Moulage de pièces métalliques creuses sans noyau : technique de la coulée vidangée

Introduction :

Les procédés conventionnels de moulage en fonderie utilisent généralement des éléments moulants destructibles ou permanents, appelés noyaux ou broches, pour l'obtention des géométries intérieures des pièces moulées, voire moins couramment des inserts tubulaires noyés à la coulée. Toutefois, la centrifugation permet la réalisation d'une forme intérieure creuse de révolution (fabrication de tubes), cylindrique si l'axe de rotation du moule est horizontal ou paraboloïdale si l'axe de rotation du moule est vertical, sans noyau et sur une longueur qui peut être relativement importante vis-à-vis du diamètre de tuyau réalisé. Moins utilisée de nos jours, la coulée au renversé permet aussi la confection de pièces creuses par moulage sans noyau mais elle nécessite un retournement du moule afin d'assurer la vidange du métal liquide non solidifié pour l'obtention de la forme intérieure des pièces. La plasturgie emploie aussi des techniques comme le rotomoulage ou le thermo-soufflage, peu adaptées à la mise en œuvre avec des matériaux métalliques. Nous présentons ici une nouvelle piste d'obtention de pièces métalliques creuses sans noyau où le moule reste fixe, voire peut être légèrement incliné, pendant l'évacuation de l'alliage encore non solidifié à cœur de pièce. Le laboratoire industriel de fonderie de l'ENSAM Lille, PSL valorisation (Paris Sciences et Lettres) et l'ENSADLab travaillent actuellement ensemble pour le développement de ces nouveaux procédés. Désignées par « coulée vidangée », différentes possibilités de moulage (gravitaire, basse pression, sous pression) sont ici illustrées et leurs intérêts mentionnés. En effet, malgré une mise au point délicate et un état de surface particulier à l'intérieur des pièces moulées, la coulée vidangée offre certains avantages majeurs comme l'obtention de formes creuses sans noyau, des épaisseurs de pièces plus faibles qu'avec les procédés conventionnels notamment gravitaires, des temps de cycle très courts, une mise au mille très faible et un parachèvement limité.

Court rappel sur les procédés de centrifugation et de coulée au renversé :

Les avantages majeurs de la centrifugation pure à axe horizontal sont notamment : la compacité métallurgique liée notamment à une solidification dirigée et à l'accélération radiale, une régularité d'épaisseur de pièce sur une longueur importante, une faible mise au mille, un process relativement contrôlable et automatisable en grande série. Cette technique est assez courante chez les industriels pour la fabrication de canalisations (cf. usines de Pont-à-Mousson) et de chemises de moteurs thermiques (constructeurs automobiles). La figure 1 en rappelle le principe général. Une contrainte du procédé reste la rotation du moule et l'extraction des tubes solidifiés.

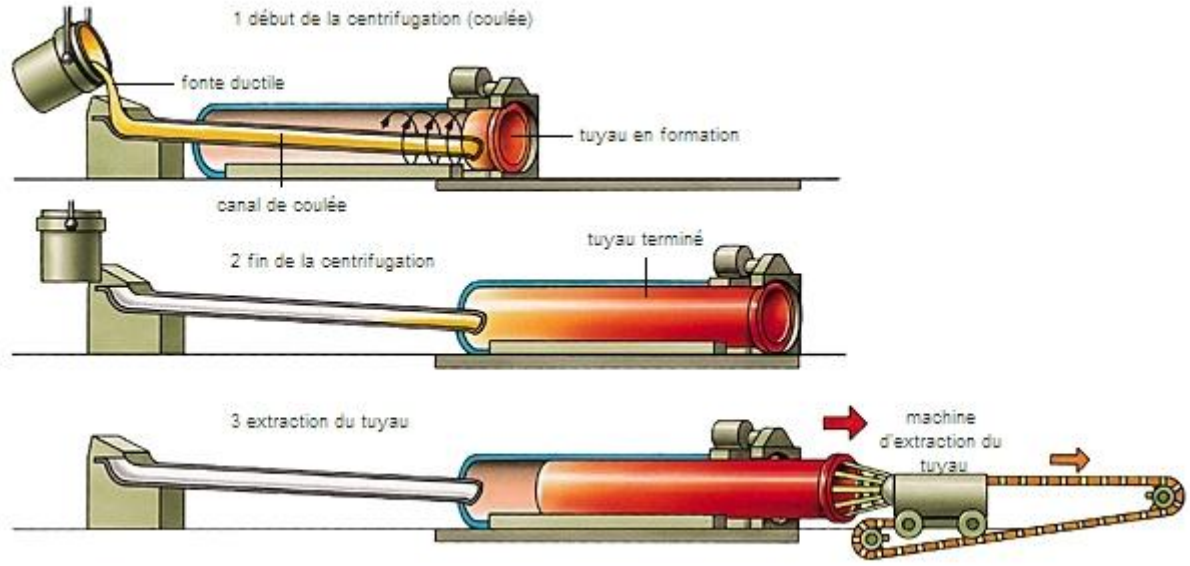


Figure 1 : Centrifugation de tuyaux [1].

La coulée au renversé est illustrée par la réalisation d'une amphore décorative en alliage d'aluminium en figure 2. La pièce moulée en AlSi12 et coupée par son plan de symétrie montre les épaisseurs et états de surface obtenus en figure 3.

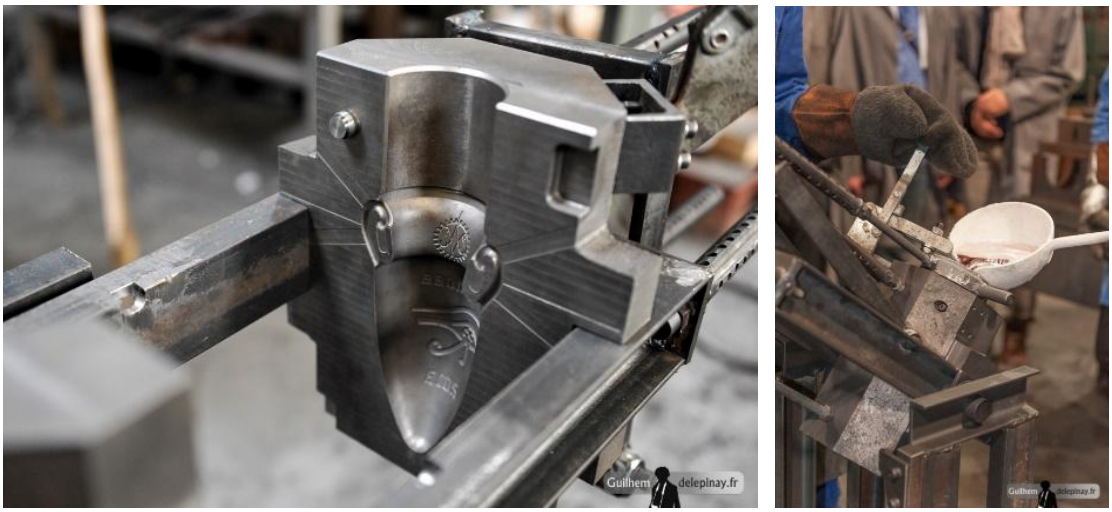


Figure 2 : Chape mobile de la coquille et coulée d'une amphore

L'amphore (f) coupée présente une épaisseur forte (c) et une paroi intérieure lisse (d) dans la zone de broche ; mais son épaisseur (a et b) peut être extrêmement faible dans la zone vidangée.

