Document de support à la présentation :

**Procédés de moulage des alliages d’aluminium**

Contenu développé par :

Guy Morin, Ing.

# Introduction

Ce document sert de complément d’information à la présentation : « Procédés de moulage des alliages d’aluminium » d’Alu-Compétences. Les informations vous seront fournies pour chaque diapositive de la présentation, incluant un rappel de référence au besoin.

Le moulage est la méthode de production par excellence de pièces complexes de série. Il permet d’alléger des pièces par enlèvement direct de matière et d’ajouter des détails fonctionnels éliminant l’assemblage de pièces séparées. L’aluminium, par son point de fusion inférieur à l’acier, se prête bien au moulage en moule métallique réutilisable qui, grâce au refroidissement rapide, permet une structure métallurgique fine avec des propriétés mécaniques supérieures aptes aux utilisations structurelles dans les véhicules.

Ce module de formation est fourni dans le cadre du projet Alu-Compétences d’AluQuébec, la grappe industrielle de l’aluminium du Québec, et ses partenaires. Le projet Alu-Compétences vise à produire et à diffuser des contenus techniques et scientifiques pour l’enseignement de l’aluminium aux niveaux collégial et universitaire, notamment pour les programmes de design industriel, d’architecture et de métallurgie ainsi que pour les facultés de génie civil, mécanique et aérospatial. Alu-Compétences souhaite enrichir la formation des futurs professionnels sur les notions entourant l’aluminium. Il vise également à encourager les institutions d’enseignement à utiliser leur capacité d’adaptation des programmes de formation pour mieux répondre aux besoins des entreprises de l’industrie de l’aluminium en assurant un bassin de main-d’œuvre qualifiée.

Ce module de formation et la présentation qui lui est associée ont été préparés pour Alu Compétences par le Centre de Métallurgie du Québec. Depuis 1986, l’équipe du CMQ supporte par ses travaux les initiatives de R&D des entreprises québécoises et anime le secteur de la métallurgie par des formations sur mesure ou la tenue d’évènements avec divers partenaires.

Les partenaires du projet Alu-Compétences vous souhaitent bonne lecture.

# **PREMIÈRE PARTIE**

# Diapositive 6

Le moulage dans des moules en sable et d’argile est le plus ancien des procédés de fonderie. Cependant, le bas point de fusion de l’aluminium permet aussi d’utiliser des moules métalliques. L’avantage principal du moulage est de produire directement à plus faibles coûts une pièce près de la forme finale, ce qui élimine des opérations d’usinage et de matière superflue. Les pièces en aluminium étant destinées au marché de la légèreté, le moulage permet facilement d’enlever de la matière aux endroits les moins sollicités. De plus, on peut combiner un assemblage de pièces ou de fonction en une seule pièce. La pièce montrée ici en moulage au plâtre utilise un noyau interne (diapositive 17) pour mouler la partie évidée latérale indiquée sur la photo de gauche qui ne se démoule pas lors de l’extraction de la plaque modèle qui s’effectue à 90 degrés dans l’axe montré à droite.

# Diapositive 7

Le procédé de moulage peut engendrer des défauts de fonderie le plus souvent de la porosité ou des fissures. Ici, on aperçoit de la porosité de gaz, de l’air entraîné dans la cavité du moule par grande vitesse d’injection du métal fondu dans le procédé de moulage sous pression en moule métallique (diapositive 39). Le fondeur a dû ralentir la vitesse d’injection pour éliminer le défaut au détriment de la vie du moule (réduite de 20 000 à 10 000 injections), car l’acier du moule est soluble dans l’aluminium fondu, donc attaqué.

Au départ d’un nouveau moule, la fonderie doit apprendre son comportement et parfois procéder à des modifications de moule ou ajuster les paramètres de production, par exemple : la température du métal fondu. Une fois la production bien rodée, il n’est pas exclu qu’un défaut survienne étant donné que les pièces sont produites à l’unité (ou en grappe de quelques pièces) par un opérateur. Le métal ne provient pas d’un usinage d’une barre saine produite par un moulin (procédé d’extrusion ou autre) en conditions contrôlées.

Cependant, la fonderie permet de produire une multitude de pièces fonctionnelles à bon prix. Chaque marché prévoit des critères de qualité et adapte ses demandes selon la sévérité et le risque d’un bris en service par l’utilisation des facteurs de sécurité sur les calculs de charge (ex. : 70 % de chargement maximum au lieu de 100 %) ou un plan d’inspection par des essais non destructifs comme la radiographie. Ce plan peut s’appliquer aux premières productions ou encore pour toutes les productions (sur toutes les pièces ou sur un échantillon de la série produite).

# Diapositive 8

Le principal défi du moulage est de contrôler le retrait du métal fondu. Nous avons successivement le retrait de la dilatation thermique du liquide jusqu’à son point de fusion. Ensuite, l’arrangement atomique du solide étant plus compact que celui du liquide, il y aura du retrait lors de la solidification qui ne se produit pas simultanément dans toutes les parties du moule. Finalement, il y a le retrait de dilatation thermique du solide.

Le retrait dans les parties semi-solidifiées du moule peut être la cause de fissuration à chaud, tandis que le retrait du solide en fin de solidification, peut engendrer des tapures à froid (plus rares dans les moulages d’aluminium).

Pendant la solidification, le moule peut s’opposer au retrait solide ce qui peut causer de la fissuration à chaud, particulièrement dans les moules métalliques. Les moules au sable sont moins propices à la fissuration à chaud, car le sable peut s’écraser sous les contraintes exercées par le retrait des parties déjà solidifiées. (Diapositive 13) Pour le moulage en moules métalliques, il faut adapter les rayons de courbures et angle de dépouille (démoulage) des pièces et amincir les sections.

Le retrait de l’aluminium de liquide à solide est de 11 %, mais le modèle servant à produire la cavité du moule n’est que de 1,1 % plus grand que la pièce finale. Le mouleur utilise des réservoirs de métal liquide appelés masselottes pour alimenter la moule après la coulée. Cela permet de couler dans le moule d’à côté et de poursuivre la coulée. Le retrait se termine toujours dans les parties épaisses de la pièce moulée donc on y met la masselotte à proximité afin que le retrait sorte du moulage vers la masselotte. Celle-ci qui sera coupée après le démoulage avec la retassure interne.

Le retrait représente le principal défi de production en fonderie : il affecte les dimensions finales, amène la porosité de retrait et la fissuration. Le fondeur doit produire un modèle qui permettra de mouler sans défauts.

# Diapositive 9

En fonderie, nous utilisons le principe de la solidification dirigée afin de produire des pièces saines exemptes de retassures.

Le métal liquide jusqu’à la température ambiante se contracte de 3 façons (diapositive 7) :

* Contraction du liquide;
* Contraction à la solidification, l’aluminium étant plus dense à l’état solide;
* Contraction thermique du solide après la solidification jusqu’à température ambiante.

Étant donné que le moule est rempli en métal liquide à la fin de la coulée, on utilise des espaces ajoutés au moulage appelés masselottes qui servent de réservoir d’alimentation en métal liquide jusqu’à la fin de la solidification.

S’il y a un manque d’alimentation dans un moulage (habituellement dans une partie massive mal alimentée) qui reste chaud, il se forme une retassure un vide, ou du retrait dispersé à cet endroit. En moulage au sable, et en moule permanent, on tente de terminer la solidification du moulage dans la masselotte ou les canaux d’alimentation, afin de concentrer les défauts de retrait à cet endroit en dirigeant la solidification vers les masselottes. C’est le principe de la solidification dirigée.

