

Fonderie en coquille : positionnement de la coulée

Cette ressource est issue d'une séance de travaux pratiques réalisée en Master 2 Formation à l'Enseignement Supérieur de la mention mécanique à l'ENS Paris-Saclay. L'objectif est d'étudier l'impact du positionnement du trou de coulée sur la qualité de la pièce moulée.

Procédé ancien, le moulage en coquille consiste à obtenir une pièce à partir d'un moule métallique, la coquille, constitué d'éléments assemblés dans lesquels une cavité ayant la forme extérieure de la pièce a été réalisée (figure 1). L'alliage liquide est versé dans l'empreinte du moule en coquille par l'orifice de coulée. Le remplissage de la coquille se fait sous la seule action du poids de l'alliage soit par coulée directe de haut en bas, dite en chute ou par gravité (cas de la pièce étudiée dans cette ressource) soit, suivant le principe des vases communicants, de bas en haut, dite en source.

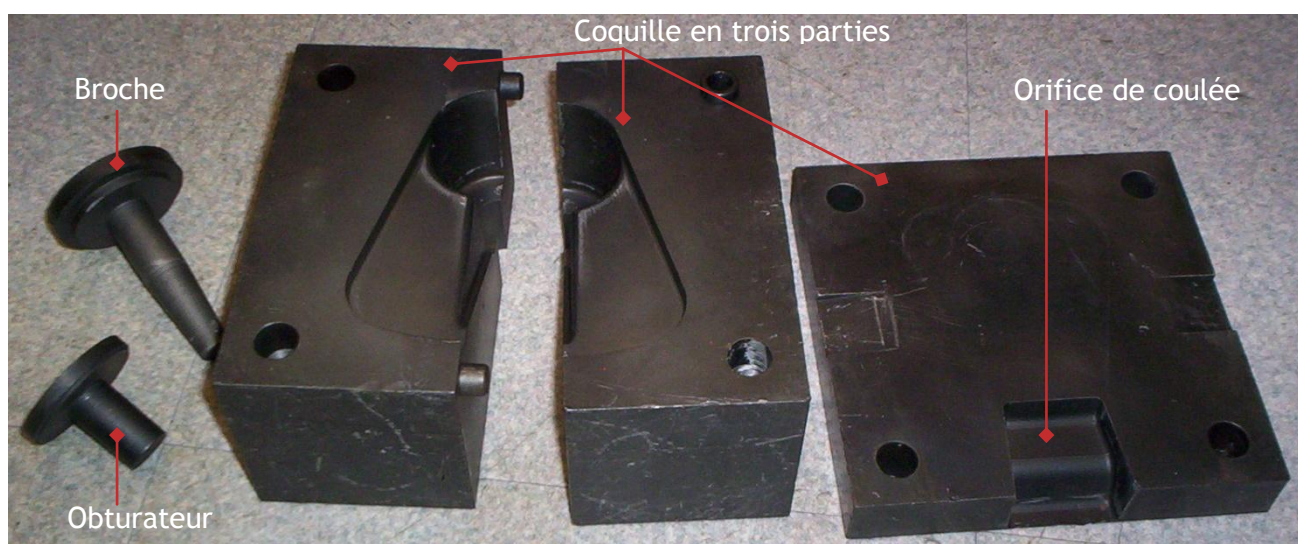


Figure 1 : Le moule en coquille étudié

Cette ressource introduit la recherche d'une solidification dirigée puis valide par l'exemple l'importance du choix du positionnement du trou de coulée. La ressource « *Le moulage en coquille : procédé de réalisation de pièces métalliques* » expose cette technique de moulage ; les règles de conception et les bonnes pratiques de ce procédé d'obtention sont présentées dans la ressource « *Le moulage en coquille par gravité : règles de base* ».

1 – Introduction

L'étude est menée sur le moulage d'un pied de mât dont le plan de définition est en « *Annexe : Plan du pied de mât* » en alliage d'aluminium (voir « *Annexe : Caractéristiques de l'AlSi13 (AS13)* ») à l'aide d'un moule en coquille en trois parties (figure 1).