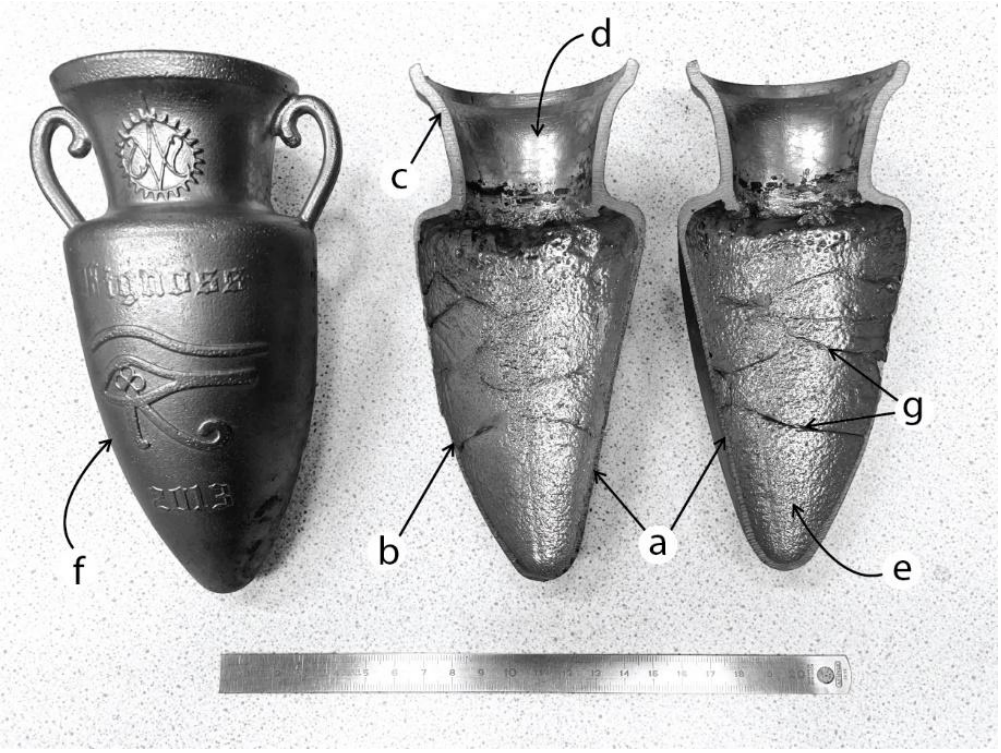


Figure 3 : Vue en coupe d'une amphore obtenue par coulée au renversé

L'état de surface intérieur (e) de la zone vidangée présente un relief lié à la cristallographie de l'alliage et à l'écoulement de l'alliage lors du basculement du moule. Certaines peaux d'alumine (g) formées par les bulles d'air rentrantes lors du renversement du moule sont aussi présentes en relief à l'intérieur de la pièce. Le moule étant incliné du même côté pendant la coulée et la vidange, l'épaisseur de paroi (a) est ici plus forte que celle de la paroi (b) où l'alliage reste moins longtemps en contact avec le moule durant le cycle du procédé.

La coulée au renversé fonctionne bien avec des alliages à faible intervalle de solidification (températures de liquidus et solidus très proches ou égales) et peut permettre la confection par gravité de pièces à épaisseur de paroi plus faible qu'avec le moulage classique en coquille (limité par la tension superficielle des alliages et la pression métallostatique).

Liens internet pour description plus détaillée du principe de la coulée au renversé de l'amphore :

https://delepinay.fr/fonderie-arts-et-metiers-video/

https://delepinay.fr/reportage-fonderie-la-coulee-au-renverse/

Un inconvénient de la centrifugation et de la coulée au renversé est la nécessité d'une rotation du moule pour leur fonctionnement.

Principe et exemples de la coulée vidangée par gravité :

L'intérêt de la coulée vidangée gravitaire est que le moule reste généralement fixe, c'est-à-dire non basculant pendant le cycle de fabrication. Le procédé consiste à remplir par gravité une empreinte d'alliage en fusion, puis après obtention d'une peau solidifiée par contact avec le moule à retirer du cœur de pièce l'alliage encore liquide en vidangeant celui-ci par gravité.

La figure 4 représente des exemples de systèmes de coulée vidangée par gravité.

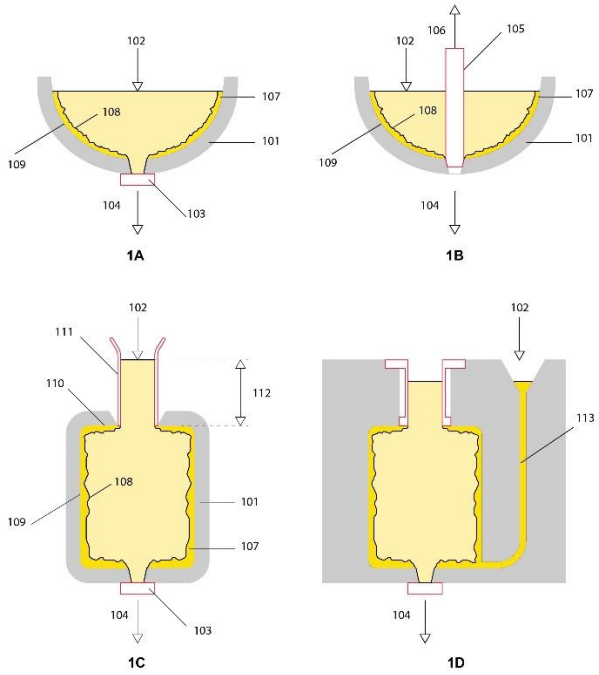


Figure 4 : Exemples de dispositifs de coulée vidangée gravitaire

Les schémas 1A et 1B illustrent un moule ouvert (101, métallique ou sable ou autre) vidangé par ouverture de trappe/bouchon (103, matériau isolant thermique ou métallique, chauffé ou préchauffé selon besoin) ou quenouille (105) ou autre dispositif placé sous le moule ou sur le côté du moule dans certaines applications. La coque métallique solidifiée (107) présente une surface intérieure cristallographique (108) dont l'état de surface dépend du type d'alliage métallique coulé et de l'écoulement lors de la vidange par gravité, et une surface extérieure lisse (109) complémentaire à la géométrie de l'empreinte du moule. La quenouille supérieure (105) se compose d'un matériau réfractaire, voire d'un tube métallique avec poteyage isolant, chauffé ou préchauffé si besoin.

