



Moulage sous pression (die casting)

Guy Morin, ing.
David Levasseur, Ph.D.
Centre de Métallurgie du Québec

12 juin 2019

Moulage sous pression (die casting)

Auteurs : Guy Morin, ing. et David Levasseur, Ph.D.

1. Introduction

Le bas point de fusion de l'aluminium permet l'usage d'un moule permanent, en acier, pour en faire des pièces de fonderie. En moulage sous pression, un piston d'injection pousse l'aluminium liquide dans la cavité du moule puis compresse la pièce pendant la solidification. Typiquement, le métal liquide atteint des vitesses aux attaques jusqu'à 60 mètres par seconde et la pression appliquée peut atteindre jusqu'à 800 bar pendant la solidification. Pour contenir la pression exercée sur la pièce, la presse de moulage garde le moule fermé par une force de fermeture qui dépend de la dimension de l'empreinte et de la pression appliquée par le piston. Les plus petites presses ont une capacité de 1000 kN et les plus grosses 35000 kN (3500 T). La force de la presse est donc directement liée à la surface projetée de la pièce moulée.

Le procédé de moulage sous pression se divise en 6 phases : le transfert de métal liquide, la phase d'approche de l'injection, l'injection rapide, l'intensification, l'éjection et la lubrification du moule. Chaque phase est optimisée pour maximiser la cadence de production et minimiser le nombre de pièces rejetées.

On distingue trois variantes de ce procédé :

1. Moulage sous pression traditionnel
2. Moulage sous pression sous vide incluant le moulage sous vide pour applications structurales
3. Moulage sous pression semi solide, beaucoup moins répandu.

Le principal avantage du procédé est la cadence rapide qui permet d'abaisser les coûts de production et d'approcher les marchés de masse comme l'automobile. Le refroidissement rapide assuré par le moule métallique produit une structure métallurgique très fine en surface appelée peau qui contribue à l'obtention de bonnes propriétés mécaniques. Le fini de surface et les tolérances dimensionnelles sont excellentes. Par contre, la liberté de conception est pratiquement limitée à l'axe d'ouverture du moule comme pour les pièces montrées à la figure 1. Le procédé demande peu de main-d'œuvre, mais un coût d'immobilisation et d'outillage élevé. Pour une grande série de plus de 10 000 pièces, le procédé de moulage sous pression offre le coût de production par pièce le plus faible parmi les procédés de fonderie.

