



LIVRE BLANC FORMLABS :

La fabrication de pièces métalliques avec l'impression 3D

Contenus

| | |
|--|----|
| Introduction | 3 |
| Bases de moulage | 4 |
| Fonte à modèle perdu directe | 6 |
| Création de modèles avec la Form 2 | 7 |
| Conception de supports internes pour une impression et un brûlage réussis | 8 |
| Préparation de l'impression du modèle | 9 |
| Préparation du modèle imprimé pour le moulage. | 10 |
| Ajout des carottes de coulée et des événements dans un modèle directement imprimé | 10 |
| Création de la coque en céramique | 11 |
| Exemple de courbe de cuisson | 12 |
| Fonte à modèle perdu indirecte | 13 |
| Outils et dispositifs d'assemblage imprimés en 3D pour les procédés de moulage | 15 |
| Moulage en sable | 16 |
| Conclusion | 18 |

Introduction

Tandis que les matières plastiques représentent un gros pourcentage des pièces dans les produits de notre vie quotidienne, de nombreuses applications exigent toujours la robustesse et la durabilité du métal.

Le forgeage à froid, le fraisage, le tournage et le filage sont des procédés de travail du métal éprouvés, mais ils sont tous plus coûteux et moins agiles comparés aux possibilités de développement produit qu'offrent les pièces en plastique.

L'impression 3D du métal a été vantée comme un moyen rapide pour créer des pièces proches des dimensions finales dans des matériaux durables tels que le titane. Cependant, le coût élevé des équipements, l'absolue nécessité de faire appel à un personnel qualifié spécifiquement formé et le manque de diversité dans les alliages disponibles ont freiné l'utilisation de cette technologie pour la limiter à des applications excentriques et de très haut standing.

Les ingénieurs et les concepteurs peuvent profiter de la vitesse et de la flexibilité de l'impression 3D sans avoir à recourir à des imprimantes à métaux grâce aux procédés de moulage de métaux. Pour les applications dont les pièces nécessitent des détails fins ou des géométries complexes, le moulage reste un processus de fabrication rentable et très efficace : il est utilisé pour la fabrication de composants critiques en aérospace, en automobile et en médical.

Les imprimantes 3D stéréolithographiques (SLA) sont avant tout conçues comme des outils de fabrication de pièces en plastique. Cela dit, leur grande précision et leur vaste éventail de matériaux conviennent très bien pour les processus de moulage pour produire des pièces métalliques à moindre coût, avec une plus grande liberté de créativité et avec des délais plus courts que les méthodes traditionnelles.

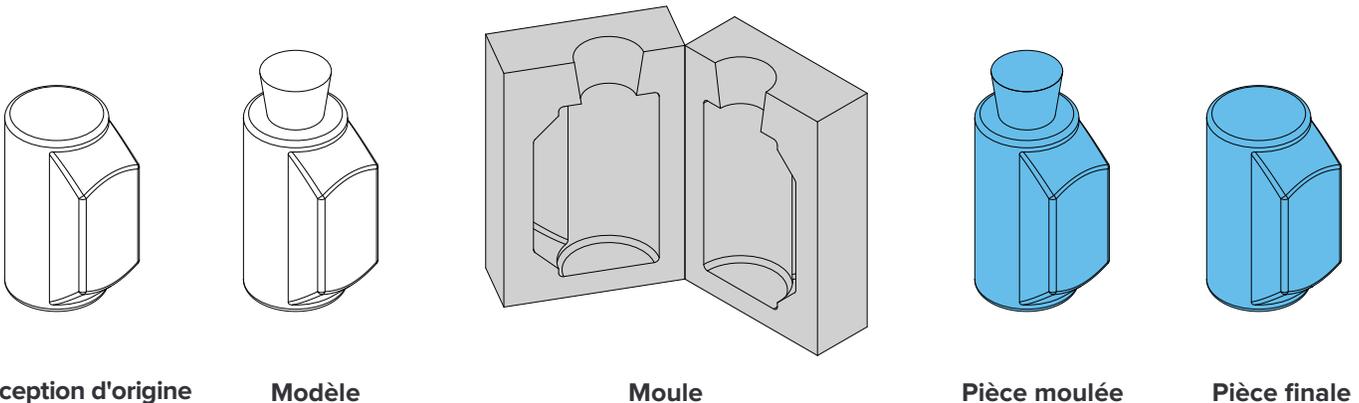
Ce livre blanc indique comment fabriquer des pièces métalliques par moulage en sable et par moulage à modèle perdu grâce aux imprimantes 3D et aux résines de Formlabs.