Le schéma 1C représente un moule (101, métallique conseillé) permettant la fabrication d'une coque solidifiée (107) substantiellement fermée. La flèche (102) indique le remplissage du moule avec le métal/alliage métallique en fusion, voire un dispositif de remplissage plus classique peut être utilisé dans le moule (1D, 113). En partie basse du moule, un dispositif de trappe/bouchon/quenouille (103) permet la vidange (104) du bain de métal encore en fusion. Une partie (111) du moule, isolée

thermiquement ou chauffée (pas ou très peu d'alliage solidifié), assure une colonne de métal liquide permettant de compenser le retrait volumique de l'alliage liquide lors de son refroidissement et d'assurer un minimum de pression métallostatique en partie supérieure de l'empreinte pour la bonne venue de la géométrie de la pièce moulée.

Pour exemple, la figure 5 montre un luminaire avec éclairage indirect par lampe LED. La grande coupole réfléchissante est obtenue par coulée vidangée gravitaire et le plafonnier contenant le transformateur électrique utilise un procédé inverse à la coulée vidangée pour sa réalisation (coque solidifiée autour d'un gabarit métallique poteyé). Le moule métallique de coulée vidangée pour l'obtention la coupole est présenté en figure 6, ainsi que la pièce brute démoulée.



Figure 5 : Luminaire avec coupole moulée par la technique de la coulée vidangée gravitaire

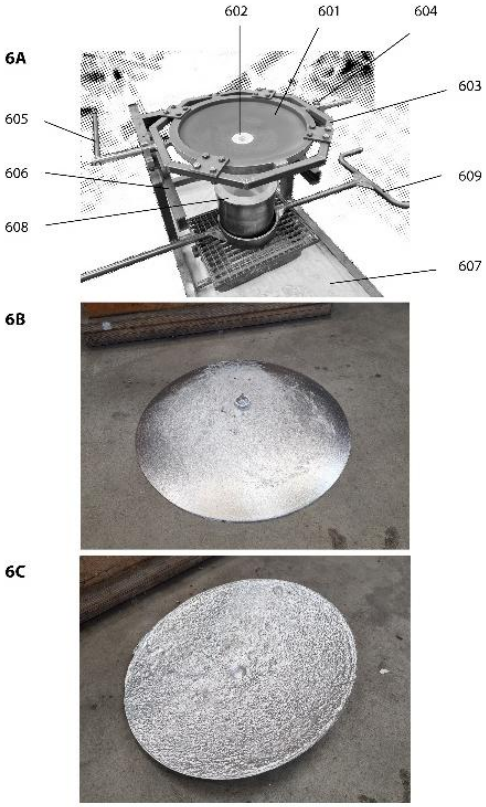


Figure 6 : Moule métallique pour luminaire et pièces éjectées

La figure 7 correspond à un dispositif envisagé chez un industriel, recycleur d'alliages d'aluminium, pour la production en grande série du luminaire. Le moule métallique (402) est alors disposé au-dessus du four (400) et un godet pivotant (405) permet d'alimenter l'empreinte via une goulotte (406/407). L'alliage vidangé (409) retourne ainsi directement dans le bain du four (401). Le moule est monté sur un pivot (410/411) pour le démoulage (412) de la coque solidifiée (414).

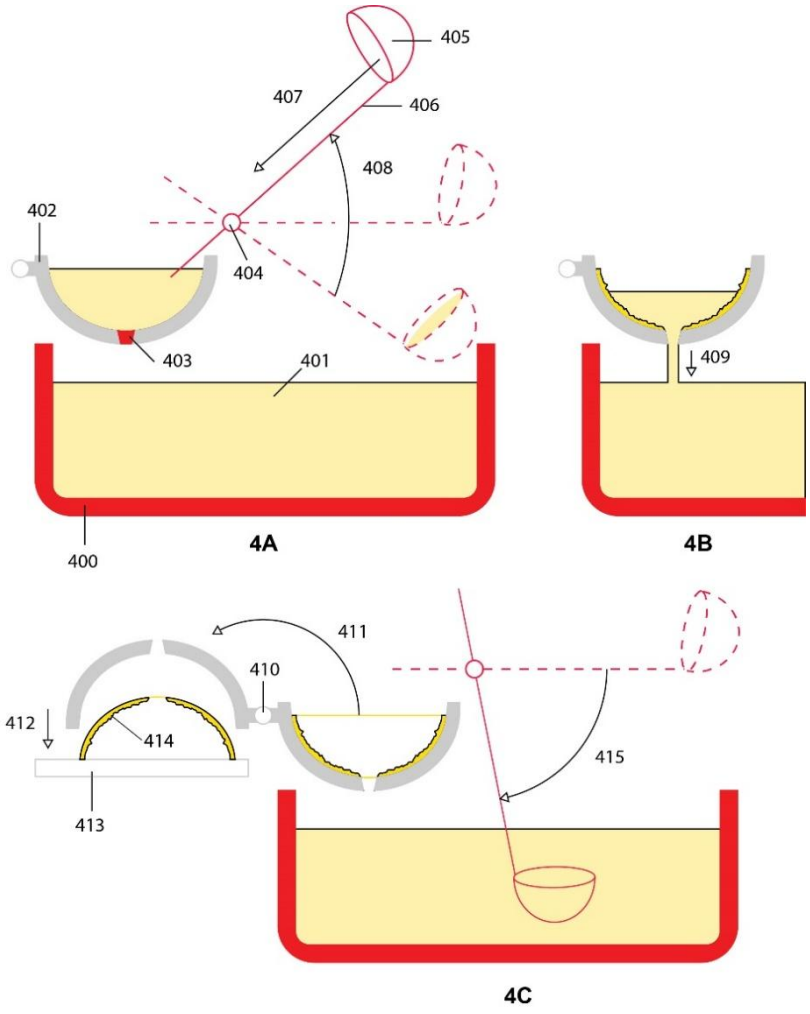


Figure 7 : Principe du moulage en série de la coupole réfléchissante du luminaire.