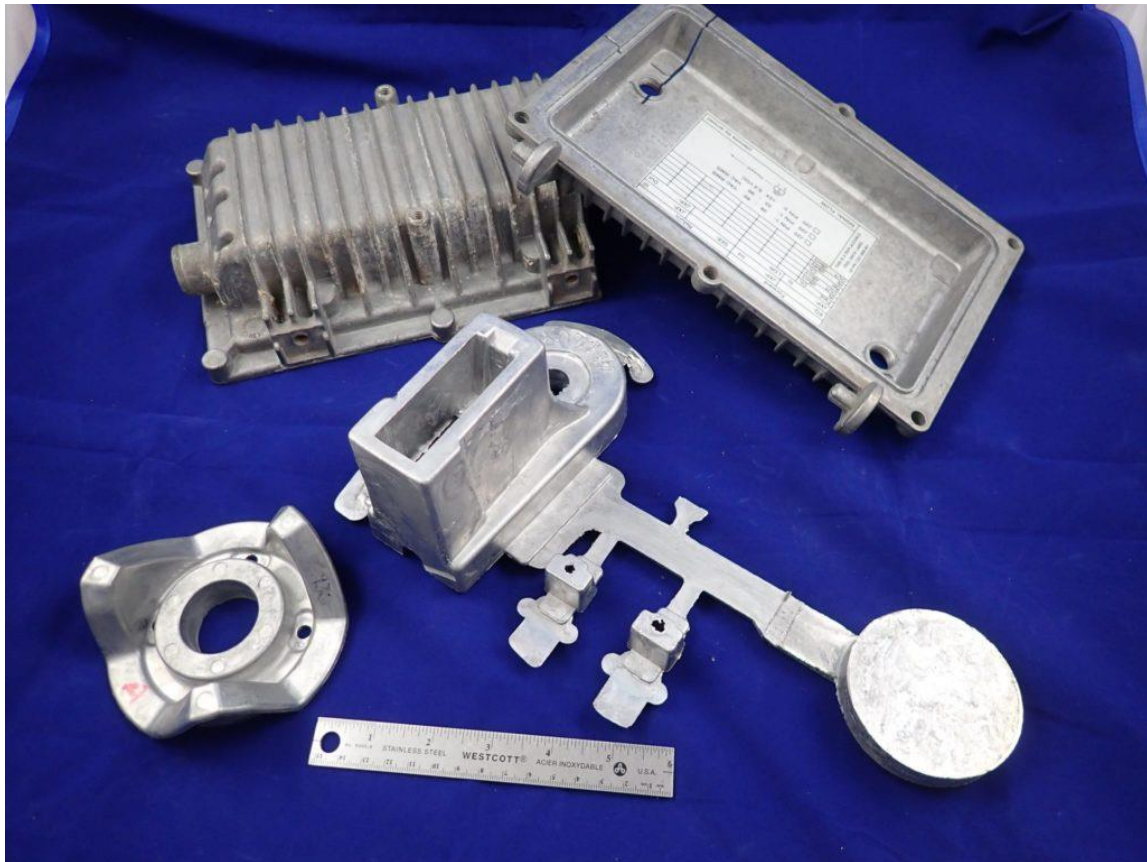


Figure 1. Pièces réalisées par moulage sous pression

Le désavantage principal du procédé traditionnel (où aucun vide n'est appliqué dans la cavité) est la présence de porosité au centre des pièces moulées sous pression dû à l'air emprisonné pendant l'injection. La présence d'air emprisonné cause la formation de cloques lorsque la pièce est chauffée. Ces cloques sont causées par l'expansion du gaz emprisonné dans la pièce et ne permet pas de réaliser de traitements thermiques de mise en solution standard en vue d'obtenir des propriétés mécaniques optimales (T6); ce phénomène limite aussi l'utilisation de la soudure ou l'application de certaines peintures cuites. Heureusement, la résistance mécanique est assurée par la peau du moulage ce qui fait que plusieurs pièces moulées en fonderie sous pression traditionnelles sont encore moulées avec succès par cette méthode qui représentent plus de 50 % des moulages d'aluminium réalisés. En fonderie sous pression traditionnelle, on utilise souvent des alliages secondaires (recyclés) fortement dosés en élément d'alliage (fer et zinc) qui donne de bonnes résistance mécanique malgré un allongement inférieur à 3 %. Un traitement thermique de type T5 est utilisé pour augmenter la résistance mécanique des alliages moulés sous pression sans provoquer le cloquage des pièces.

On obtient une très bonne qualité de pièce par l'usage du vide dans l'empreinte pour réduire la présence d'air emprisonné, et par le pilotage en temps réel du cycle de moulage. Le procédé sous pression sous haut vide (<50 mbar) combiné au développement d'alliages primaires (de première fusion) à basse teneur en fer permet d'obtenir un allongement à la rupture maximal et rend le traitement thermique possible pour les pièces dédiées aux applications structurales. Ces

développements sont motivés par l'allègement des véhicules terrestres et le moulage sous pression sous vide apporte la solution idéale d'un procédé de moulage à forte cadence pour les pièces structurales moulées en aluminium. Le développement de ce procédé et des alliages dédiés est présentement le plus actif du domaine de la fonderie.

2. Éléments d'un moule et de la cellule de production

Le procédé de moulage sous pression se décline en deux principes d'alimentation du métal liquide soit la technologie de chambre chaude et la technologie de chambre froide. Le procédé en chambre chaude utilise un piston directement dans le bain de métal en fusion pour alimenter le moule, tandis que le procédé de chambre froide utilise un conteneur « froid » dans lequel est transféré, à la louche ou par robot doseur, le métal liquide requis pour remplir la pièce (voir Figure 2). L'acier étant dissout par l'aluminium, la production de pièces d'aluminium moulées sous pression ne se fait qu'en chambre froide.