La recherche d'une solidification dirigée nécessite d'ordonner l'ordre de solidification de la pièce par ses volumes élémentaires. Il faut pour cela modéliser la pièce en formes géométriques simples, connaître quelques règles et réaliser des calculs.

2 – Module géométrique

La pièce à obtenir est décomposée en volumes élémentaires de façon à obtenir des formes géométriques simples, en isolant les raccords. La pièce étudiée peut se modéliser en trois parties élémentaires (figure 2) : un cylindre et deux parallélépipèdes.

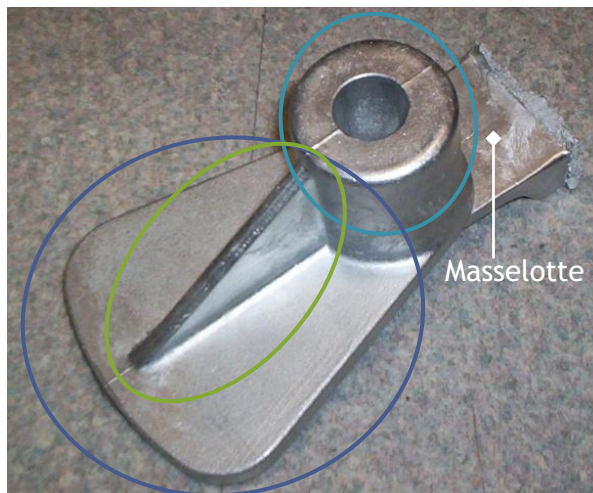
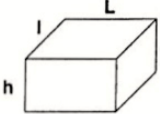
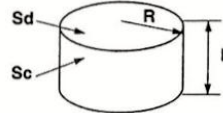
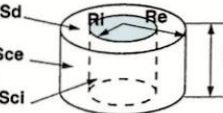
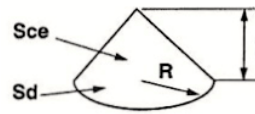
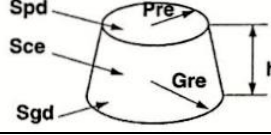
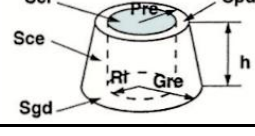


Figure 2 : La pièce et ses volumes élémentaires

Les volumes de chaque partie ainsi que leur surface en contact avec le moule et la broche (noyau) sont calculés.

	Surface	Volume
Parallélépipède 	$St = 2.(L.l+L.h+l.h)$	$V = L.l.h$
Cylindre 	$Sd = \pi.R^2$ $Sc = 2.\pi.R.h$ $St = 2.Sd+Sc$	$V = \pi.R^2.h$
Cylindre percé 	$Sd = \pi.(Re^2-Ri^2)$ $St = 2.Sd+Sce+Sci$	$V = \pi.(Re^2-Ri^2).h$
Cône 	$Sce = \pi.R.h$ $St = Sd+Sce$	$V = 1/3.\pi.R^2.h$
Cône tronqué 	$Sce = \pi.(Gre.Pre).h$ $St = Spd+Sgd+Sce$	$V = 1/3.\pi.(Gre^2+Gre.Pre+Pre^2).h$
Cône tronqué et percé 	$St = Spd+Sgd+Sce+Sci$	$V = V_{\text{cône tronqué}} - V_{\text{cylindre}}$ $V = 1/3.\pi.(Gre^2+Gre.Pre+Pre^2).h - \pi.Ri^2.h$

Le module géométrique M , de chaque volume est calculé ; il s'agit du rapport $M = V/S$ où V est le volume de la partie considérée et S sa surface de refroidissement c'est-à-dire en contact avec le moule ou son noyau. Les volumes sont ensuite classés par ordre décroissant de module géométrique afin d'estimer l'ordre de refroidissement.