Le moulage au sable de petite série reste aussi possible par la technique de coulée vidangée. Pour exemple, la figure 8 illustre la réalisation d'un luminaire à partir d'un modèle bois (5A) par moulage au sable silico-argileux ou avec du sable à prise chimique (5B).

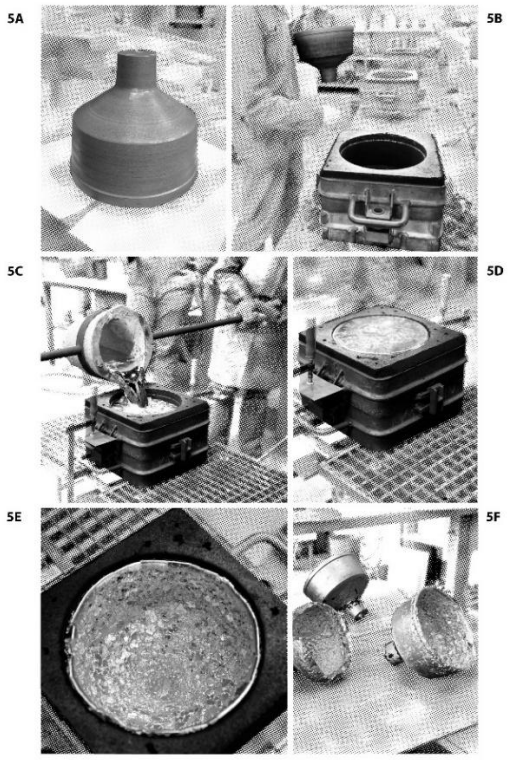


Figure 8 : Moulage au sable avec coulée vidangée gravitaire d'un luminaire

Application de la coulée vidangée en basse pression :

Les figures 9 et 10 permettent de comprendre les deux méthodes principalement utilisables en procédé basse pression pour réaliser une coulée vidangée.

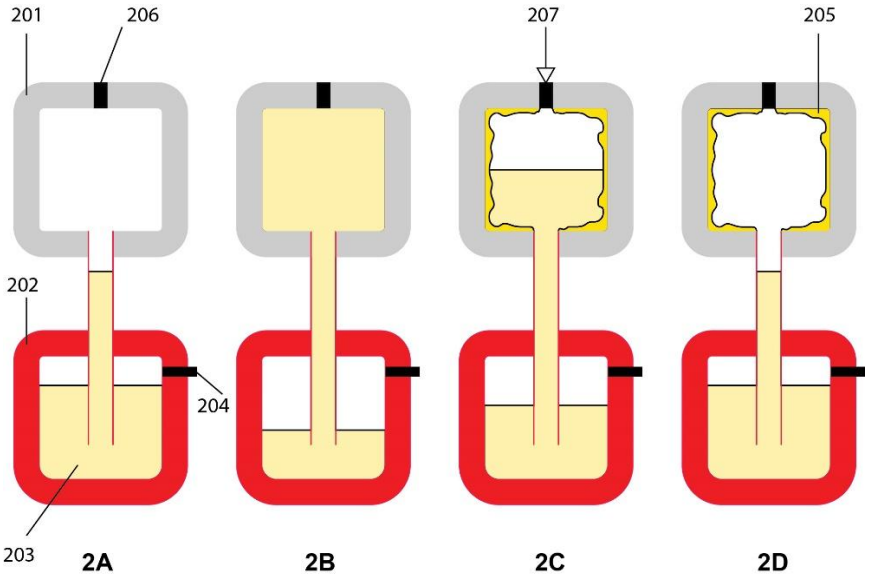


Figure 9 : Coulée vidangée en basse pression aidée par un appel d'air/gaz depuis la partie supérieure de l'empreinte du moule.

La figure 9 représente un système de coulée basse pression avec une arrivée d'air ou de gaz située localement dans le moule pour assurer la vidange. Le schéma 2A correspond au remplissage du moule fermé. Les schémas 2B, 2C et ED illustrent respectivement le moule rempli, sa vidange et la coque solidifiée obtenue dans le moule. Le moule/empreinte est désigné (201) ; le four ou creuset étanche aux gaz et contenant le métal ou l'alliage métallique en fusion est indiqué (202), (203) représentant le métal/alliage fondu. L'arrivée (204) d'air ou le gaz (azote, argon, ou autre) dont la pression peut augmenter au-dessus du bain permet de contrôler le remplissage du moule. En partie supérieure de l'empreinte (206), une trappe ou un bouchon en matériau très isolant thermique, ou en matériau chauffé ou préchauffé, évite la solidification, voire permet le perçage de la fine peau solidifiée à cet endroit. Un filtre chauffé à air, métallique ou réfractaire, peut aussi être employé là afin de réaliser l'appel d'air ou de gaz. L'arrivée (207) d'air ou de gaz (pression atmosphérique ou supérieure) favorise/permet la vidange de l'alliage encore liquide. Une coque métallique solidifiée (205) est ainsi obtenue dans le moule.

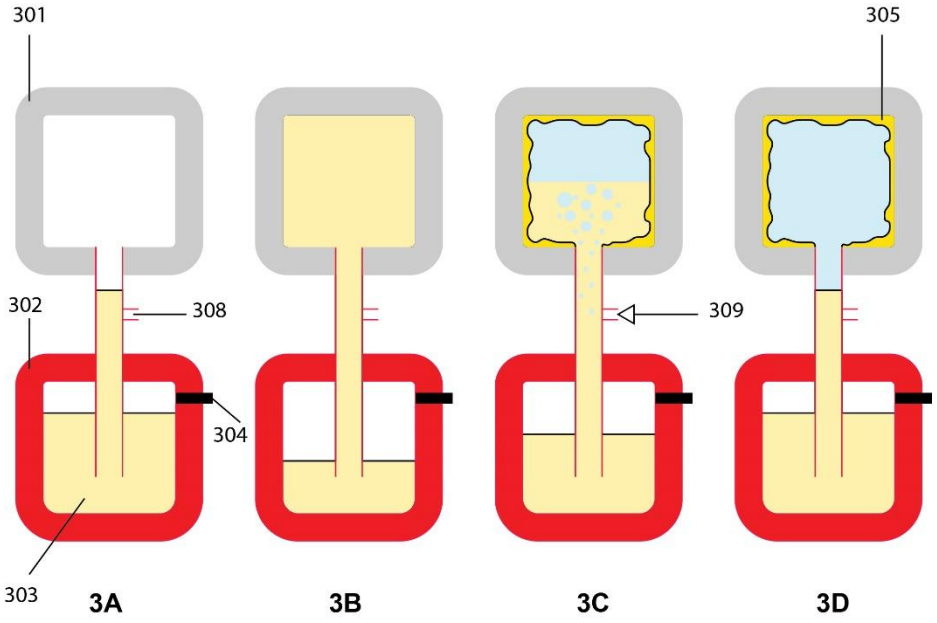


Figure 10 : Coulée vidangée en basse pression aidée par un appel d'air/gaz depuis le dispositif d'injection.