Il est possible de modéliser la solidification d’une pièce dans la phase de conception des outillages de fonderie (la photo de droite montre la température d’un moulage en moule permanent à un moment x après la coulée).

Certains procédés de fonderie sont moins aptes au masselottage, c’est le cas du moulage en cire perdue (diapositive 23) où l’on tente de terminer la solidification dans les canaux d’alimentation ou en moulage sous pression (diapositive 38) où des sections uniformes sont utilisées pour diriger la solidification vers le centre de la section de la pièce. On utilise des sections minces dans ce dernier cas en partie pour minimiser le retrait.

# Diapositive 10

On peut aussi diriger la solidification par l’utilisation de refroidisseurs placés dans le moule qui vont toucher au métal liquide et accélérer localement la solidification. Un surplus de matière est ajouté au modèle pour former un espace dans la cavité du moule où le mouleur pourra y placer les refroidisseurs. Ceux-ci sont enduits d’un poteyage pour empêcher le collage avec le métal fondu. Cet artifice est souvent utilisé pour les brides qui doivent être usinées pour l’installation d’un joint d’étanchéité. Malgré l’utilisation de masselotte, les alliages d’aluminium de fonderie ont tendance à former de la microporosité de solidification (diapositive 12). Les refroidisseurs poussent cette microporosité à une distance suffisante pour usiner la face et assurer une étanchéité locale.

# Diapositive 11

Les procédés de moulage de l’aluminium en moules métalliques utilisent plutôt des canaux de refroidissement percés dans la paroi du moule pour obtenir la solidification dirigée. On y circule de l’air comprimé ou un mélange air/eau (en moule permanent) ou encore de l’huile chaude (en moulage sous pression).

Le canal de refroidissement peut aussi servir à générer une structure métallurgique plus fine donnant de plus grandes propriétés mécaniques locales. Les procédés de moulage en moules métalliques tendent à minimiser l’usage des masselottes surtout en moulage sous pression (diapositive 38).

# Diapositive 12

Le second défi du mouleur est de contrôler la turbulence au remplissage. L’aluminium fondu s’oxyde facilement ce qui engendre des films d’oxydes de l’écume qui trappent les bulles d’air ou qui affaiblissent la pièce (la photo de gauche montre de l’écume, en surface du bain, formée pendant le dégazage [diapositive 12]).

On doit alimenter le moule le plus lentement possible sans geler prématurément dans le moule.

La vitesse au bas du moule est conditionnelle à la hauteur de chute donc on doit limiter au maximum la hauteur des moules. On alimente le moule par un système de canaux appelé système d’alimentation qui est régi par les lois d’écoulement de la matière. Celui-ci est calculé pour obtenir la vitesse correcte à l’entrée du moule (appelé attaque ou attaques s’il y a de multiples entrées). On peut aussi ajouter des espaces au modèle pour le placement de filtres céramiques ou autres dans la cavité du moule. En moulage au sable, on incline parfois le moule vers le haut pour réduire la vague de métal dans le moule.

Une descente de coulée conique permet d’éviter d’entraîner de l’air dans la cavité du moule. Des canaux profilés permettent de minimiser la turbulence et l’entraînement du sable comme montré dans la photo du centre pour un moulage réalisé par le procédé de sable chimique.

L’air contenu dans la cavité du moule augmente en volume à la suite de l’échauffement par le métal liquide et doit être évacué par des évents situés dans le châssis supérieur du moule. Un manque d’évent crée une pression dans le moule qui s’oppose au remplissage ce qui pourrait amener à un gel prématuré ou des défauts de fonderie en surface : coins arrondis, reprises (*cold shuts*) ou manques.

# Diapositive 13

Les alliages de fonderie d’aluminium forment de la microporosité de retrait ce qui abaisse les propriétés mécaniques surtout pour les procédés avec un refroidissement lent comme le moulage au sable. De multiples publications scientifiques traitent de ce sujet. La formation de micro-retassures est due aux phénomènes suivants qui agissent ensemble :

* Formation de cristaux solides dendritiques (en arbre de Noël) et non, un front plat à l’interface solide/liquide qui finit par bloquer le passage de l’aluminium liquide laissant un retrait (vide) local.;
* Accumulation d’hydrogène dissout dans le bain d’aluminium liquide provenant de charges huileuses, de l’humidité ambiante de l’air ou des matériaux du moule. L’hydrogène dissout est sous forme monoatomique et se recombine en H2 pendant la solidification dans les microcavités de retrait et s’oppose à la formation de ces cristaux.

Avant la coulée, on dégaze le bain avec un rotor qui injecte de l’argon. Le rotor a un impulseur placé au bout en fond de creuset pour briser le flux d’argon en fines bulles. L’hydrogène dissout est attiré par ces bulles de faible pression présente dans la masse d’aluminium liquide. Les bulles d’argon remontent en surface avec l’hydrogène captif.

Le test de mesure d’hydrogène montré au centre, utilise un échantillon de métal liquide prélevé en surface du bain après le dégazage. Le métal est solidifié sous une pression réduite de 0,9 atm pour amplifier la porosité. On coupe le lingotin solidifié et on le compare à une charte afin de déterminer la quantité d’hydrogène présente. On recherche une teneur en hydrogène en bas de 1 ml/100 g.

# Diapositive 14

La solidification débute aux parois du moule et se termine au centre des sections du moulage. Des cristaux en forme de dendrite avec des cristaux libres et du liquide se retrouvent au centre vers la fin de la solidification. Si les parois déjà solidifiées restreignent la contraction de solidification, des fissures peuvent se former (surtout en moule métallique). La présence de silicium dans les alliages de fonderie (7 % dans le A356) abaisse le point de fusion et favorise la soudure interne. On retrouve aussi cet élément d’alliage dans les électrodes et fil de soudage pour permettre au cordon de soudure de se refermer sans fissuration. Ici le moulage en AZ91D, un alliage de magnésium, non moulable en moule permanent montre une énorme fissure à chaud à côté d’une partie restreinte par le moule métallique. Les rayons de courbure, angles de dépouille, noyaux compressibles en sable sont utilisés en moule permanent pour minimiser le phénomène.

# Diapositive 15

Au début d’une démarche d’approvisionnent par fonderie, le concepteur doit déterminer le niveau de risque de la pièce et définir des niveaux de qualité (c.-à-d., nivaux de sévérité des défauts acceptables) et un plan qualité qui inclut des inspections non destructives et des essais mécaniques. Il y a un coût associé à ces contrôles qui sont parfois effectués en sous-traitance par la fonderie chez des laboratoires agréés. L’utilisation de normes comme ASTM permet d’éviter l’écriture d’un cahier de charge détaillé puisque les normes dictent déjà les résultats attendus pour divers niveaux de sévérité. Le plan qualité est parfois simplement indiqué sur le dessin.

Les essais non destructifs, ou contrôles NDT, de ressuage (liquide pénétrant) et radiographie sont montrés ici. Au niveau des essais mécaniques, un essai de traction ou des mesures de dureté sont demandés pour les moulages utilisés dans des applications critiques. Les mesures dimensionnelles des dimensions critiques sont aussi demandées ou effectuées de base par la fonderie qui connait son moulage et sait où il varie.

Les contrôles ci-dessus peuvent être limités au premier jet d’échantillons (first articles), aux premières productions ou à chaque production. Ils peuvent aussi être effectués sur le lot complet ou un échantillonnage.