3 – Temps de solidification

Les temps de solidification T_s s'exprime par la loi de Chvorinov¹ : $\sqrt{T_s} = K.M$

Avec M , le module géométrique, $M= V/S$, V est le volume de la partie considérée et S sa surface de refroidissement c'est-à-dire en contact avec le moule ou son noyau.

4 – Les règles

4.1 - Règles des modules de refroidissement

Une masselotte doit rester liquide plus longtemps que la partie de la pièce qu'elle est chargée d'alimenter. Le volume de la masselotte répond donc à l'inéquation :

$$\text{Module masselotte} \geq K_1 \cdot \text{module partie à alimenter} \text{ avec } K_1 = 1,4 \text{ en coquille}$$

4.2 Règle des retraits

Une masselotte doit pouvoir compenser en alliage liquide la contraction volumique de la pièce ou partie de pièce durant la solidification. Le volume de la masselotte répond donc à l'inéquation :

$$\text{Module masselotte} \geq K_2 \cdot \text{module partie à alimenter} \text{ avec } K_2 = 0,5 \text{ en coquille}$$

5 – Préparation du moule

Le moule nettoyé est préchauffé à environ 200°C. Le préchauffage est réalisé à l'aide de brûleurs à gaz (figure 3), la température est vérifiée par une sonde pyrométrique.



Figure 3 : Préchauffage du moule

Le poteyage (voir paragraphe 6 de la ressource « *Le moulage en coquille : procédé de réalisation de pièces métalliques* ») est ensuite appliqué sur les surfaces moulantes en évitant les plans de joint et les guidages (figure 4). Le poteyage remplit quatre rôles : protection de la coquille, ajustement du refroidissement, amélioration de l'état de surface, et agent de démoulage. Le moule est ensuite remis à préchauffer avant que ne soit coulé l'alliage liquide (environ 700°C).

¹ Du nom de Nikolai Chvorinov (1903-1987), ingénieur Tchèque



Figure 4 : Application du poteyage à l'aide d'un pulvérisateur à air comprimé

6 – La coulée

Le moule est posé à proximité du four contenant l'alliage liquide. La température (environ 700°C) nécessite un équipement de protection : casque avec masque, tablier, guêtres et moufles (figure 5). La coulée est faite rapidement en un seul geste, il est nécessaire de prélever la bonne quantité à l'aide de la louche.

Des poignées sont visées pour la manipulation, le moule est assemblé et maintenu par un serre-joint pour être démonté rapidement. En effet l'objectif est de réaliser le moulage dans cinq configurations différentes de l'orifice de remplissage et/ou de la présence ou non d'une broche (figure 6).