Figure 2. Remplissage manuel du conteneur et début de l'injection (la majorité des fonderies québécoises utilisent un robot doseur pour cette opération)

2.1 Description du moule de moulage sous pression

Le moule sous pression est constitué dans la majorité des cas de deux coquilles métalliques en alliage ferreux. Selon le nombre de pièce prévues les matériaux utilisés pour la fabrication des coquilles sont :

- L'acier à outil de type H13 pour les empreintes
- L'acier allié de type 4140 ou acier à outil P20 pour les parties de support

Les tiges d'éjections sont toujours fabriquées avec un matériau plus dur et dans certains cas elles sont traitées superficiellement (par exemple par nitruration) pour limiter le collage de l'aluminium.

Le moule (figure 3) est composé d'une partie fixe du côté de l'alimentation en métal liquide et d'une partie mobile de l'autre. La partie fixe contient le trou d'entrée du métal et une partie de l'empreinte de la pièce. Elle peut aussi avoir des noyaux (fixes ou à tiroir) pour mouler des cavités dans la pièce. La partie

mobile contient les tiges d'éjections servant au démoulage en plus des noyaux et de l'empreinte de la pièce. Les moules sont dotés de canaux de refroidissement à l'huile (chauffée) ou à l'eau qui servent aussi à préchauffer le moule au départ dans le cas de l'huile chaude.

Pour la réduction des coûts d'outillage, l'empreinte est souvent constituée d'un insert principal placés dans un cadre plus gros et permanent pouvant produire plus d'un type de pièces. Les inserts ou les moules appartiennent typiquement au client.

Le procédé est bien adapté aux parois minces jusqu'à 1,5 mm. Il est préférable d'utiliser des sections uniformes se solidifiant simultanément. Il n'y a pas de masselottes et les attaques sur les pièces sont petites afin de faciliter la coupe sur des presses d'ébavurage après la coulée. La conception des pièces utilise largement les nervures pour augmenter la rigidité et la résistance mécanique ce qui aide aussi remplir l'empreinte rapidement avant la solidification de l'alliage et à évacuer les gaz. On contrôle la turbulence du métal dans l'empreinte par la vitesse d'injection du métal, la dimension et le positionnement des canaux d'alimentation et des attaques, la forme de l'empreinte (principalement des nervures), et l'utilisation de talons de lavage (petits espace ajoutés au bout du moulage; figure 4) qui servent à équilibrer le mouvement du métal et à capter les inclusions formées au remplissage. Dans le cas du sous vide, les paramètres d'application du vide ont aussi une importance pour le remplissage.