# Diapositive 17

Pour ce procédé, le matériel de moulage est constitué d’un mélange de sable, d’argile (bentonite) et d’eau. La recette du mélange dépend de chaque fonderie en fonction du type de sable et de bentonite, de pièces produites et des équipements disponibles. Pour l’aluminium, le mélange de bases est le suivant :

* Sable de silice de granulométrie 50-110 AFS avec distribution sur trois à quatre tamis d’essais;
* Bentonite 5 à 12 % ; on préfère la bentonite calcique (US southern bentonite) pour le moulage de l’aluminium, car elle imprime bien dans le sable, les détails plus fins utilisés dans les moulages d’aluminium permis par le point de fusion plus bas;
* Eau 2 à 5 %.

Le mélange de sable est préparé en continu par une série d’équipements : tamis et mélangeur de sable et convoyé aux postes ou à une machine de moulage. La fonderie effectue des tests sur le sable (contenu en argile, humidité, perméabilité) afin de garantir la stabilité de la recette. Un système de refroidissement du sable est parfois nécessaire après le démoulage pour amener le sable à la température la plus proche de l’ambiante afin de recommencer le cycle.

En moulage en sable à vert, on utilise en surtout des boîtes à mouler et des plaques modèles comme montré ici. Les plaques modèles et les outillages pour la fabrication des noyaux sont payés par le client et leur appartiennent. Les matériaux servant à fabriquer les plaques modèles sont diverses essences de bois, le plastique, l’aluminium ou l’acier inoxydable ou une combinaison de ces matériaux. Le nombre de pièces à fabriquer déterminera la résistance de matériel de l’outillage et aussi le passage au moulage mécanisé. Certains procédés de fabrication mécanisés sur machine à mouler utilisent exclusivement des outillages métalliques.

La plaque modèle ou le fond des deux boîtes à mouler contiennent en positif de la pièce à mouler plus :

* La prévision de retrait de 1,1 %;
* Les angles de dépouilles;
* Les masselottes;
* Les espaces pour les refroidisseurs;
* Le système de coulée;
* Les espaces pour le placement des filtres dans le système de coulée.

Les étapes pour un moulage à la main sont :

* Empilement du cadre du châssis inférieur vide, de la plaque modèle imprimée des 2 côtés et du cadre du châssis supérieur vide.
* Fabrication du châssis supérieur du moule en utilisant une descente conique séparée de la plaque modèle pour extraction, ajout de sable et compactage du sable au fur et à mesure du remplissage. Parfois, des masselottes isolantes sont placées sur la plaque modèle avant l’ajout de sable. Une masselotte en fibres isolantes demande moins de métal liquide qu’un espace imprimé dans le sable.
* Lissage du dessus et enlèvement de la descente laissant un trou de coulée.
* Reversement des 3 parties.
* Remplissage de sable du châssis inférieur qui est en position inverse, compactage et lissage du sable au niveau.
* Nouveau reversement des 3 parties et séparation du châssis supérieur et de la plaque modèle, laissant la cavité du moule du châssis inférieur visible.
* Inspection de la cavité, nettoyage de sable tombé, ajouts des noyaux, des filtres, des refroidisseurs et des masselottes isolantes (si, non ajoutée dans le châssis supérieur ou imprimée par la plaque modèle).
* Séparation de la plaque modèle du châssis supérieur, habituellement ces 2 parties sont placées sur le côté plaque vers le mouleur, inspection de la cavité, perçage des évents avec une mèche à travers du sable et nettoyage du sable en excès.
* Fermeture du moule ou remoulage. Les cadres en métal ou en bois peuvent être retirés et le moule envoyé au poste de coulée.

Les machines à mouler automatique dites horizontales font ces opérations par deux méthodes de base :

* Déplacement sur 2 positions, gauche/droite avec retournement;
* Utilisation de 2 presses, une pour le dessus et une pour le bas avec une station pour tourner le châssis du dessus avant le remoulage.

Le sable est alimenté par le haut des machines et dans les deux cas, un arrêt est prévu pour l’inspection des cavités et le placement des filtres ou masselottes et le perçage des évents si non mécanisé.

# Diapositive 18

Pour mouler les cavités intérieures et les parties latérales qui ne peuvent être moulées par un moule se déplaçant dans une seule direction, on utilise des noyaux qui sont fabriqués dans des outillages séparés. Ceux-ci sont placés dans le moule lors de sa fermeture. Le modèle qui forme la cavité du moule doit être adapté par l’ajout de portées ou des évidements additionnels afin de permettre le positionnement de ces noyaux. Une fois les noyaux en place et le moule fermé, la cavité du moule correspondra à la pièce désirée. La diapositive montre surtout des noyaux internes.

L’ajout de noyau occasionne des coûts supplémentaires en outillage et en temps de fabrication, qui peuvent être en partie récupérés par une économie d’usinage.

Les noyaux au sable peuvent être fabriqués par les moyens suivants :

* Hot box ou shell core : sable enrobé de résine thermodurcissante qui fond et polymérise (durcit) à haute température. Le moule monté sur une roue est chauffé par des brûleurs au gaz ou électriquement puis le moule à noyau en acier fermé est tourné pour un remplissage du sable enrobé. Une fois durci, le moule est renversé pour récupérer l’excédent de sable résineux et ouvert pour récupérer le noyau durci. En mode inverse, on peut fabriquer 2 coquilles, qui peuvent servir de moule de fonderie (procédé shell).
* Cold box : on utilise une résine qui se polymérise (durcissement) sous le passage d’un gaz. Le mélange sable résine est contenu dans la boîte, moule, à noyaux. Un gaz amine est injecté dans le sable dans le moule. Le nom est en opposition à hot box. Une variante plus ancienne de ce procédé est l’usage du silicate de soude durci par du CO2, qui donne des noyaux efficaces en fonderie artisanale, mais très dur à débourrer.
* No bake : on utilise les mêmes résines pour les noyaux que pour le moule (diapositive 18), cependant, les noyaux sont moins solides et dégagent plus de gaz qui forme de la porosité dans le métal coulé.

Ces procédés ont remplacé l’usage des noyaux au sable durcis avec des huiles qui demandaient de longs jours de cuisson afin de ne pas gazer le métal dans le moule et former de la porosité. La rapidité de fabrication des noyaux facilite la meilleure gestion de la production.

# Diapositive 19

Pour ce procédé, le sable de silice est mélangé à un polymère durcissant par prise à froid, le sable est mélangé directement dans une vis sans fin à une résine et un catalyseur durcissant (photo de droite). La résine est réticulée par le durcisseur et sert de liant aux grains de sable avec un temps de prise suffisant pour permettre le placement du sable résiné sur le modèle. Le procédé permet d’obtenir un meilleur fini de surface et des tolérances dimensionnelles plus serrées que pour le moulage en sable à vert et qui s’approche de celles offertes par le procédé à moule permanent. Il est possible de fabriquer de grosses pièces de forme complexes en combinaison avec des noyaux. Le procédé demande un surcoût par rapport au moulage en sable à vert dû au coût de résine et de recyclage du sable. Le sable à prise chimique peut-être facilement recyclé par attrition (usure du polymère) ou par combustion du liant. Le procédé est toujours en évolution pour limiter les émissions atmosphériques dont les seuils sont en constante diminution.

Plusieurs procédés (résines) existent pour l’aluminium :

* Résines furaniques largement utilisées pour mouler l’aluminium;
* Résines phénoliques;
* Polyuréthannes;
* En développement, on note les résines à faible contenu en composés organiques volatils ou inorganiques (silicate de soude).

