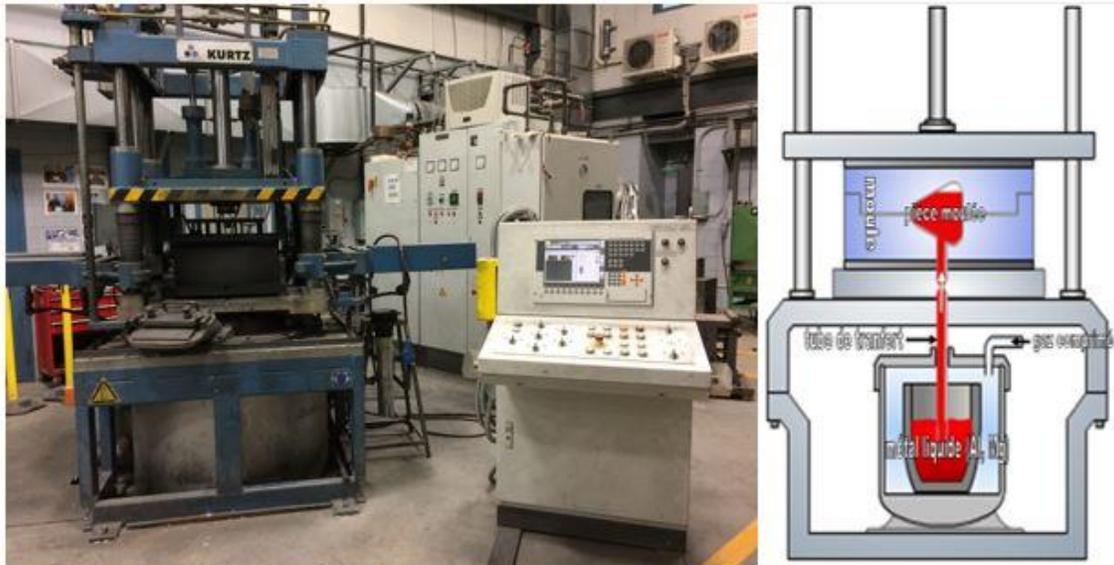


Figure 5. Moulage en moule permanent basse pression

Une variante du procédé utilise une contrepression appliquée dans l'empreinte et régulée avec celle du remplissage (appliquée dans le four) afin de limiter encore plus la turbulence pendant le remplissage. Cette variante permet le moulage de pièces épaisses à haute intégrité structurale et a tendance à remplacer le procédé de moulage forgeage (*squeeze casting*) où le métal est injecté par le bas à basse vitesse avec forte pression en fin de cycle.

9. Moulage en moule semi-moule permanent

Dans cette variante du procédé, un noyau en sable à prise chimique est installé dans le moule avant la coulée du métal, en majorité des cas afin de fabriquer une cavité qui ne se démoule pas dans le sens du mouvement des coquilles. Bien qu'on y gagne en degrés de liberté de conception on ajoute les problématiques suivantes :

- les gaz à évacuer, car le moule est hermétique;
- les tolérances plus larges du noyau dû à son placement moins précis dans le moule;
- la perte des propriétés mécaniques due aux inclusions de sable et au refroidissement plus lent;
- le coût additionnel des boîtes à noyaux et de fabrication des noyaux.

Le procédé est utilisé par exemple pour fabriquer des tubulures courbées.

10. Alliages pour le moulage en moule permanent

Le marché est largement dominé par la série 356 (356, A356, C355). La présence de silicium permet d'abaisser le point de fusion à 577 °C. La solidification débute cependant autour de 620 °C selon la quantité de silicium contenu. L'alliage possède donc un intervalle de solidification (passe par un état pâteux solide liquide). Le faible point de fusion combiné à une résistance mécanique faible de l'alliage permet de refermer toute fissure en formation lors de la solidification; l'alliage est donc peu sujet à la fissuration à chaud. Puisque le moule permanent permet un refroidissement rapide et que le four est fermé, le besoin en dégazage du bain de métal liquide est moins critique et peut être effectué au début de la campagne ou à intervalle régulier. Pour les pièces structurales, on préfère généralement les alliages à basse teneur en fer comme le A356 pour obtenir un allongement à la rupture maximale. L'alliage A356 peut se traiter thermiquement à l'état T6 pour les propriétés maximales ou à l'état T5 pour obtenir un compromis entre propriétés mécaniques et déformation à la trempé pour les pièces minces. L'alliage A356 offre une bonne soudabilité ce qui permet les réparations (si le client accepte). Les pièces sont généralement utilisées non peintes ou peintes; l'anodisation sortira de couleur grise à cause du silicium.

Les valeurs données dans le tableau 1 sont les valeurs minimales demandées pour les barreaux tirés à part sauf pour les alliages non couverts par ASTM où les valeurs typiques sont données. De bonnes pratiques de fonderie permettent souvent d'obtenir des propriétés qui dépassent de 10 à 20 % les valeurs minimales.

Tableau 1 - Principaux alliages pour le moulage en moule permanent

Alliages et état	Propriétés mécaniques minimales selon ASTM B108M pour les barreaux coulés à part			Commentaires et utilisations
	Résistance mécanique MPa	Limite élastique MPa	A %	
356.0 F	145	70	3	Alliage d'usage général pour des pièces non sollicitées. À l'état brut de coulée, il offre le coût minimum et les propriétés mécaniques les plus faibles.
356.0 T6	230	150	3	
A356.0 T61	260	180	5	Alliage d'usage général. À l'état durci, il offre le coût minimum et les propriétés mécaniques les meilleures.
319 F	185	95	2.5	Alliage de résistance moyenne à l'état brut de coulée qui conserve ses propriétés mécaniques à chaud à coût minimum. Il peut se traiter thermiquement à l'état T6.
A319.0 F	234*	131*	2.5*	Alliage de résistance moyenne à l'état brut de coulée qui conserve ses propriétés mécaniques à chaud à coût minimum. Il peut se traiter thermiquement à l'état T6.
A319.0 T6	276*	186*	3.0*	
C355 T61	205	205	3	Alliage de résistance légèrement supérieure au 356, il contient un peu de cuivre qui permet de conserver ses propriétés mécaniques à chaud.
A413 *	220	145	2	Pièces pour résistance à l'usure et pièces d'étanchéités.

* Alliages non couverts par ASTM B108, les valeurs typiques données sont plus élevées qu'une valeur minimum

11. Fonderies québécoises offrant le procédé de moulage en moule permanent

Entreprise	Site Internet	Localisation
CIF Métal Ltee	www.cifmetal.com	Thetford Mines
Fondremy Inc.	www.fondremy.com	Chambly
Métallurgie Syca Inc.	www.syca-inc.com	Saint-Dominique
Fabrication powercast Inc.	www.powercast.ca	Saint-Eustache
Technologie du magnésium et de l'aluminium	www.tma-casting.com	Trois-Rivières

Références

- ASM Handbook Volume 15 Casting, ASM International, Metals Park OH 1998
- AFS Aluminum casting technology 3rd edition American Foundry Society Schaumburg IL 2017
- ASTM B108/B108M-14 Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings, ASTM International West Conshohocken, PA 2014