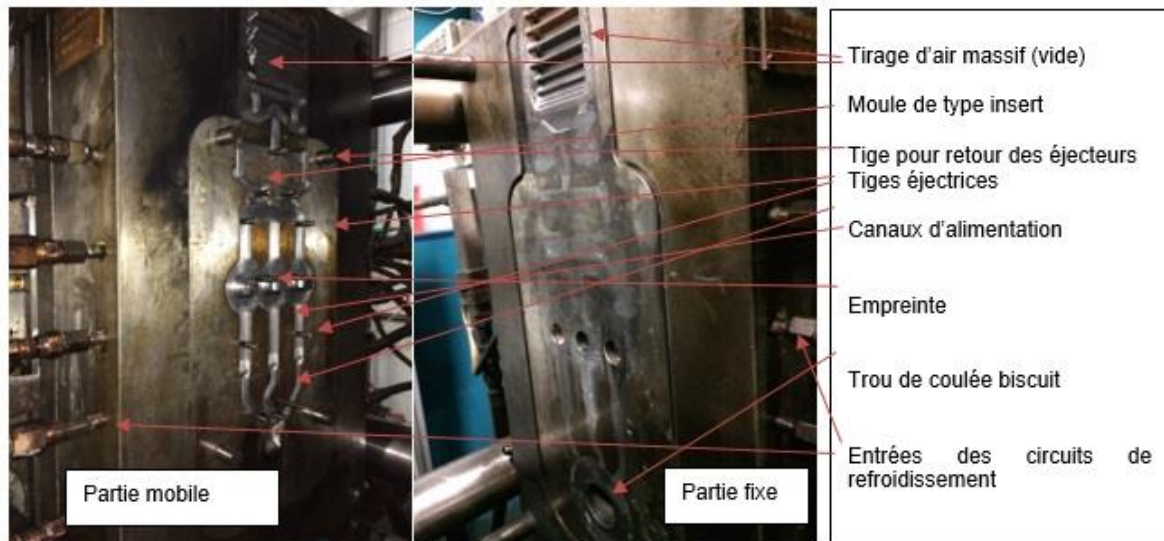


Figure 3. Éléments d'un moule sous pression

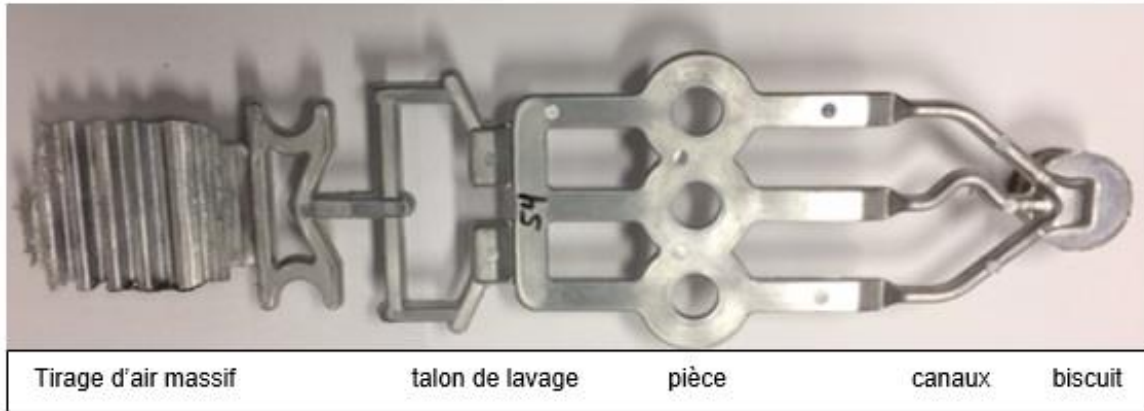


Figure 4. Moulage produit avec le moule de la figure 3

2.2 Description de la presse de moulage sous pression

La presse de moulage (figures 5 et 6) est constituée de trois unités principales : l'unité d'injection, l'unité de fermeture et les périphériques (robot verseur, bras de lubrification, système de tirage d'air). L'ensemble de la machine est actionnée grâce à un moteur hydraulique.



Figure 5. Éléments d'une presse sous pression

- A** - Valves du système de refroidissement du moule et console de programmation
- B** - Groupe de fermeture, colonnes, plateaux et moule
- C** - Console d'opération, conteneur, piston, accumulateur et intensification au gaz, four à résistance visible à l'avant



Figure 6. Moteur et réservoir hydraulique à arrière de la presse

L'unité d'injection est un système hydraulique complexe composée d'un accumulateur d'injection, d'un vérin d'injection, d'un accumulateur multiplicateur, d'un vérin multiplicateur et d'un vérin de positionnement du cylindre d'injection. Ces composantes permettent de moduler la vitesse du piston d'injection en 3 phases afin d'obtenir une vitesse lente pour l'approche (phase 1 du remplissage), une accélération rapide grâce à l'accumulateur d'injection lors du remplissage (phase 2) et la compaction du métal à l'aide de l'accumulateur multiplicateur lors de l'intensification (phase 3). Les systèmes modernes permettent un contrôle précis de la courbe de vitesse, une transition progressive entre la vitesse d'approche et de remplissage; tandis que les systèmes plus anciens sont souvent limités à une vitesse unique pour l'approche et une vitesse de remplissage.

L'unité de fermeture est composé d'un plateau mobile qui contient le système d'éjection et d'un plateau fixe où se trouve l'accouplement avec l'unité d'injection. Un système de fermeture constitué de leviers à genouillères sert à appliquer la force de fermeture sur les plateaux de la machine. Cette force de fermeture doit être supérieure à la force exercée par le métal pendant l'intensification. La force exercée par le métal se calcul selon la formule suivante :

$$F = P_{\text{int}} * A$$

où F est la force exercée par le métal, P_{int} est la pression d'intensification et A est la surface projetée de la pièce incluant le biscuit et les chemins de coulés/talons de lavage.

Typiquement, il est recommandé d'avoir une force de fermeture d'au moins 20 % plus élevée que la force d'ouverture exercée par le métal. La presse est fabriquée avec un bâti solide et l'alignement des plateaux mobile et fixe est assuré par quatre colonnes rigides. Ces colonnes sont placées en traction sous l'effet du système de fermeture et doivent être bien balancées pour favoriser une application uniforme de la force de fermeture.