La figure 10 mentionne un dispositif de coulée basse pression avec une arrivée d'air ou de gaz au niveau de la buse d'injection pour assurer la vidange. L'entrée (304) d'air ou de gaz (azote, argon, ou autre) sous pression assure un remplissage contrôlé de l'empreinte du moule (301). Une vanne de gaz (308) est située au niveau supérieur du dispositif d'injection de l'alliage dans le moule. L'arrivée (309) de gaz ou d'air sous pression (atmosphérique ou supérieure) permet de favoriser / rendre possible la vidange. Par la suite, la coque métallique solidifiée (305) contre la paroi intérieure du moule est démoulée.

A ce sujet, un ancien brevet US déposé par Robert PORTALIER (Pechiney) peut être cité car il présente un dispositif basse pression où le même gaz est utilisé au-dessus du bain dans la chambre du four et pour la vidange dans l'empreinte. L'originalité de ce brevet est dans le dispositif de commande dont la figure 11 rappelle le fonctionnement.

Téléchargez le brevet Portalier « Apparatus for moulding thin layers » - 25 septembre 1973

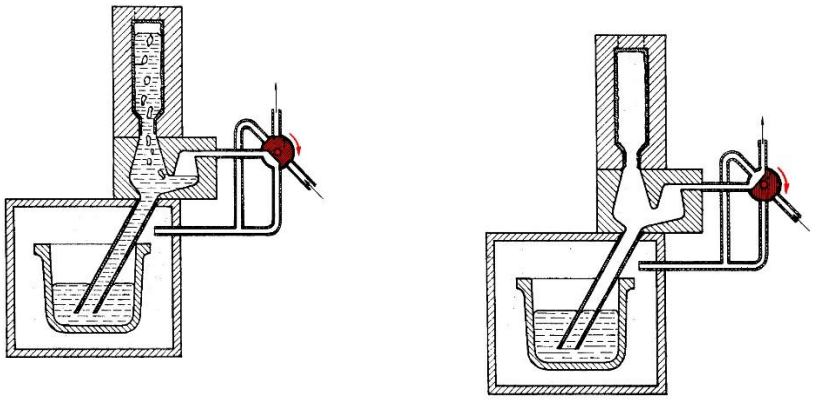


Figure 11 : Dispositif de commande en basse pression utilisant le même gaz dans le four et pour la vidange dans l'empreinte selon brevet de R. Portalier

Les figures 12 et 13 donnent quelques exemples de pièces moulées possibles avec la technique de basse pression et coulée vidangée.

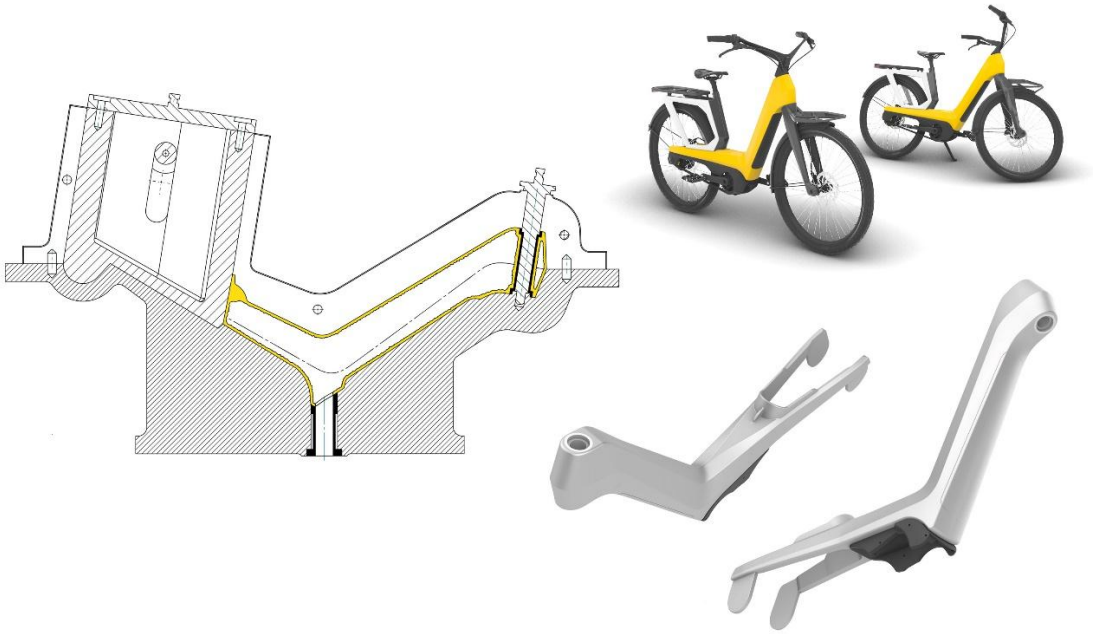


Figure 12 : Moulage BP d'un cadre de vélo électrique en alliage d'aluminium

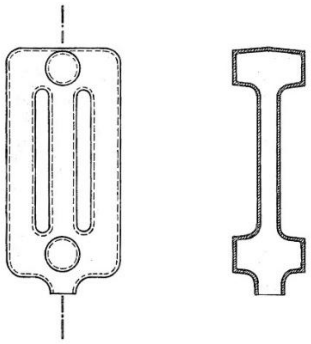


Figure 13 : Pièce de radiateur en alliage d'aluminium

La coulée vidangée en moulage sous pression :

Le récent brevet PSL/ENSAD-ENSAM présente plusieurs scénarios de moulage sous pression avec coulée vidangée. Dans cet article, nous nous limiterons à la présentation de certains de ces procédés.

Téléchargez le brevet PSL Guerin Costes « Procédé de fabrication par moulage, sans noyau, de pièces métalliques creuses » - 20 juin 2024

Numéro de publication internationale
WO 2024/126841 A1

Le procédé de moulage sous pression avec chambre chaude est le plus adapté pour la mise en œuvre de la coulée vidangée. La figure 14 montre la technique de coulée vidangée avec un piston (807) dans la chambre d'injection (806, gooseneck) et l'entrée d'air ou de gaz (803) en haut d'empreinte pour la vidange. Les zones dessinées en couleur rouge sont maintenues chaudes (four (804) et extrémité de buse d'injection (811) notamment).