Bases de moulage

Le moulage de métal remonte au moins à 3200 av. J.-C. Après de nombreux cycles d'innovation, il est devenu le processus fiable et modernisé que l'on connaît aujourd'hui. Actuellement, les processus industriels de moulage de métal sont utilisés pour fabriquer d'innombrables produits, des implants de genou aux des pièces de tracteurs.

Les différentes techniques de base pour la fabrication de pièces métalliques moulées ont quelques étapes en commun :

1. Un fabricant crée un modèle représentant la pièce, soit pour créer une empreinte dans un matériau comme le sable, soit à laisser brûler ou fondre à l'intérieur du moule.
2. Dans ces deux cas, il reste une cavité de la forme du modèle dans laquelle sera versé du métal en fusion.
3. Une fois le métal en fusion refroidi, le moule est soit ouvert, soit cassé pour récupérer la pièce coulée.
4. Les pièces coulées conservent des traces du processus là où se trouvaient les conduits d'aération, les passages et les conduits d'acheminement destinés à diriger les gaz et le métal en fusion durant la coulée. Pour la finition des pièces coulées, un employé de la fonderie enlève le matériau excédentaire puis lime, meule, usine ou sable les pièces pour obtenir la géométrie finale et répondre aux exigences de surface. Dans certains cas, les pièces coulées subissent également un traitement thermique.



Quel que soit le processus de moulage, deux formes de base doivent être fabriqués : le modèle et un moule de quelque type que ce soit. Le modèle est essentiellement une version légèrement modifiée de la pièce à produire.

La conception du modèle diffère de la géométrie de la pièce finale par certains aspects :

- Les modèles sont agrandis pour compenser le rétrécissement qui a lieu avec la coulée.
- Les modèles contiennent souvent des éléments pertinents pour le processus de moulage et qui ne se retrouveront pas dans la pièce finie (p. ex. les passages permettant un débit contrôlé du métal en fusion, les conduits d'aération pour l'échappement des gaz, etc.)

- Il se peut que certains éléments des modèles soient surdimensionnés ou comblés afin de rendre possibles des opérations secondaires visant à produire des éléments à tolérance très spécifique (perçage, taraudage, etc.)

Les modèles sont généralement fabriqués en bois, en mousse, en plastique ou en cire. Parfois, le design du modèle incorpore des éléments liés au processus de moulage comme des passages permettant au métal en fusion de passer.

Un moule comprend l'empreinte du modèle ainsi que les carottes de coulée, les passages, les conduits d'aération, les masselottes et d'autres éléments visant à contrôler l'écoulement du métal et l'échappement des gaz durant la coulée.

Les moules peuvent être en matériaux divers (céramique, graphite, plâtre, sable) et doivent pouvoir résister aux hautes températures et aux contraintes mécaniques du processus de moulage.

Fonte à modèle perdu directe

Le processus de fonte à modèle perdu passe directement de la création du modèle à son enrobage à l'aide du matériau réfractaire. Étant donné que la méthode consistant à injecter de la cire pour créer un modèle requiert plusieurs étapes, elle est considérée comme indirecte.

La fonte à modèle perdu directe est la meilleure solution pour les petites séries de pièces ou pour le premier essai d'un concept de pièce, car chaque pièce imprimée nécessitera quelques étapes de finition. La fonte à modèle perdu directe est également un bon choix pour les pièces de grande envergure ou les pièces présentant des sections transversales épaisses qui pourraient être plus difficiles à mouler correctement dans de la cire en raison de la déformation et du rétrécissement.