La presse est munie des connexions périphériques pour les systèmes de thermorégulation du moule, du cylindre et du piston d'injection, pour le dosage du métal liquide, la lubrification automatique du moule, le tirage d'air, l'automate programmable, les interfaces d'opération et les éléments de sécurité.

La presse peut aussi contenir ou être reliée à un système d'acquisition de données et de pilotage en temps réel du cycle d'injection (figure 7). Des capteurs avec réponse rapide mesurent la pression et la position du piston d'injection de manières quasi instantanée avec rétroaction pour le maintien des paramètres à l'intérieur de fourchettes préétablies. L'information peut être enregistrée ou consultée hors ligne ou à distance et/ou utilisée pour le contrôle statistique de la qualité.



Figure 7. Chauffe moule et système de pilotage en temps réel (à droite)

Le lubrifiant sert à faciliter le démoulage et refroidir le moule. Cependant cette pratique tend à être minimisée à cause de la plus grande disponibilité de logiciels de simulation permettant de concevoir la thermorégulation du moule de manière plus exacte et par souci d'économie de lubrifiant et d'optimisation de temps de cycle. Le lubrifiant appliqué sur le moule entre les injections est 100 % liquide et ne contient aucune suspension céramique comme en moule permanent; il n'affecte pas les tolérances dimensionnelles. Il est appliqué manuellement ou, le plus souvent, de manière automatique.

Le système de thermorégulation consiste en un chauffe moule avec fluide caloporteur qui sert aussi au refroidissement du moule. Celui-ci peut aussi être relié à un système d'acquisition sophistiqué de température sur le moule pour contrôle en boucle fermée. La cellule peut contenir un bac d'eau pour tremper les pièces après la coulée et une presse d'ébavurage pour couper le système d'alimentation aux attaques. La cellule de production peut être entièrement robotisée allant du chargement du four de maintien, à l'installation d'insert et de l'application du lubrifiant la coupe des attaques.

Dans le cas du procédé sous vide, on retrouve une pompe à vide et un réservoir de vide à proximité (figure 8).



Figure 8. Pompe et réservoir de vide

2.3 Conception de l'outillage

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 la pression d'intensification.
- Ajout des angles de dépouille qui permettent d'éjecter la pièce.
- Conception du système d'alimentation calculé pour remplir l'empreinte avec le minimum de turbulences avant le début de la solidification.
- Conception du système d'éjection.
- Conception de noyaux à tiroirs pour les cavités complexes.

La modélisation du remplissage et de la solidification est largement utilisée pour la conception des moules sous pression dû aux couts élevés de modification des outillages.

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 sous pression. En général, il faut :

- Utiliser des sections minces uniformes
- Éviter les masses de métal isolées loin des canaux d'alimentation
- Utiliser des rayons et limiter les angles vifs
- Utiliser des nervures au lieu de parois pleines
- Tenir compte de l'axe (quasi unique) de démoulage et la perte de degré de liberté de conception qui y est associée
- Tenir compte des tolérances associées au-dessus et au-dessous du moule qui ne sont pas moulées ensemble
- Prévoir que le moulage aura des angles de dépouille et sera marqué par les tiges d'éjection.

2.4 Avantages et capacités du moulage sous pression

Le moulage sous pression offre les meilleures tolérances dimensionnelles parmi les procédés de moulage. On peut mouler des détails fins et des petites cavités ainsi que du lettrage d'identification fin. Le moulage sous pression se caractérise par la possibilité de mouler des pièces à parois minces jusqu'à 1,5 mm, entourées de nervures de renforcement. Le fini de surface est excellent et on obtient facilement 60 micropouces RMS, mais une valeur de 90 micropouces RMS est plus conservatrice. Il est possible de faire des pièces structurales grâce à la structure fine due au refroidissement rapide, à l'usage du sous vide et des alliages primaires à basse teneur en fer. On peut aussi installer des inserts dans le moule et effectuer du surmoulage, par exemple en acier.

Le procédé présente certains avantages écologiques comme l'élimination de moule en sable, la possibilité d'utiliser des alliages recyclés pour fabriquer des pièces commerciales et le minimum de finition après le moulage.