Figure 5 : Assemblage de la coquille

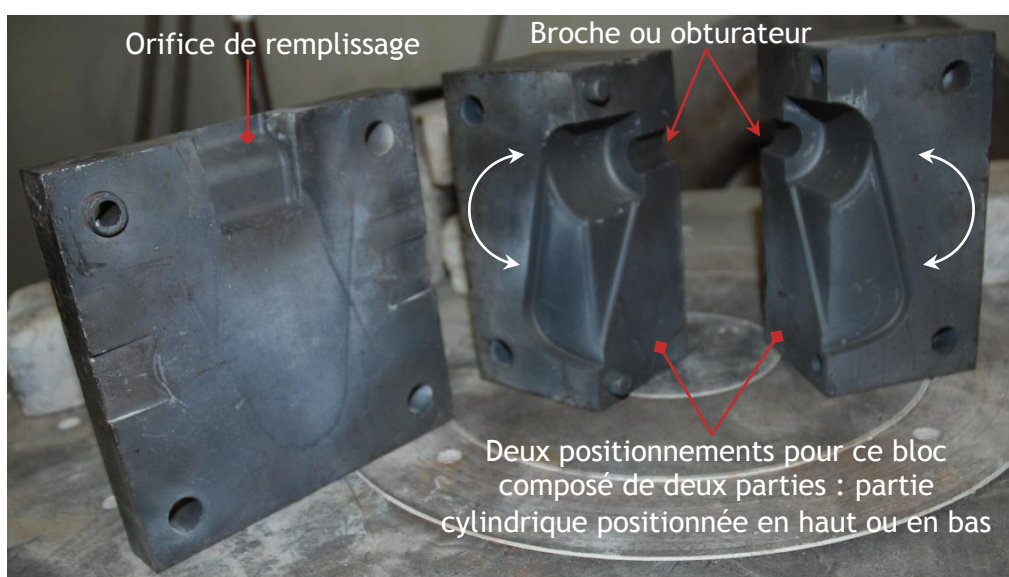


Figure 6 : Les paramètres des différentes coulées

6.1 - Masselotte sur le cylindre avec broche

La partie cylindrique a le module géométrique le plus important, en effet son volume est grand devant sa surface en contact. Le moule en coquille est donc positionné cylindre vers le haut comme sur la figure 6. Pour cette première coulée, une broche est insérée (figure 1) afin de mouler un cylindre « percé », permettant par là même de limiter le volume coulé.



Figure 7 : Coulée configuration « masselotte sur le cylindre et avec broche »



Figure 8 : Ouverture du moule

6.2 - Masselotte sur l'éventail avec broche

La broche est gardée dans la partie cylindrique, la coquille est retournée de 180°. L'orifice de remplissage se trouve sur la partie en éventail, la partie cylindrique est donc en bas du moule.



Figure 9 : Coulée configuration « masselotte sur l'éventail et avec broche »



Figure 10 : Ouverture du moule

6.3 - Masselotte sur l'éventail sans broche

Le moule en coquille est gardé cylindre vers le bas, un obturateur est positionné en lieu et place de la broche. Le cylindre est donc moulé plein.



Figure 11 : Coulée configuration « masselotte sur l'éventail sans broche »



Figure 12 : Ouverture du moule

6.4 - Masselotte sur le cylindre sans broche

Le moule en coquille est positionné cylindre vers le haut, un obturateur est positionné en lieu et place de la broche. Le cylindre est encore moulé plein.



Figure 13 : Coulée configuration « masselotte sur le cylindre sans broche »



Figure 14 : Ouverture du moule

6.5 - Coulée dans l'axe du cylindre

Le moule est positionné horizontalement, l'ouverture nécessaire à l'insertion de la broche est utilisée comme orifice de coulée.

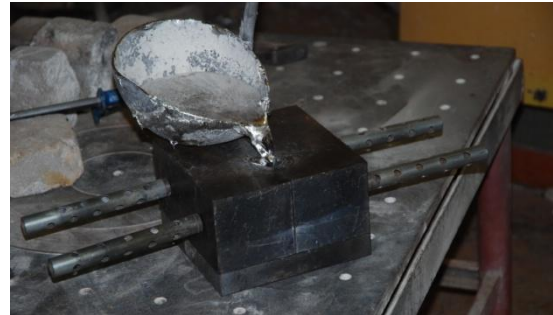
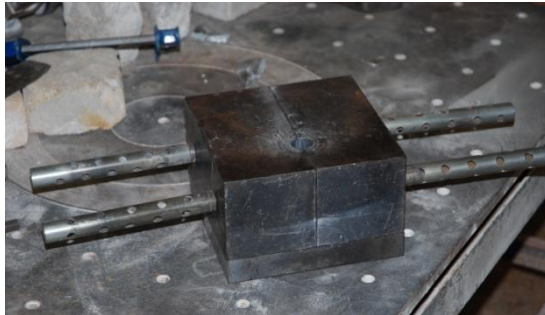


Figure 15 : Coulée dans l'axe du cylindre



Figure 16 : Ouverture du moule

7 – Conclusion

L'objectif du masselottage est d'assurer l'alimentation de la pièce en métal fondu après l'arrêt de la coulée, lors de sa solidification. En effet la diminution du volume du métal en se solidifiant pourrait générer des pièces incomplètes (retassures) si le système d'alimentation n'est pas efficace. Il consiste donc en des réserves de métal fondu, généralement disposées au dessus de la pièce comme c'est le cas des cinq essais réalisées. Lors de ce moulage en coquille par gravité, le système de remplissage a fait office de système d'alimentation.