La fonte à modèle perdu directe est pertinente pour la fabrication de pièces comportant des géométries trop complexes pour être moulées ou pour les pièces présentant des contre-dépouilles importantes et de fins détails de texture de surface, pour lesquelles le procédé de moulage est accompagné de coûts d'outillage très élevés.

Traditionnellement, les modèles de fonte à modèle perdu directe sont sculptés à la main ou usinés si la pièce est une pièce unique ou s'il n'est prévu d'en produire que quelques-unes.

Avec les avancées de l'impression 3D, les ingénieurs ont commencé à expérimenter l'impression directe de modèles pour réussir à obtenir des cycles de production plus courts et un choix de géométries plus vaste que ce que permettent les contraintes de fabrication des processus de moulage.

Pièces moulées à partir de modèles stéréolithographiques imprimés sur une Form 2 en Clear Resin.



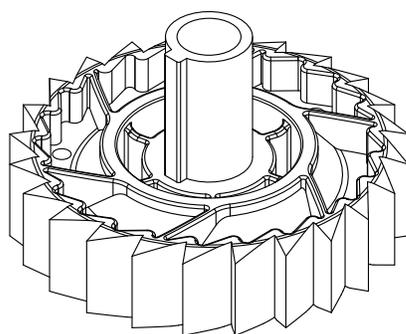
Création de modèles avec la Form 2

On distingue deux méthodes principales pour l'impression de modèles destinés à la fonte à modèle perdu directe à l'aide de résines Formlabs. La méthode à choisir pour une application dépend de la taille de la pièce, de sa complexité et de sa géométrie.

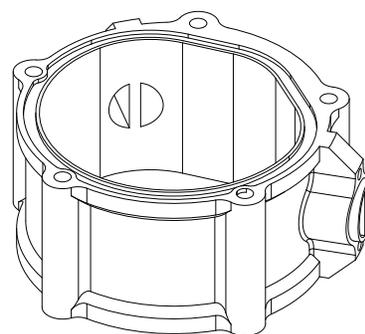
Il est préférable d'imprimer les pièces de petite taille et aux parois minces en tant que modèles solides en Castable Wax en utilisant un moule à matériau réfractaire de type moufle. Les règles à suivre pour le processus sont essentiellement les mêmes que pour le [moulage de bijoux](#).

En revanche, pour des pièces de plus grande taille présentant des sections transversales importantes, il convient plutôt de les imprimer comme coques à parois minces légèrement soutenues et de les utiliser dans un processus de moulage avec une coque en céramique.

L'expansion thermique de modèles solides plus grands et imprimés en résine par SLA peut entraîner des fissures dans le matériau d'enrobage, la céramique. Pour réussir à couler de grands modèles imprimés, nous recommandons d'envelopper le modèle pour obtenir une épaisseur de paroi externe de 0,5 à 0,8 mm. D'une manière générale, les parois plus minces fonctionnent mieux mais il se peut qu'il soit nécessaire d'augmenter l'épaisseur pour obtenir une rigidité appropriée, surtout pour des pièces de grande taille.



*Petit entraînement à cliques
(volume : 5,4 cm cube)*



*Boîtier de pompe d'un diamètre de 4 pouces
(volume : 84,2 cm cube)*

Une pièce creuse aura souvent besoin de supports internes pour une impression réussie, c'est-à-dire présentant les dimensions exactes prévues. Ces structures de support internes ont tout intérêt à être aussi peu nombreuses que possible de sorte à facilement céder durant le brûlage pour éviter de piéger de la résine non polymérisée.

Modèles imprimés par SLA par la Form 2 en Clear Resin avec supports internes.