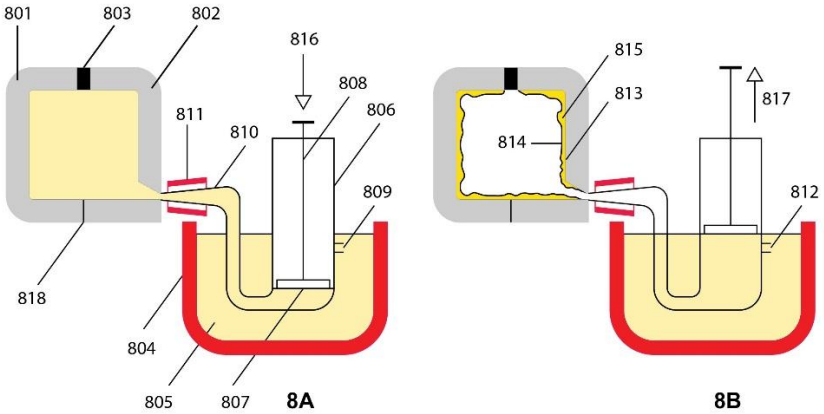


Figure 14 : Coulée vidangée en moulage sous pression à chambre chaude avec piston d'injection.

La figure 15 illustre le même procédé SP chambre chaude mais avec un gaz ou air comprimé (919) pour assurer l'injection. Une lumière obturable (921) permet l'alimentation de la chambre d'injection par le bain du four de maintien.

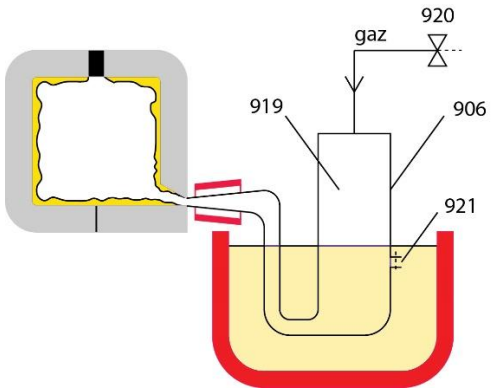


Figure 15 : Coulée vidangée en moulage sous pression à chambre chaude avec gaz ou air comprimé pour l'injection.

Des applications de la coulée vidangée se rapprochant du moulage sous pression à chambre froide ou du squeeze casting indirect sont envisageables et esquissées respectivement par les figures 16 et 17.

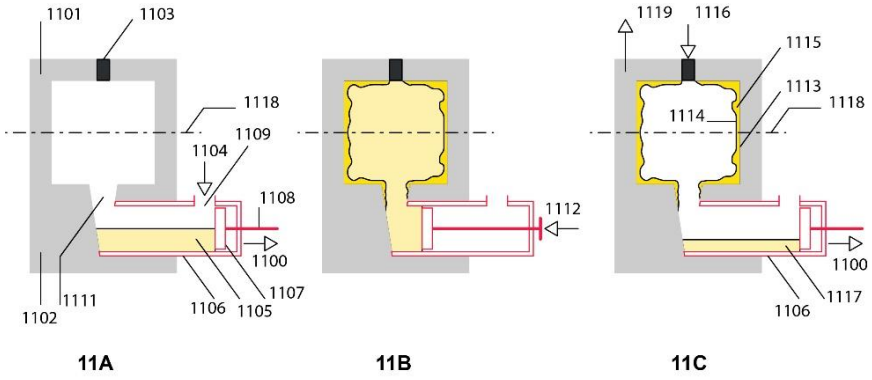


Figure 16 : Coulée vidangée en sous pression type chambre froide mais avec chambre thermorégulée

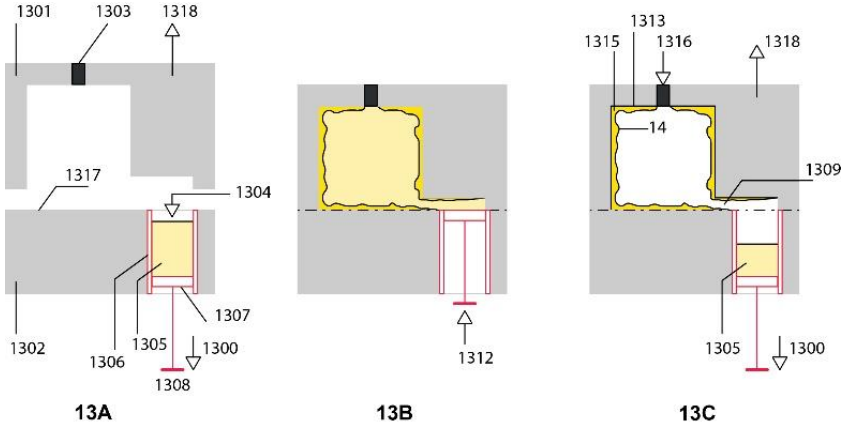


Figure 17 : Coulée vidangée avec dispositif de type squeeze casting indirect et chambre d'injection thermorégulée

Caractéristiques des pièces moulées par coulée vidangée

La pratique du procédé de coulée vidangée montre qu'il reste préférable de travailler avec un moule métallique plutôt qu'avec un moule en sable. Les alliages coulés à faible intervalle de solidification, alliage eutectique notamment (par exemple AlSi12), donnent les meilleurs résultats.

L'état de surface intérieur est lié directement à la cristallographie de l'alliage injecté dans le moule et à son écoulement lors de la vidange. Les conditions de refroidissement de l'alliage dans son empreinte participent directement à la rugosité de ces surfaces (cf. figure 18). Nous avons constaté que les alliages eutectiques offrent la surface intérieure la plus lisse. Les reliefs sur les surfaces intérieures des pièces restent aussi relativement liés aux cristaux primaires dendritiques pour les alliages hypoeutectiques (cf. figure 19).

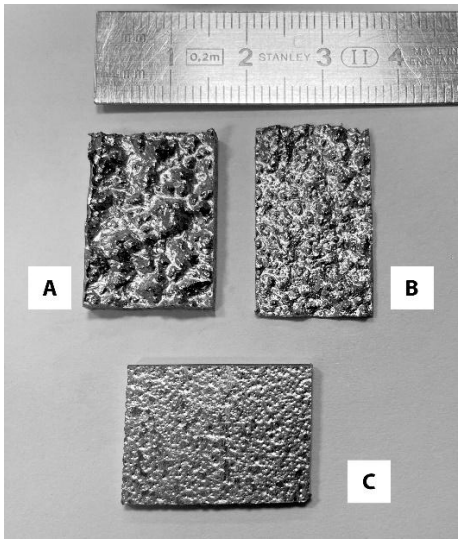


Figure 18 : Différents états de surface obtenus avec un même alliage d'aluminium Al-Si en modifiant les paramètres de refroidissement dans le moule.