La ligne de préparation des moules est plus simple que celle du moulage en sable à vert. Elle est composée d’un mélangeur à vis (sable et résine) qui alimente un poste de moulage manuel ou une machine à mouler, une station de compression et de retournement du moule. On trouve aussi un poste de travail muni d’une pince pour retourner le châssis supérieur et refermer le moule une fois l’inspection faite ; suivent l’installation d’un filtre à métal, des noyaux et l’application d’un enduit. Après la coulée et le démoulage, le sable est régénéré mécaniquement ou thermiquement pour être réutilisé en y ajoutant un peu de sable neuf. La fonderie effectue aussi des tests sur les sables comme la demande acide ou le pH qui affectent la prise par le catalyseur.

En moule à prise chimique on utilise plutôt des boîtes à mouler intégrales de type caisson avec modèle au fond de la boîte (photo du centre). Ces boîtes sont placées directement sous le mélangeur ou montées sur une machine à mouler. On produit ainsi des moules sans boîte à mouler en place pour passer à l’étape de la coulée (photo de gauche).

Sur cette photo, on voit le dessus des 2 pièces et un méplat avec rebord pour y placer une masselotte isolante. Chaque pièce est attaquée à deux endroits. Le canal de coulée est imprimé dans le châssis inférieur et non montré ici.

La conception du moulage est sensiblement la même que pour le moule en sable à vert, c.-à-d. l’utilisation des principes de solidification dirigée et du système d’alimentation. La descente conique est amovible pour pouvoir être retirée après le remplissage du sable. On voit aussi à deux coins dans le fond, des bossages pour former des cavités pour l’alignement des pains de sable lors du remoulage. Le châssis inférieur imprimant un bossage.

# Diapositive 20

La plus grande résistance du moule à prise chimique permet de couler de très grosses pièces. Sa plus forte rigidité permet une nette amélioration des tolérances (par exemple : plus ou moins 1,3 mm sur 300 mm au lieu de 1,6 pour les moules en sable à vert). On parle souvent de moulage au sable de précision. Le fini de surface est assuré par l’usage d’une granulométrie de sable fin et l’utilisation d’enduit. On conserve la liberté totale de la conception en 3 dimensions avec ou sans cavités grâce aux noyaux. L’usage de noyaux rend le moulage plus cher dû aux outillages et manipulations supplémentaires, mais peut éliminer certaines opérations d’évidement de matière par usinage ou encore permettre un allègement du moulage.

Le procédé de moulage génère moins d’inclusions dans la pièce que le procédé en sable à vert, car le sable est mieux attaché aux parois. En conséquence, l’allongement à la rupture en traction des pièces est augmenté. On peut envisager l’utilisation d’un alliage A356.1 ou A356.2 à plus faible teneur en fer qui donne de meilleurs allongements à la rupture. Le fer forme des cristaux de forme pointue qui déchirent l’aluminium sous la contrainte ce qui réduit la ductilité.

Les alliages aéronautiques les plus résistants, comme ceux de la série 200 ou le 535, un alliage maritime, peuvent être moulés, car le sable du moule se compresse lors de la solidification réduisant le risque de fissuration à chaud.

Le marché du moulage à prise chimique est concentré sur les grosses pièces, les pièces commerciales structurales et les pièces aéronautiques de faibles et moyennes séries pour lesquelles la précision dimensionnelle est requise : boîtiers, pièces de moteur d’avion, attaches avec détails fonctionnels externes.

La fonderie qui offre les deux procédés de moulage va soumissionner en fonction du dessin 3D et devis présenté :

* Tolérances et fini de surface;
* Capacité de production vs. taille de ses outillages disponibles (surtout en moulage automatisé).

# Diapositive 21

En résumé, le procédé de moulage à prise chimique offre les caractéristiques suivantes :

* Possibilité de couler de très grosses pièces, bien que typiquement, nous ayons des dimensions similaires à celle du moulage à vert dû aux prix des résines;
* Bonnes tolérances dimensionnelles pour le moulage de détails fonctionnels sans besoin d’usinage, bon fini de surface, plan de joint visible;
* Moulage de sections plus minces possible, car le moule est plus sec qu’à vert;
* Usinage requis après le moulage, mais certains détails fonctionnels comme des hauteurs ou longueurs hors tout et des détails fonctionnels peuvent être moulés sans usinage;
* Optimisé pour les faibles à moyennes séries;
* Propriétés mécaniques améliorées, car il y a moins de sable entraîné dans les pièces;
* Pièces simples à complexes avec un fort degré de liberté de conception et au niveau des alliages.

# Diapositive 22

Il est maintenant possible d’imprimer un moule à prise chimique ou des noyaux par impression 3D sur lit de sable. Le moule, c.-à-d. que la forme surdimensionnée de la pièce incluant le système de coulée et de masselottage est imprimée directement par couches successives à partir d’un modèle 3D. Le procédé utilise une résine durcissant à chaud en étuve dans une opération séparée après l’impression.

Le procédé est utilisé commercialement par des fonderies pour la production de noyaux complexes pour la coulée de séries. La liberté de conception des noyaux est améliorée puisqu’ils sont faits sans outillage à retirer ou possiblement intégré au moule. En ce qui concerne la fabrication de moule, on en est plutôt au stade du prototypage de pièces avant production d’outillage de fonderie.

# Diapositive 24

Les modèles sont injectés en cire dans des matrices en aluminium. Ces matrices sont corrigées après la première production afin d’obtenir les dimensions désirées. Par la suite, les dimensions resteront identiques et la vie du moule est quasi illimitée. Les moules sont usinés par électro usinage, ce qui permet un excellent fini de surface. Les moules les plus simples sont constitués de deux parties (photo du haut centre). Afin de mouler des détails plus complexes, on peut utiliser des noyaux métalliques insérés dans le moule ou des parties démontables (photo haut droite). Cela permet d’obtenir des angles de dépouille de zéro degré. Les moules peuvent aussi être mécanisés pour extraction de noyaux. Le moule d’injection appartient au client.

Les moules d’injection sont montés sur une presse avec un cylindre d’injection qui s’alimente directement dans un réservoir de cire liquide (photo du haut gauche). La presse permet l’ouverture et la fermeture du moule permettant l’extraction du modèle de cire et les moules peuvent être refroidis à l’eau. Des moules ayant de multiples cavités sont utilisés si le nombre de pièces à produire est élevé. Les cires d’injection contiennent des polymères pour diminuer la tendance au retrait de la cire dans les moules d’injection qui causerait des dépressions de surface dans les sections épaisses des modèles de cire.

Les modèles sont montés en grappe en vue de l’enrobage par une opération manuelle (photos centrales). Le montage tient compte des points suivants :

* Alimentation avec turbulence limitée (diapositive 11);
* Solidification dirigée vers les canaux et la descente de coulée qui sert de masselotte (diapositive 8);
* Évacuation de la cire (en position renversée) et de l’air (en position de coulée);
* Facilité de l’enrobage avec accès aux trous et au lettrage d’identification;
* Facilité de la coupe des pièces sur la grappe coulée à la scie à ruban;
* Prix de revient par grappe.

L’enrobage de la grappe suit le montage. La grappe est immergée dans un coulis (centre gauche) puis est saupoudrée de stucco pour renforcer la couche de coulis (photo du bas à droite). Ces étapes sont répétées plusieurs fois avec séchage entre chaque couche. Les coulis sont composés d’un liant de silice colloïdale renforcé de polymères de type latex et de poudres réfractaires (slice fondue, aluminosilicate). Les coulis sont maintenus en suspension en permanence dans des réservoirs rotatifs. Les stuccos, de granulométries plus grossières, sont faits des mêmes réfractaires que ceux utilisés pour les coulis. Ils sont appliqués avec des sableurs par gravité. L’opération est robotisée : les moules circulent dans l’atelier sur un convoyeur pour le séchage.