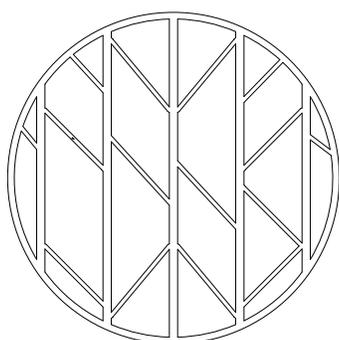
Lavez soigneusement le modèle imprimé à l'alcool isopropylique conformément aux exigences du matériau et laissez-le sécher entièrement avant de procéder au post-traitement final si nécessaire, voir les [exigences du matériau](#). La résine non polymérisée peut causer des problèmes lors du brûlage, faites donc très attention au nettoyage pour vous assurer de l'absence de toute petite poche de matériau non polymérisé. La Clear Resin de Formlabs est souvent privilégiée pour cette application car il est possible de voir à travers le modèle imprimé et donc de vérifier que la géométrie interne est complètement propre et exempte de tout reste de résine non polymérisée.

Conception de supports internes pour une impression et un brûlage réussis

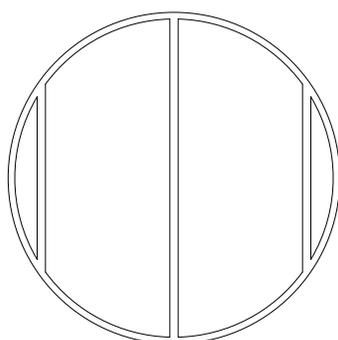
L'emplacement et l'orientation des structures de support d'une pièce imprimée en 3D sont des considérations très importantes lors de la phase de conception pour garantir un brûlage et un moulage réussis des modèles imprimés.

Les modèles ont besoin de supports internes **(A)** pour réussir l'impression et également pour fournir une rigidité et une robustesse suffisantes afin de résister au poids du matériau réfractaire lors de la formation de la coque.

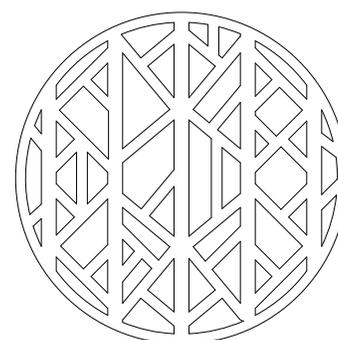
Si les supports sont trop faibles **(B)**, le modèle se déformera et se brisera avant que la coque en céramique ait atteint 100 % de sa solidité. Avec des supports trop nombreux **(C)**, le modèle ne sera pas aussi prompt à céder et risquera de fissurer la coque en céramique durant le décirage/brûlage.



(A)



(B)