La décomposition en différents volumes effectuée lors de la partie calculatoire (paragraphe 2) permet de définir l'ordre du refroidissement et une stratégie de coulée optimale qui est bien validée par l'expérimentation.

La masselotte est donc logiquement la mieux placée au voisinage de la partie la plus massique qui refroidit le plus lentement, pour la pièce de cet exemple il s'agit de la partie cylindrique. La cinquième configuration (figure 17e) permet d'alimenter directement cette partie cylindrique ; elle serait donc optimale en considérant la seule qualité du moulage si elle n'avait l'inconvénient de nécessiter d'importants usinages post-moulage.

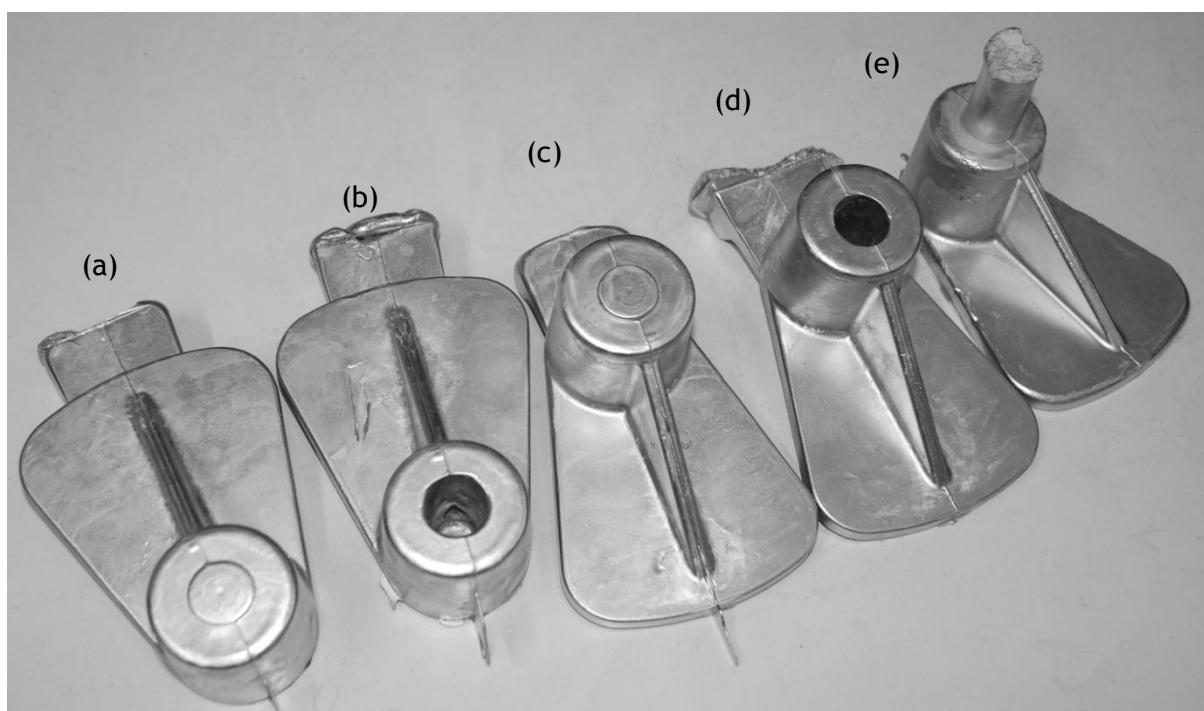


Figure 17 : Les cinq pièces moulées

La première configuration coulée à savoir avec broche et partie cylindrique en haut directement alimentée est la bonne configuration (figure 17d). La pièce obtenue risque le moins de défaut, et la partie cylindrique est percée limitant ainsi les usinages post-moulage. On notera que pour une qualité optimale, il serait préférable d'augmenter le volume de la masselotte.