Les coulis pour les couches primaires sont plus visqueux que ceux utilisés pour les couches secondaires. Les stuccos utilisés pour couches secondaires sont plus grossiers que ceux des couches primaires afin de bâtir rapidement la carapace (6 à 8 mm d’épaisseur) une fois les détails fins enrobés par la couche primaire.

Il existe divers types de liants pour fabriquer les coulis. Les liants à la silice colloïdale sèchent naturellement après 4 à 8 heures selon la configuration de la pièce en formant des gels de silice qui retiennent la poudre réfractaire du coulis et du stucco. D’autres types de liant forment des gels de silice en présence de gaz ammoniac, ce qui permet la formation de moule carapace de grandes dimensions (1 à 2 mètres) et plus résistantes à vert (non cuit) avant le décirage.

Toutes les opérations de l’injection jusqu’au moment du décirage sont effectuées dans un atelier climatisé à température constante afin de minimiser les variations dimensionnelles de la cire emprisonnée dans l’enrobage.

Après la séquence d’enrobage, les moules sont décirés en position inversée généralement en autoclave à 160 °C (non montré). On utilise aussi le décirage au four, surtout en fonderie d’art d’aluminium. Le décirage doit être effectué avec un fort gradient de température dans le but de faire fondre rapidement la cire à l’interface du moule avant que le centre des modèles ne se dilate et cause la fissuration de la carapace. Le décirage au four est meilleur à cet égard, mais sa productivité est limitée d’où la prépondérance du décirage à l’autoclave. Les moules-carapaces déchirés sont ensuite cuits pour éliminer toute présence de cire ou de cendre résiduelle et aussi pour donner une résistance mécanique au moule-carapace. Le moule est préchauffé à 600 °C avant la coulée de métal liquide.

Après la solidification et le refroidissement du métal, les moules sont cassés sommairement puis la pièce est lavée sous pression. Il importe de ne pas briser les pièces lors de cette opération. Pour cette raison, les épaisseurs des pièces sont limitées à 2 millimètres, bien que ce soit possible de couler une épaisseur plus mince dans un moule préchauffé à 700 °C. Une fois les grappes lavées, on procède au sciage du système d’alimentation et au meulage des attaques de coulée et au jet de sable final. Le fini de surface final est celui du jet de sable final utilisé pour extraire les résidus de céramique soit 125 micropouces RMS.

Les parachèvements habituellement demandés pour les pièces en aluminium sont :

* Traitement thermique pour augmenter les propriétés mécaniques;
* Essais non destructifs par ressuage (liquide pénétrant) ou radiographie (les marchés critiques de la cire perdue demandent ces types d’essais);
* Finition de surface si demandée, anodisation ou peinture;
* Usinage.

En moulage en cire perdue, nous notons un gros effort du personnel de la fonderie et de l’assurance qualité aux mesures dimensionnelles.

# Diapositive 25

Le marché du moulage de précision à la cire perdue se concentre sur les marchés aéronautiques et militaires. On trouve aussi quelques pièces de transport terrestre, sauf pour l’automobile, dû aux quantités, et aussi aux boîtiers de télécommunication avec détails fonctionnels (insertions de cartes électroniques et présence d’ailettes pour dissiper la chaleur). La fonderie d’art, utilise majoritairement ce procédé grâce au rendu des détails qu’il permet.

En résumé, le procédé offre les caractéristiques suivantes :

* Tolérances dimensionnelles exceptionnelles, très bon fini de surface, de 125 RMS dus au sablage final requis pour enlever complètement la céramique d’enrobage. Rendu des détails exceptionnels et absences de plan de joint dû aux moules démontables;
* Usinage minimum requis après le moulage (habituellement seulement les filets et surfaces d’assemblage);
* Pièces simples à complexes avec le plus grand degré de liberté en fonderie et un certain degré de liberté au niveau des alliages. Pièces minces de 2 mm possibles dans certaines parties;
* Pièces plus petites dépassant rarement 800 mm dus à l’utilisation de cire et de réfractaires en théorie incompatibles au niveau de la dilatation thermique. Des liants durcis par le gaz ammoniac entre chaque couche permettent de livrer des moulages jusqu’à 3 mètres de long;
* Optimisé pour les faibles à moyennes séries;
* Prix plus élevé.

# Diapositive 26

L’impression 3D des modèles est possible pour les petites séries ou pour le prototypage. Les premiers procédés d’impression 3D, datant de 1990, produisaient des modèles en cire par déposition ou des modèles en résine par réticulation couche par couche. Ces procédés présentaient certains désavantages comme l’impossibilité de faire des sections en porte à faux pour la cire déposée impliquant un nettoyage excessif des modèles, ou encore des problèmes d’expansion des résines et la fissuration des carapaces au décirage et la génération de gaz. L’usage de modèles en résine alvéolés permet de minimiser leur déformation au décirage, mais oblige une inspection pour boucher tous les défauts de surface du modèle avant l’immersion dans le coulis. De nouveaux procédés utilisent des résines PMMA (Poly Méthyl Méthacrylate) qui se contractent au décirage ce qui permet l’utilisation de modèles pleins sans besoin d’ajouter des évents locaux sur le modèle pour évacuer les gaz (à reboucher après le décirage et à meuler après la coulée et la coupe).

L’impression directe du moule ou de la grappe complète sans passer par le modèle est en développement.

# **DEUXIÈME PARTIE**

# Diapositive 4

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

* Moulage en moule permanent gravité (diapositive 5-2ème partie);
* Moulage en moule permanent par basculement (diapositive 6-2ème partie);
* Moulage en moule permanent basse pression (diapositive 7-2ème partie);
* Deux variations applicables à ces trois procédés sont le moulage semi-permanent où un noyau en sable à prise chimique (habituellement, hot box, diapositive 18-1ère partie) est placé dans le moule chaud et le surmoulage sur un insert en acier ou en cuivre placé 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 avec silicium sont adaptés au moule permanent, particulièrement s’ils ont une bonne résistance à la fissuration à chaud (diapositive 14-1ère partie) étant donné la rigidité du moule métallique. 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 moulage en moule permanent est bien adapté aux pièces de moyenne et grande série de complexité simple à moyenne et offre les meilleures propriétés mécaniques parmi les procédés de moulage pour l’aluminium.

# Diapositive 5

Le moule permanent est rempli en mode statique par le haut. Le procédé est utilisé pour de petits moules habituellement simples. Le moule peut être monté sur des charnières ou sur une presse à ouverture avec plan vertical avec utilisation de tiges d’éjection (diapositive 8-2ème partie) pour des moulages plus complexes.

L’aluminium est un métal qui s’oxyde facilement et doit être coulé en source c.-à-d. 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 entraînement d’air. Cependant, 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 ce 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.

Notez ici que le moule sur la photo de droite est monté sur une basculeuse, mais est coulé par gravité.

# Diapositive 6

Le moule est monté sur une presse basculante. 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 avec le plan de moulage à la verticale. Le basculement contrôlé du moule permet de ralentir le remplissage et 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 d’éjection.

Ce type de moulage permanent est le plus répandu : il produit des pièces d’excellente qualité métallurgique et assure une bonne productivité. L’usage d’insertions métalliques ou de noyaux semi-permanent est possible.