La très forte pression du métal exclut l'utilisation de noyaux en sable et, si on utilise un noyau métallique (tiroir) dans un autre axe, celui-ci doit résister à la poussée du métal; par conséquent être assisté par un système hydraulique plus puissant. On tente donc d'éviter l'usage de noyaux ou encore on utilise un noyau qui est éjecté avec la pièce et enlevé après la coulée. Notons l'usage du noyau de sel pour des cavités complexes, qui est ensuite retiré par nettoyage à l'eau.

2.5 Marchés du moulage sous pression

En résumé, le procédé offre les caractéristiques suivantes :

- Prix minimum pour les grandes séries
- Excellentes tolérances dimensionnelles et fini de surface
- Usinage minimum requis après le moulage
- Pièces avec un degré de liberté de conception limité dans 2 axes
- Large choix d'alliage possible

Le marché du moulage sous pression traditionnel est centré sur les pièces de série. L'industrie de la petite quincaillerie, attaches, boîtiers (couvercles), pièces automobiles (couvercles de valves, supports de bras d'essuie-glace, carters, petits blocs moteurs).

Les procédés sous vide avec alliages structuraux et le moulage semi solide permettent la fabrication de pièces structurales pour le marché automobile (berceaux moteurs, piliers A et B, structures de portières, pièces de liaison).

3. Moulage sous pression traditionnel

Ce procédé de moulage permet d'obtenir avec efficacité des pièces commerciales en grande série. La résistance mécanique est assurée par une couche saine et dense en surface. Cependant les allongements à la rupture sont faibles et le centre de la pièce est habituellement poreux.

Dans le cycle montré à la figure 9, le piston se déplace à une vitesse (ligne verte) qui croît rapidement jusqu'à un maximum de 2,12 m/s dans les derniers millimètres de sa course, puis décroît. La pression dans le métal (ligne blanche) s'élève à ce moment jusqu'à 260 bar. La position du piston en fin d'injection pendant la phase d'intensification est montrée par la courbe en jaune à droite.



Figure 9. Cycle du moulage sous pression enregistré par un système d'acquisition de données

4. Moulage sous pression sous vide

L'application d'un vide entre 25 kPa et 7 kPa pendant le cycle de moulage permet d'évacuer l'air dans l'empreinte. C'est une solution apportée au procédé pour réduire la présence de porosité et obtenir une pièce dense. Le sous vide de concert avec l'usage d'alliages à bas fer traitables thermiquement qui vont conserver un bon allongement à la rupture est nécessaire pour les applications structurales. Le vide est obtenu par une pompe à vide et un réservoir de vide (figure 10). Le vide est fait dans l'empreinte au début du cycle d'injection et se poursuit jusqu'au moment du remplissage final. Le démarrage du vide est fait par l'automate principal de la presse au moyen d'une valve installée sur le moule ou plus simplement d'un tirage d'air massif et une vanne d'ouverture. Aussi, le moule doit être muni d'un système de valve mécanique ou de bloc de refroidissement à chicane (tirage d'air massif) permettant d'éviter l'introduction du métal liquide dans le système de tirage d'air. Le choix de la valve mécanique ou du système de bloc de refroidissement dépend de la grosseur de la presse. Les valves utilisent moins de surface projetée, mais sont plus coûteuses et plus difficile d'entretien. Le niveau de vide obtenu dans la cavité de moulage est aussi affectée par le choix du système de blocage du conduit de tirage d'air, les valves ayant une réponse plus rapide, elles permettent d'atteindre un niveau de vide adéquat plus rapidement.



Figure 10. Tirage d'air massif monté sur un moule et pompe à vide avec réservoir pour le moulage sous pression sous vide

Il y a un fort développement technologique en ce moment pour le moulage sous vide de pièces structurales automobiles (figure 11). On utilise les techniques suivantes :

- Usage d'alliages à bas fer avec du magnésium pour effectuer les traitements thermiques et du strontium pour modifier la structure
- Remplissage sans turbulence du conteneur au moyen d'un dalot ou par basculage du four avec filtration du métal liquide en ligne.
- Usage du moulage sous pression sous-vide
- Pilotage du procédé et de la thermorégulation du moule.
- Développement des traitements thermiques.