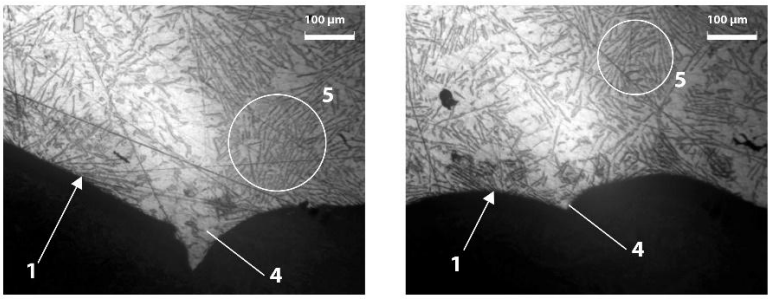


Figure 19 : Micrographies alliage Al-Si avec des reliefs liés aux cristaux dendritiques riches en aluminium.

Pour une nouvelle pièce à mouler, le service des Méthodes, qui réalise la conception des moules et des outillages de moulage dans les entreprises de fonderie, vérifie généralement avant toute chose que la géométrie de la pièce définie par le client concepteur est bien conforme vis-à-vis des contraintes de fabrication liées au procédé

de moulage prévu. Notamment, les méthodes vérifient la réalisation possible des épaisseurs dessinées sur le plan du concepteur ; c'est-à-dire si celles-ci restent bien supérieures à l'épaisseur minimale critique réalisable avec le procédé de moulage retenu. La connaissance des épaisseurs minimales possibles en fonderie est fournie par divers abaques publiés dans des ouvrages de référence qui sont usuellement utilisés par les fondeurs. Parmi les exemples d'abaques les plus courants, nous pouvons citer les abaques de Roinet relatifs aux procédés de moulage qui permettent la production de pièces avec les alliages d'aluminium (cf. figure 20).

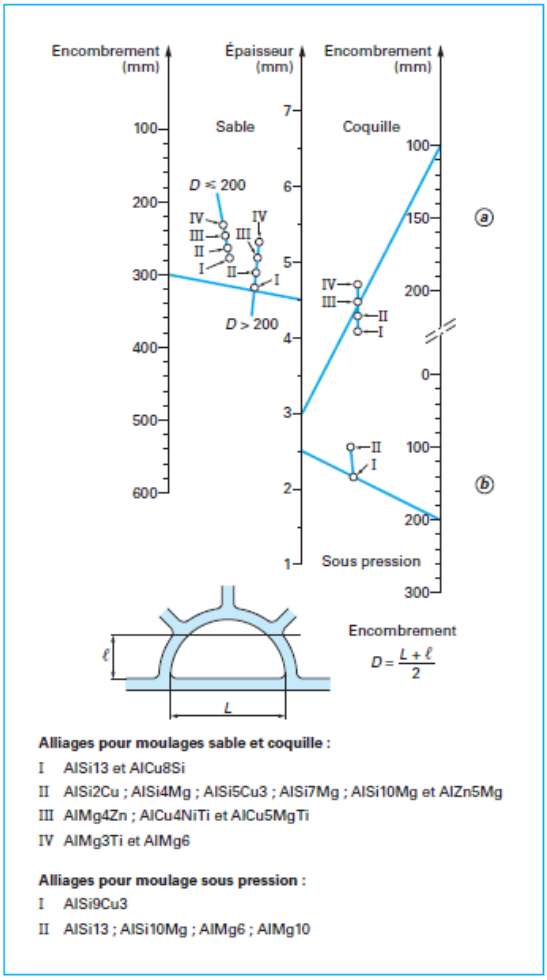


Figure 20 : Abaque de Roinet pour la détermination des épaisseurs minimales moulables avec les alliages d'aluminium [2].

A partir d'un démonstrateur financé par PSL valorisation, des tubes d'échangeur thermique ont été réalisés par procédé gravitaire de coulée vidangée avec un moule en acier et l'alliage AlSi12 au laboratoire de fonderie de l'ENSAM Lille (campagne d'essais par plans d'expériences). Ces pièces ont été coupées en différentes zones pour enrobage, polissage et observations à la loupe binoculaire et microscope optique (cf. figure 21).