# Diapositive 7

Le moule permanent est placé sur une presse située au-dessus d’un four hermétique et relié au bain de métal liquide par un tube de transfert immergé (photo de droite). Pendant la phase de coulée, une pression d’air inférieure à 1 bar est appliquée au four pour remplir le moule par le bas par remontée dans le tube de transfert. Cela permet d’éliminer la turbulence par un remplissage contrôlé du moule. De plus, une pression s’approchant de 1 bar qui correspond à une tête de métal d’environ 3 mètres de haut est appliquée en fin de remplissage afin d’aider à l’alimentation et réduire la porosité. 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 récupération du métal pouvant atteindre 90 % par rapport à 50-60 % en moulage avec canaux d’alimentation et masselotte conventionnelle.

Le moule est monté sur une presse et le châssis supérieur dessus du moule est installé sur le plateau mobile, un cylindre hydraulique actionnant la plaque qui contient les tiges d’éjection est installé du côté du plateau mobile. Le moule peut aussi contenir des parties (noyaux) mobiles latérales 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 via des tubes de transferts adaptés à 2 sorties. On peut aussi utiliser des moules avec plusieurs empreintes alimentées par des canaux raccordés au point d’arrivée du métal par le tube de transfert central.

# Diapositive 8

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 structurelle 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 de la presse en fin de cycle.

On peut aussi couler des moules au sable en basse pression, dans ce cas le moule est amené au-dessus de tube de transfert et le cycle de pression est démarré.

# Diapositive 9

Le moule permanent 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 servent au démoulage de la pièce après la solidification et un temps de prise raisonnable pour sortir la pièce sans la déformer. Elles sont montées sur une plaque mobile reliée à un cylindre hydraulique qui déplace la plaque après le temps de prise pour la libérer de la cavité du moule. La plaque retourne à sa position initiale à la fermeture du moule soit par le cylindre hydraulique ou par l’intermédiaire de contre tiges qui la repoussent 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 du moule ou pour mouler les cavités. Si le moule utilise des insertions pour un 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.

Certains moules sont munis de canaux de refroidissement à air (diapositive 10-1ère partie).

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 évents principaux (plus faciles à utiliser en mode gravité), les espaces entre les noyaux ou les tiges d’éjection, 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 peut s’appuyer sur des logiciels de simulation de remplissage et de solidification pour concevoir le système d’alimentation et masselottage du moule. La photo montre un moule de moulage basse pression, il est exempt de masselotte et de canaux d’alimentation puisqu’alimenté directement par le tube de transfert via une attaque unique au bas 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 dû 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.

# Diapositive 10

Le défi du procédé de moulage permanent est d’obtenir un profil thermique de moule assurant la solidification dirigée. On y parvient par l’utilisation d’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 le suivant : 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 extraction du moulage, opérations d’entre coulées et attente avec moule ouvert si requis.

Les autres méthodes de contrôle thermique sont :

* Un choix d’enduits poteyages isolants ou conducteurs (photo de droite);
* L’usage de canaux refroidis à l’air comprimé ou par un fluide caloporteur (diapositive 10);
* Des matériaux plus conducteurs comme un alliage cuivreux (cupro-aluminium afin d’éviter la dissolution du cuivre dans l’aluminium) insérés de manière permanente dans le moule à certains endroits.

Les poteyages à base de poudres réfractaires isolantes (mica, mullite, talc) servent à protéger le moule de l’attaque par aluminium liquide et à en ralentir la solidification. Les poteyages lubrifiants et conducteurs de chaleur (graphite, nitrure de bore) servent 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 micropouces RMS et en plus, une certaine rugosité aide à évacuer l’air à l’interface moule métal ce qui aide l’alimentation en métal liquide.

# Diapositive 11

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 de sable 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 les outillages métalliques ne changent 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.

Le fini de surface dépend de la granulométrie du poteyage appliqué, un fini de 200 RMS est possible

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. Le procédé élimine toute la production et la manipulation de moule en sable.

Malgré les propriétés mécaniques très intéressantes obtenues, la productivité de 12 pièces par heure ne permet pas de mouler efficacement les applications automobiles. Plusieurs machines montées de moules identiques sont requises. Pour cette raison, on préfère le moulage sous pression.

# Diapositive 12

Le nombre de pièces à produire dicte le passage au moule permanent. Le prix d’un moule permanent simple démarre à 10 000 $ vs. celui d’un outillage simple en moulage au sable, de 5 000 $. Il faut donc prévoir la conception de la pièce avant de prendre la décision. Par exemple, la conception de la pièce en moule permanent doit tenir compte du mouvement des deux coquilles au démoulage, ce qui limite le degré de liberté. Les rayons de courbure des pièces seront plus généreux et les parois plus minces.

Les pièces en moule permanent dépassent rarement le 1,5 m en dimension. Le moule permanent permet l’insertion par surmoulage de pièces en acier ou en cuivre (photo du bas, diapositive 10-2ème partie).

# Diapositive 13

Le moule permanent exclut l’usage des alliages à haute résistance mécanique disponibles en moulage sable, car ils se déforment moins à chaud ce qui favorise la fissuration des zones non encore solidifiées. Les pièces moulées en moule permanent sont limitées dans leur forme de conception qui doit aller dans le sens du démoulage. L’usage de noyaux mobiles extractibles augmente beaucoup le prix de l’outillage et il n’est pas toujours possible de tous les placer autour d’un moule.

La précision dimensionnelle en moule permanent, bien qu’affectée par les opérations de poteyages, reste meilleure qu’en moule au sable qui est affecté par les variations de dimension des outillages, la force et la recette de sable.

Le moulage permanent élimine les opérations de préparation de sable et les équipements requis (diapositive 16-1ère partie) et le besoin de recyclage du sable chimique. Il est donc un procédé plus vert. Le moule permanent génère moins de défauts de fonderie et exige moins d’habileté au fondeur étant donné que le moule est déjà prêt.

# Diapositive 15

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 à très grande vitesse 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, 35 000 kN (3500 T). La force de la presse est donc directement liée à la surface projetée de la pièce moulée.

Le principal avantage du procédé est la cadence rapide qui permet d’abaisser les coûts de production et de fournir 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 excellents. Cependant, la liberté de conception est pratiquement limitée à l’axe d’ouverture du moule comme pour les pièces montrées (diapositive 23-2ème partie). 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.

On distingue trois variantes de ce procédé :

* Moulage sous pression traditionnel. 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 rapide. 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 permettent pas de réaliser de traitements thermiques, de la soudure et même certains types de peinture en cuites. Heureusement, la résistance mécanique est assurée par la peau du moulage ce qui fait que plusieurs pièces moulées en fonderie sous pression traditionnelle sont encore moulées avec succès par cette méthode qui représente 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 résistances mécaniques malgré un allongement inférieur à 3 % (diapositives 25 et 26-2ème partie).
* Moulage sous pression sous vide incluant le moulage sous vide pour applications structurales. On obtient une très bonne qualité de pièce par l’usage du vide de 25 kPa à 7 kPa dans l’empreinte avant l’injection pour réduire la présence d’air emprisonné, et par le pilotage en temps réel du cycle de moulage (diapositive 19-2ème partie). Le procédé de moulage 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 de rendre le traitement thermique possible pour les pièces dédiées aux applications structurelles automobiles.
* Moulage sous pression semi-solide, beaucoup moins répandu. On alimente le conteneur du piston de la presse avec une pâte semi-liquide préparée en dehors de la presse.