Figure 11. Potentiel de pièces structurales moulées sous pression sous vide (Mercedes SL)
Source: Daimler AG, Dr. Lutz Storsberg, Mercedes-Benz Cars, Structural Symposium Bühler AG, Hamilton, Canada, October 1, 2013

5. Alliages pour le moulage sous pression

L'alliage le plus répandu pour le procédé sous pression traditionnel est le 380 qui est produit à partir de recyclage de l'aluminium ou une variation, le 383, plus fluide pour le moulage de détails fins. Un autre alliage répandu est le 360 utilisé pour les applications à haute résistance de pièces compliquées et sujettes à la corrosion. Ces alliages sont aussi disponibles à basse teneur en fer (A380 et A360) pour obtenir un meilleur allongement à la rupture, mais leur utilisation abaisse la durée de vie des outillages dû à l'attaque du moule par l'aluminium liquide.

Les autres alliages communs sont :

- le 413 utilisé pour une plus grande résistance à l'usure et pour les pièces d'étanchéité
- le 443 pour obtenir un bonne ductilité
- le 390 pour les blocs moteur
- le 518 pour les pièces maritimes

Le tableau 1 donne les propriétés mécaniques pour ces alliages.

Tableau 1 - Alliages principaux pour le moulage sous pression traditionnel

Alliages et état	Propriétés mécaniques typiques * selon ASTM B85 pour les barreaux à part			Commentaires et utilisations
	Résistance mécanique MPa	Limite élastique MPa	A %	
360.0 F	305	170	2,5	Alliage I pour des pièces complexes et sujettes à la corrosion.
A360 F	315	165	3,5	
380.0 F	315	160	2,5	Alliage d'usage général. Variante à bas fer pour plus d'allongement
A380 F	325	160	3,5	
383	310*	150	3,5*	Variante plus fluide du 380 pour détails fins
390	280	240	<1	Alliage à haut silicium pour blocs moteurs
413	295	145	<1	Pièces pour résistance à l'usure et pièces d'étanchéité.
A413 *	290	130	2,5	
C443 F	230	95	8	Alliage avec bonne ductilité pour pièces de sécurité
518.0 F	310	190	4	Pour la résistance à la corrosion marine
				* En moulage sous pression, on ne peut pas couler des barreaux de traction en même temps que la production. Par conséquent, on ne peut demander de certifier la production ainsi.

Ces alliages sont aussi utilisés pour le moulage sous vide lorsqu'on désire limiter la porosité dans les pièces.

Le procédé de moulage sous pression sous vide permet l'usage d'une nouvelle gamme d'alliages pour application structurales. Ces alliages (tableau 2) contiennent du silicium de 7 à 12 %, une teneur en fer en général inférieures à 0,25 %, et du magnésium pour obtenir une bonne fluidité et une aptitude aux traitement thermique. Ils contiennent aussi du manganèse et du strontium pour limiter le collage dans le moule. Ces alliages permettent d'obtenir une limite élastique allant de 100 à 230 MPa avec des allongements de 4 à 20 % aux états F et traités thermiquement T5 T6 et T7.

Tableau 2 - Alliage sous pression pour applications structurales

Alliages	Composition chimique %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Autres
Silafont 36	9.5-11,5	0,15	0,03	0,8	0,1-0,5	0,07	0,15	Sr
Castasil 37	8,5-10,5	0,15	0,05	0,35-0,6	0,06	0,07	0,15	Sr, Mo 0,1-0,3, Zr 0,1-0,3
Aural 2	9.5-11,5	0,15-0,22	0,03	0,45-0,55	0,27-0,33	0,03	0,08	Sr 0,01-0,016
Aural 3	9.5-11,5	0,15-0,22	0,03	0,45-0,55	0,4-0,6	0,03	0,08	Sr 0,01-0,016
Mercalloy 367	8.5-9,5	0,25	0,25	0,25-0,35	0,3-0,5	0,10	0,20	Sr 0,05-0,07
Mercalloy 368	8.5-9,5	0,25	0,25	0,25-0,35	0,1-0,3	0,10	0,20	Sr 0,05-0,07
Mercalloy 362	10,5-11,5	0,25	0,20	0,25-0,35	0,5-0,7	0,10	0,20	Sr 0,05-0,07 Ni 0,10
Magsimal 59	1,8-2,6	0,2	0,03	0,5-0,8	5-6,0	0,07	0,20	Be