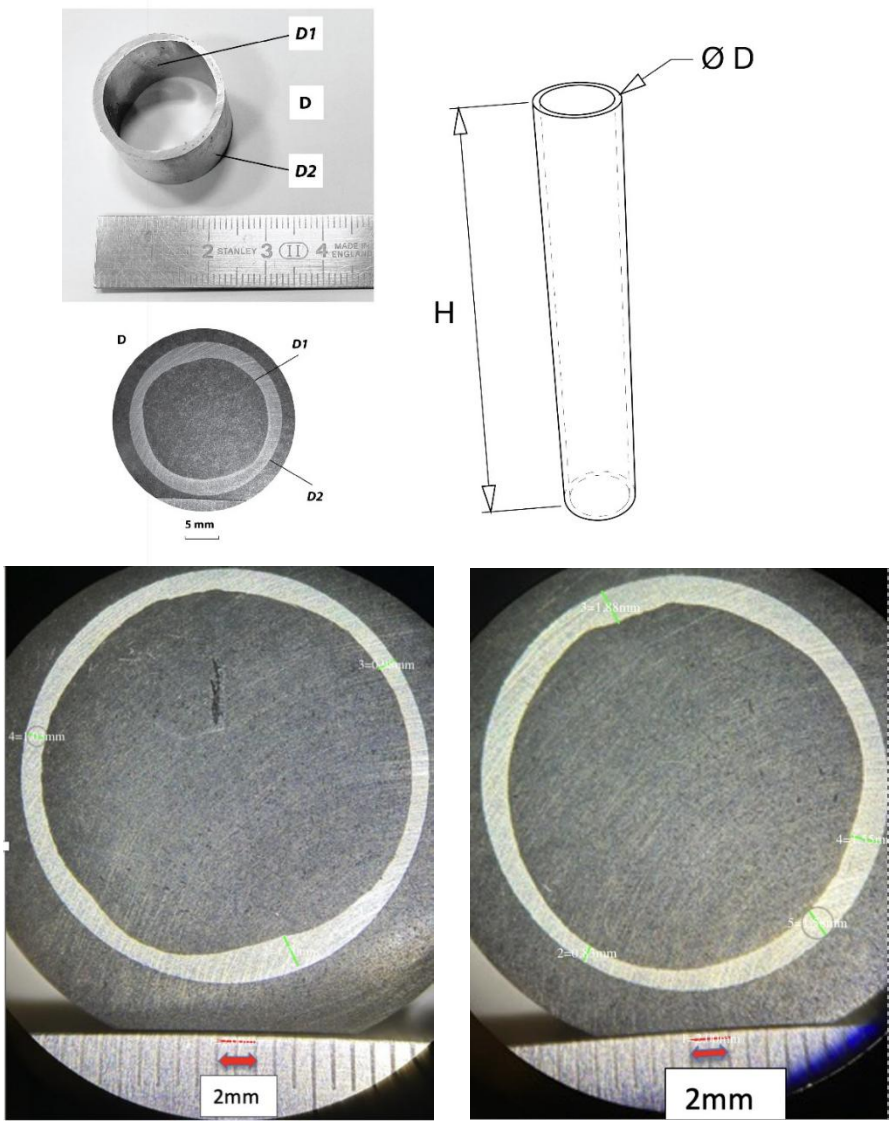


Figure 21 : Echantillonnage d'un tube d'échangeur obtenu par coulée vidangée avec alliage AlSi12 et moule en acier.

Avec des dimensions de diamètre extérieur D de 22 mm et une hauteur H de 358 mm, l'utilisation de l'abaque de Roinet nous donne une épaisseur minimale coulable de 3,9 mm en moulage coquille (pour l'encombrement (H + π.D)/2 = 213,6 mm). Or les premiers résultats expérimentaux obtenus donnent une épaisseur moyenne d'environ 1,35 mm qui est 2,8 fois (presque 3 fois) inférieure à la valeur minimale donnée par l'abaque de Roinet.

Initialement, le procédé de coulée vidangée a été développé afin de réussir à mouler des pièces creuses métalliques sans noyau moulant interne, et créer ainsi une technologie de rupture en fabrication. Si les résultats de cet objectif sont plutôt encourageants, nous remarquons de plus la possibilité de réaliser des pièces moulées avec des épaisseurs de paroi largement plus fines que celles obtenues avec les procédés conventionnels. Vis-à-vis de l'état de l'art en fonderie, cette caractéristique offre ainsi la possibilité de nouvelles typologies de pièces plus fines que celles obtenues par les procédés de moulage déjà existants. Toutefois, il reste nécessaire

de parfaitement maîtriser les paramètres de coulée et la conception des moules afin d'assurer la régularité des épaisseurs fines (cf. figure 22).

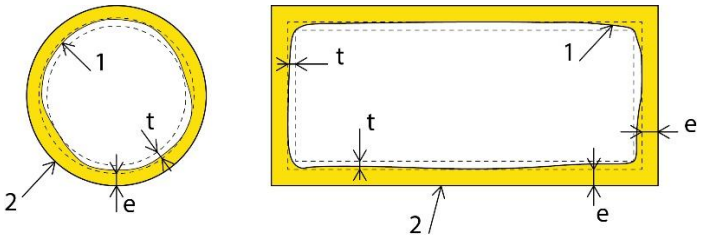


Figure 22 : En coulée vidangée, on cherchera à maîtriser l'épaisseur minimale e avec une variation t minimale.

Perspectives et pertinence des procédés avec coulée vidangée

Si la coulée vidangée permet l'obtention de pièces creuses sans noyau interne moulant, elle offre aussi la possibilité d'obtenir des produits de très faible épaisseur, voire d'épaisseur de paroi bien inférieure à celles obtenues avec les procédés conventionnels en moulage par gravité. Ce constat permet des économies de matière et l'allègement de certains produits.

Toutefois, une difficulté de la mise en œuvre du procédé réside dans la bonne gestion des épaisseurs moulées où plusieurs paramètres de fabrication sont très influents (épaisseurs et températures de la coquille, poteyages, joints thermiques par lame d'air (zones d'assemblages du moule), temps de maintien dans l'empreinte avant la vidange, écoulement de l'alliage pendant la coulée et la vidange).

La « mise au mille » reste extrêmement faible, avec peu, voire pas, de parachèvement. Les pièces fines moulées dans des outillages métalliques conduisent également à des temps de cycle très courts. L'absence de noyau moulant à l'intérieur des pièces simplifie les outillages de moulage, et de fait réduit les coûts ainsi que les déchets.

Lors d'emploi d'un moule métallique, celui-ci est entretenu chaud par les coulées successives. Dans certains dispositifs, le moule est placé au-dessus ou à proximité immédiate du four de maintien, ce qui permet un retour direct de l'alliage dans le four lors de la vidange (pas d'élément de transfert, d'où une limitation du refroidissement de l'alliage liquide).

Un gros intérêt est la fabrication de pièces creuses à géométrie complexe, par exemple la réalisation d'échangeurs thermiques avec utilisation judicieuse des surfaces intérieures cristallographiques (cf. figure 23 présentant un système refroidi par eau).



Figure 23 : Carter en alliage d'aluminium avec dispositif de refroidissement à eau réalisable par coulée vidangée (image J. Plazy – C. Guérin).

Il est possible de nervurer les surfaces extérieures afin de rigidifier les parois fines. Un dispositif refroidissant dans le moule peut également permettre d'épaissir localement la pièce. Une broche métallique moulante locale peut aussi être utilisée afin d'épaissir un palier sur la pièce, voire l'emploi d'un insert tubulaire noyé à la coulée (exemple pivot de fourche avant sur le cadre de vélo électrique présenté en figure 12).

En veille technologique permanente, le laboratoire de fonderie de l'ENSAM Lille et PSL/ENSADLab recherchent aujourd'hui des partenaires industriels pour conduire des études de faisabilité autour de produits, cela afin d'aider au développement de cette nouvelle technique de moulage. Cette démarche souligne une certaine volonté d'innovation dans nos chers métiers de la fonderie.



Figure 24 : Vasque artistique dont la partie supérieure est confectionnée par coulée vidangée gravitaire avec un moule en sable.

Philippe COSTES - Professeur de fonderie à l'ENSAM et l'ESFF
philippe.costes@ensam.eu //////
Christophe GUERIN - Designer (PhD) entrepreneur
cg@christophe-guerin.com //////

Bibliographie :

[1] : Larousse Encyclopédie - https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Centrifugation_dun_tuyau_en_fonte/1001442
[2] : Techniques de l'Ingénieur, M3638 V2, "Fonderie d'aluminium : défauts et conception des pièces", auteurs Michel GARAT et André LE NÉZET, figure 35 page 15.
Brevet PSL/ENSAD-ENSAM
Brevet Pechiney R. Portalier