Les deux derniers procédés représentent des développements motivés par l’allègement des véhicules terrestres par l’utilisation d’un procédé de moulage économique à forte cadence pour les pièces structurelles moulées en aluminium. Le développement de ce procédé et des alliages dédiés est présentement le plus actif du domaine de la fonderie, tous métaux et procédés confondus.

# Diapositive 16

Le procédé de moulage sous pression se décline en deux types 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 et reste difficile à utiliser pour l’aluminium liquide qui dissous facilement le fer et oblige l’usage d’éléments fragiles en céramique. Le procédé de chambre froide utilise un conteneur chauffé du piston (photo de droite) dans lequel est transféré, à la louche ou par robot doseur, le métal liquide requis pour remplir la pièce. Après l’injection, il reste une rondelle appelée biscuit attaché aux canaux d’alimentation et la pièce moulée : la face du biscuit correspond à la surface du bout du piston.

Le procédé de moulage sous pression se divise en 6 phases : le transfert de métal liquide à la main ou par un robot doseur, fermeture du moule et phase d’approche de l’injection, l’injection rapide, l’intensification au gaz, l’éjection et la lubrification du moule manuelle ou automatique. Chaque phase est optimisée pour maximiser la cadence de production et minimiser le nombre de pièces rejetées.

# Diapositive 17

La presse de moulage est constituée de trois unités principales : l’unité d’injection, l’unité de fermeture et les périphériques (robot verseur, bras de lubrification, système de chauffage et de refroidissement du moule et de tirage d’air pour le sous vide). L’ensemble de la machine est actionnée grâce à une unité hydraulique unique placé à l’arrière de la presse (diapositive 18-2ème partie).

L’unité d’injection (photo de droite) 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 (diapositive 20-2ème partie), 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 (photo du centre) est composée d’un plateau mobile qui contient le système d’éjection de la pièce moulée et d’un plateau fixe où se trouvent le trou de coulée et 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 calcule selon la formule suivante :

où F est la force exercée par le métal, Pint 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 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 (photo de gauche et diapositive 19-2ème partie), 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 de la courbe d’injection (photo de gauche et diapositive 20-2ème partie), la console d’opération (photo de droite) et les éléments de sécurité comme la porte coulissante.

# Diapositive 4118

La presse d’injection utilise une seule pompe hydraulique pour alimenter les mouvements du plateau mobile, de la plaque d’éjection et du piston. Celui-ci et son réservoir de fluide hydraulique non inflammable font partie de la presse.

La diapositive montre aussi la pompe à vide et son réservoir de vide qui sont des éléments séparés utilisés en option pour le moulage sous pression sous vide. Une valve à la sortie du réservoir de vide est instrumentée avec l’interface de programmation principale du cycle de coulée pour s’ouvrir entre la fermeture du moule et l’injection.

# Diapositive 4219

La cellule de moulage sous pression comprend le four, la presse d’injection, le système de thermorégulation du moule, le système de lubrification et des options comme : la pompe à vide et un système d’acquisition de données avec rétroaction.

Le système de thermorégulation consiste en un chauffe moule (photo de gauche) avec fluide caloporteur qui sert aussi au chauffage initial du moule et du piston d’injection. Celui-ci est relié par des boyaux aux deux parties du moule. Des canaux de circulation d’eau sont aussi présents.

La presse peut aussi être reliée à un système d’acquisition sophistiqué de données pour le maintien de la température du moule et pour le pilotage en temps réel du cycle d’injection (photo de gauche et diapositive 20-2ème partie). Des capteurs avec réponse rapide mesurent la pression et la position du piston d’injection 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.

La lubrification sert à faciliter le démoulage et refroidir le moule. La photo de droite montre le réservoir de lubrifiant et l’applicateur manuel. Le lubrifiant appliqué sur le moule entre les injections est 100 % liquide et ne contient aucune suspension céramique comme ceux utilisés en moule permanent ; il n’affecte donc pas les tolérances dimensionnelles en s’accumulant. Le lubrifiant est appliqué manuellement ou de manière automatique. Il permet aussi le refroidissement du moule par évaporation.

La cellule de moulage peut contenir une presse d’ébavurage pour couper le système d’alimentation aux attaques (non montrée). La cellule de production peut être entièrement robotisée, allant du chargement de la louche de métal liquide, à l’installation d’insert en acier ou en cuivre dans le moule, l’application du lubrifiant, la sortie de la pièce et la découpe.

Le four (photo de droite) consiste en une enceinte contenant un creuset en carbure de silicium chauffé ici par résistance électrique. Le chauffage au gaz ou par induction est aussi possible. Dans le cas du procédé sous vide, on retrouve une pompe à vide et un réservoir de vide à proximité (diapositive 18-2ème partie).

# Diapositive 4320

Le cycle de moulage sous pression traditionnel d’une petite pièce est montré sur la photo. Le piston se déplace à une vitesse (ligne verte) qui croit rapidement jusqu’à un maximum de 2,12 m/s dans les derniers millimètres de sa course, puis décroit. La pression dans le métal (ligne blanche) s’élève brusquement à ce moment jusqu’à 260 bar et celle du groupe hydraulique baisse (courbe bleue). La position du piston en fin d’injection pendant la phase d’intensification au gaz est montrée par la courbe en jaune à droite.

# Diapositive 4421

La diapositive montre les deux parties du moule qui a servi au moulage de la pièce montrée à droite. Le moule sous pression est constitué dans la majorité des cas de deux coquilles métalliques en alliage ferreux. Les matériaux utilisés pour la fabrication des coquilles sont habituellement :

* 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 les aciers les plus durs et dans certains cas elles sont traitées superficiellement (par exemple par nitruration) pour limiter le collage de l’aluminium.

Le moule 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 (biscuit) et une partie de l’empreinte de la pièce. Elle peut aussi avoir des noyaux latéraux à tiroir pour mouler des cavités dans la pièce. Vu que cette partie ne bouge pas, il est plus simple d’y placer les noyaux mobiles. Notez que l’usage de noyaux mobile reste difficile en moulage sous pression vu le manque d’espace disponible et le besoin de pressuriser ce noyau pour éviter les fuites. La conception dans l’axe du moulage est donc quasi obligatoire.

La partie mobile contient les tiges d’éjections servant au démoulage, les canaux d’alimentation et l’autre partie de l’empreinte de la pièce. Les tiges d’éjection sont montées sur une plaque d’acier robuste actionnée par un piston après l’ouverture du moule. La plaque est retournée à sa position lors de la fermeture du moule au moyen de tiges de retour placées aux coins de la plaque hors de la cavité.

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 réduire les coûts d’outillage, l’empreinte est souvent constituée d’une insertion principale placée dans un cadre plus gros pouvant produire plus d’un type de pièce. Les inserts ou les moules appartiennent typiquement au client.

Pour le moulage sous vide, le vide est appliqué 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, bloc de refroidissement à chicane (sur la photo) et une vanne d’ouverture. Une valve mécanique d’ouverture et de fermeture peut aussi être utilisée.

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 difficiles d’entretien, car elles peuvent se remplir d’enduit ou de métal liquide. Le niveau de vide obtenu dans la cavité de moulage est aussi affecté 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.

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 et minces afin de faciliter la coupe sur des presses d’ébavurage après la coulée. La conception des pièces utilise largement les nervures sur le moulage pour augmenter la rigidité et la résistance mécanique, ce qui aide aussi à remplir l’empreinte rapidement avant la solidification de l’alliage et à évacuer l’air et 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 espaces ajoutés au bout du moulage [voir photo] qui servent à équilibrer le mouvement du métal et capter les inclusions formées au remplissage). Dans le cas du moulage sous vide, les paramètres d’application du vide ont aussi une importance pour le remplissage.