6. Fonderies québécoises offrant le procédé de moulage sous pression

Entreprise	Site Internet	Localisation
Canimex Division Torque Force	www.groupecanimex.com	Drummondville
Fonderie Lemoltech Inc.	www.lemoltech.com	Princeville
Moulages sous pression AMT Inc.	www.amtdiecasting.com	Saint-Cyprien
Métallurgie Syca Inc.	www.syca-inc.com	Saint-Dominique

7. Moulage sous pression semi-solide

Ces procédés sont utilisés industriellement depuis la fin des années 1990. Le but est de mouler un alliage en phases pâteuse (50 % solide) dans une moule. Cela permet d'obtenir :

- La réduction de la porosité
- De meilleures tolérances dimensionnelles
- Une usure de moule plus faible
- Une cadence de production très élevée
- De meilleures propriétés mécaniques

Mis à part la présence d'une faible porosité dans les pièces moulées, les propriétés mécaniques surtout l'allongement) sont améliorées par une globularisation de la structure métallurgique pendant par le procédé de fabrication de la pâte (figure 12). La structure globulaire pâteuse permet la rhéofluidisation de l'écoulement lors de la coulée c'est-à-dire un écoulement de plus en plus facile si on en augmente la vitesse. La turbulence et la séparation de l'écoulement sont éliminées dans ce type d'écoulement et de plus l'air dans l'empreinte est évacué en avant du front de l'écoulement. Il en résulte la production de pièces saines.

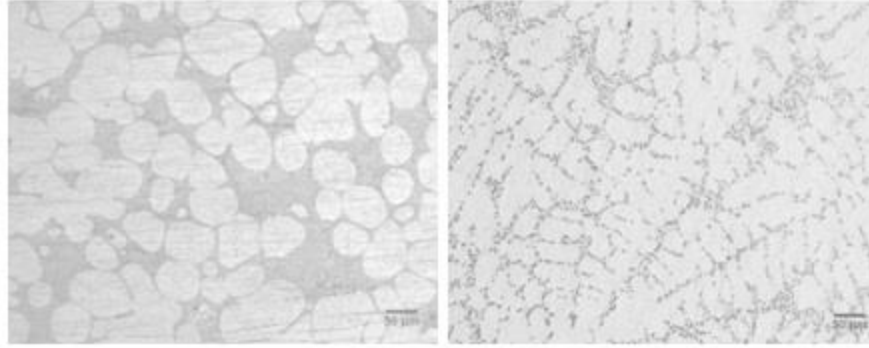


Figure 12. Globularisation obtenue dans un alliage A356 par le procédé SEED par rapport à une structure dendritique normale de coulée (à droite)

Plusieurs procédés ont été développés qui sont en concurrence avec la fonderie sous pression sous vide avec les alliages de nouvelles génération ou le moulage en moule basse pression permanent.

La nouvelle génération de procédés fabrique plutôt la pâte à proximité qui est ensuite alimentée dans la presse sous pression. On utilise le procédé de moulage sous pression sous-vide pour le moulage. Les procédés de préparation de la pâte pour le moulage semi solide disponibles sont :

- New rheo-casting UBE
- Slurry on demand HanJoo SoD
- Semi-solid rheocasting Bhuler
- Sub liquidus casting de THT presses (procédé de moulage vertical)
- Swirled enthalpy equilibration device SEED STAS
- Continuous rheoconversion process CRP MPI/WPI

Ces procédés combinent diverses méthodes de brassage de l'aluminium en phase de solidification et de chargement de la pâte dans le conteneur de la presse sous pression.

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 B85/B85M-14 Standard Specification for Aluminum-Alloy Die Castings, ASTM International bar Harbour, PA 2014
- Harlieb M. High Integrity Diecasting for Structural Applications A holistic approach to improved die casting quality, iMdc meeting, WPI, Worcester, MA December 12, 2013
- <http://rheinfeld-alloys.eu/en/alloys/castasil/>
- Daimler AG, Dr. Lutz Storsberg, Mercedes-Benz Cars, Structural Symposium Bühler AG, Hamilton, Canada, October 1, 2013