La configuration cylindre en haut sans broche (figure 17c) permet une bonne qualité, on retrouve cependant l'inconvénient d'un usinage important.

Les deux dernières configurations (figure 17a et b) alimentent une partie peu volumineuse de la pièce. Assez mince, cette forme en éventail refroidit rapidement ne permettant pas d'alimenter correctement la partie massive de la pièce. Ce problème est accentué lorsque la broche est absente (figure 17a) puisque le volume en est encore augmenté.

Les tensions internes à la pièce dues aux différentes phases du matériau ainsi qu'au glissement de l'alliage dans le moule peuvent conduire à l'apparition de criques (figure 18), ruptures partielles qui ont lieu à de hautes températures en présence de petite quantité d'alliage encore liquide, sous l'effet d'efforts internes résultants de l'inégalité de retrait. La ressource-vidéo « *Tomographie d'une pièce de fonderie avec crique* » montre ce cas dans la configuration de moulage sans broche et par la partie mince de la pièce (figure 17a). Cette configuration peut aussi provoquer des retassures, la contraction du métal au cours du refroidissement peut créer des cavités au centre de la matière (figure 19).

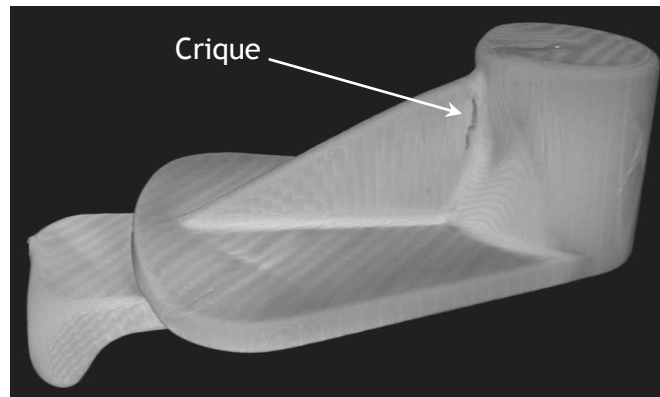


Figure 18 : Exemple de crique, configuration de coulée sans broche et par la partie mince, extrait de la ressource-vidéo « *Tomographie d'une pièce de fonderie avec crique* »

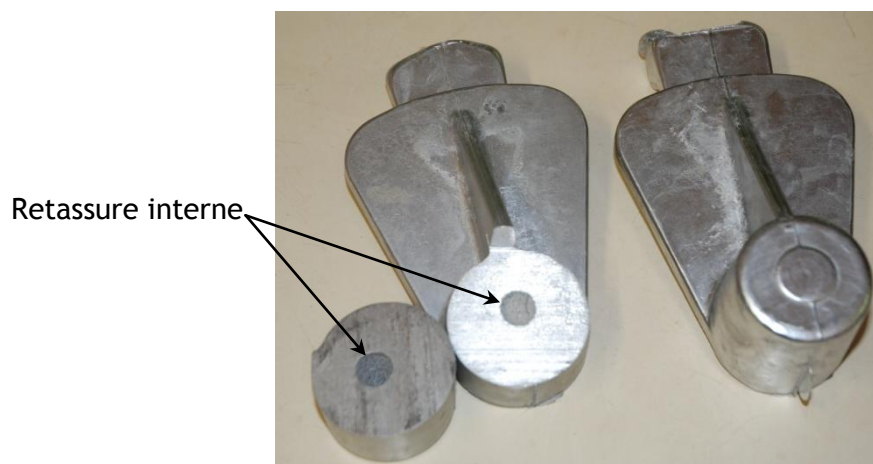


Figure 19 : Exemple d'une retassure interne dans la partie massive de la pièce, configuration de coulée sans broche et par la partie mince