L’utilisation de logiciels de modélisation du remplissage permet d’améliorer la phase de conception du moule.

# Diapositive 4522

En moulage sous pression traditionnel, la surface plus saine donne la majorité des propriétés mécaniques (effet de peau). Le centre de la pièce comporte de la porosité comme montré à droite. Le défaut majeur montré à gauche provient d’une mauvaise information entre le client et la fonderie qui a eu comme résultat de placer la porosité à l’endroit le plus sollicité de la pièce. Le fondeur a dû ralentir la vitesse de coulée en attendant la modification de ses machines et du moule pour mouler sous vide.

La porosité crée un problème de bulles de surface qui apparaissent si le métal est chauffé, dû à l’augmentation de pression dans ces bulles combinées à des propriétés mécaniques plus faibles de l’aluminium autour. Le chauffage est requis pour les traitements thermiques de durcissement structural, la cuisson de la peinture en poudre et l’assemblage par soudure.

On obtient des pièces structurales en aluminium pour le marché automobile en utilisant le sous vide pour éliminer la porosité, en utilisant le pilotage de la courbe d’injection (diapositive 43) et en utilisant des alliages adaptés pour le traitement thermique souvent effectués à plus basse température que pour les alliages d’aluminium réguliers.

# Diapositive 4623

Le procédé donne un excellent fini de surface dû à l’absence de poteyage et de sable. Les tolérances dimensionnelles sont équivalentes à celle du moulage en cire perdue. Les pièces moulées nécessitent peu d’usinage, sauf les filets, et comme elles sont plus minces avec le démoulage assisté par les tiges d’éjections, elles utilisent donc des nervures de renforcement, les angles de dépouille étant plus faibles. Le surcoût d’un moule (25 000 $ et plus) demande un amortissement rendu possible par les grandes séries et heureusement, le moulage sous pression permet une grande capacité de production.

Historiquement, le moulage sous pression de type traditionnel était destiné à la production de pièces non structurelles comme des boîtiers qui sont montrés dans la diapositive.

# Diapositive 4724

Rappel des concepts discutés aux diapositives 18 à 22-2ème partie. Le sous vide est essentiel à la production de pièces structurelles par moulage sous pression. Ici, on montre la pompe et le réservoir de vide et le tirage d’air massif de la cavité du moule.

# Diapositive 4825

Depuis 20 ans, il se fait beaucoup de travaux de recherche et de développement pour développer le moulage sous vide de pièces structurales pour le secteur automobile. Soit sur les aspects suivants :

* Usage du moulage sous pression sous vide (diapositive 24-2ème partie)
* Usage d’alliages à bas fer. Historiquement, on utilisait des alliages de recyclage secondaire automobile saturés en zinc et en fer qui forment des cristaux résistants dans l’aluminium, mais de forme acérée. On obtenait de bonnes propriétés mécaniques, mais des allongements à la rupture faible de 3 % dû aux effets d’entaille de ces cristaux riches en fer présent (diapositive 26-2ème partie). L’usage d’un alliage à bas fer est rendu possible en ajoutant du manganèse pour réduire l’attaque du moule par l’aluminium liquide. Le strontium est aussi ajouté pour arrondir les cristaux de fer (la modification) ce qui élimine les effets d’entailles. On peut donc obtenir des allongements à la rupture supérieure à 10 % (diapositive 27-2ème partie) compatibles avec les applications structurelles.
* Remplissage sans turbulence du conteneur au moyen d’un dalot ou par basculage du four avec filtration du métal liquide en ligne.
* Pilotage du procédé et de la thermorégulation du moule (diapositive 19-2ème partie).
* Développement des traitements thermiques. Le traitement thermique de l’aluminium de type T6 est couramment utilisé en moulage au sable, à la cire perdue et permanent. Par contre, il reste délicat même avec le sous vide dû aux possibilités de cloquage pendant les chauffages (diapositive 23-2ème partie). Le traitement thermique de trempe structurale de l’aluminium (de type T6) se fait en 3 étapes : chauffage pour mettre en solution et faire disparaitre des cristaux formés par l’aluminium et les éléments d’alliages présents (1), trempe rapide habituellement à l’eau pour obtenir un métal sursaturé en éléments d’alliages en solution (2) et finalement revenu de précipitation pour faire réapparaître des microcristaux durcissants assez stables pour performer en service (3). On a développé des alliages qui permettent les traitements de type T6 qui donnent les meilleures propriétés mécaniques. On peut aussi effectuer un traitement thermique de type T5 moins performant, c.-à-d. la trempe de pièce dans un bac d’eau à la sortie de la presse de moulage et revenu de précipitation au four afin d’éviter les températures de mises en solution autour de 350 °C.

Pour l’automobile, à partir des boîtiers traditionnels sous le capot, on a produit des moulages de bloc-moteur [années 75-85], les roues d’alliages [années 80-90] et maintenant des pièces de structure : berceaux moteurs, joints et pièces du châssis.

# Diapositive 26

Les alliages de bas provenant de la récupération des carcasses de véhicules sont le 380 et le 360 et contiennent beaucoup de fer. Les variantes A380 et A360 sont fabriqués à partir de métal primaire provenant des cuves d’électrolyse et donne un peu plus d’allongement à la rupture. Si moulées sous vide, nous dépassons les valeurs inscrites dans le tableau de la diapositive. Le 413 à 12 % silicium fond à une température unique de fusion de 577 °C donc forme un front de solidification plutôt que des dendrites [diapositive 13-1ère partie] ce qui donne des moulages sains sans porosités pour des pièces d’étanchéité qui ne demande pas d’allongement à la rupture (ils sont saturés de cristaux de silicium avec arêtes pointues). L’alliage 390 contient 17 % de silicium et de gros cristaux de silicium entourés de la même structure composée de 100 % de cristaux pointus que l’alliage 413. Les gros cristaux de silicium augmentent la résistance à l’usure pour l’utilisation dans de petits blocs moteurs.

L’alliage 518 avec magnésium est utilisé pour les applications maritimes.

Notez que la coulée de barreaux d’essai de traction pour qualifier une production n’est pas possible en moulage sous pression, car il nécessiterait une machine et un outillage séparé.

# Diapositive 27

Le procédé de moulage sous pression sous vide permet l’usage d’une nouvelle gamme d’alliages pour applications structurales. Ces alliages contiennent du silicium de 7 à 12 %, pour la coulabilité, une teneur en fer en général inférieure à 0,25 %, et du magnésium pour obtenir une bonne fluidité et une aptitude aux traitements 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 [brut de coulée] et traités thermiquement T5, T6 [diapositive 25-2ème partie] et T7 (mise en solution, trempe et survieillissement à température plus élevée que le T6, habituellement pour éviter la corrosion intergranulaire de certains alliages.

# Diapositive 28

Le moulage semi-solide utilise un alliage alimenté sous forme pâteuse dans le conteneur du piston de la presse de moulage à chambre froide. L’alliage est parfois préparé par malaxage dans un appareil situé à côté de la presse de moulage [slurry sur demande]. On obtient moins de porosité et de meilleurs allongements à la rupture dû au phénomène d’arrondissement des cristaux durcissant pendant le malaxage. Ce procédé est plus rarement utilisé en partie dû à son surcoût. En combinaison avec le procédé de moulage sous pression sous vide, on vise le moulage des pièces montrées dans la photo.