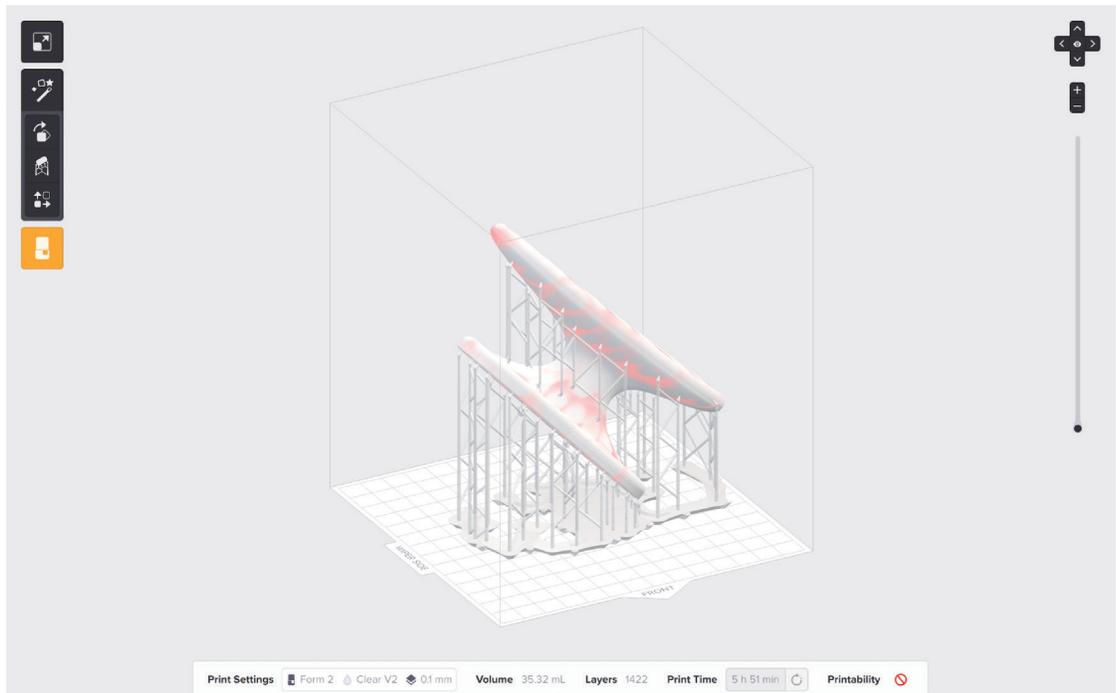


(C)

PreForm, le logiciel de Formlabs pour la préparation des impressions, génère des structures de support internes simples. Pour des structures réticulaires plus complexes, il existe des logiciels courants tels que nTopology, MeshMixer et Materialise TetraShell.

Incluez un petit trou d'évacuation dans la coque externe du modèle pour évacuer toute résine liquide non polymérisée qui pourrait rester dans la pièce après impression.

Préparation de l'impression du modèle



Préparation d'un modèle de type coque avec PreForm. La vue ci dessus montre le mur extérieur fin de la géométrie de la pièce, avec des supports épars générés par PreForm.

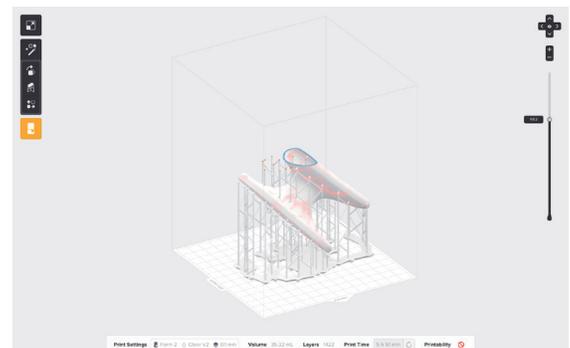
Supports internes générés par un autre programme :

Une fois que le modèle a été enrobé et que les structures de support internes sont générées, enregistrez le fichier au format STL ou OBJ pour la compatibilité avec PreForm. Ouvrez le fichier dans PreForm et utilisez les outils d'orientation et de configuration pour positionner les pièces avant d'ajouter les supports.

Génération de supports internes dans PreForm :

Pour utiliser des structures de support internes générées par PreForm, commencez par un STL ou OBJ de votre modèle déjà enrobé avec l'épaisseur de parois externes de votre choix.

Orientez la pièce en tenant compte de l'influence de tout support généré sur la désintégration du modèle durant le décapage/brûlage.



À partir de là, vous pouvez générer les structures de support de votre modèle soit manuellement, soit automatiquement. Même si vous utilisez la fonction de génération automatique de supports de PreForm, les supports générés peuvent être modifiés et vous pouvez au besoin ajouter ou supprimer des supports spécifiques.

Préparation du modèle imprimé pour le moulage

Limez ou sablez les impressions pour éliminer tout résidu des supports externes et créer des surfaces planes et lisses. La qualité de surface de la pièce finale dépend beaucoup de la surface du modèle. Dans certains cas, vous pouvez appliquer un revêtement, une fine couche de cire par exemple, aux modèles imprimés pour améliorer l'adhérence de la barbotine.

Ajout des carottes de coulée et des événements dans un modèle directement imprimé

Les modèles imprimés sont souvent rattachés par des passerelles de cire au reste de l'arbre, une matrice de pièces se rejoignant en une colonne centrale et généralement faite de cire.

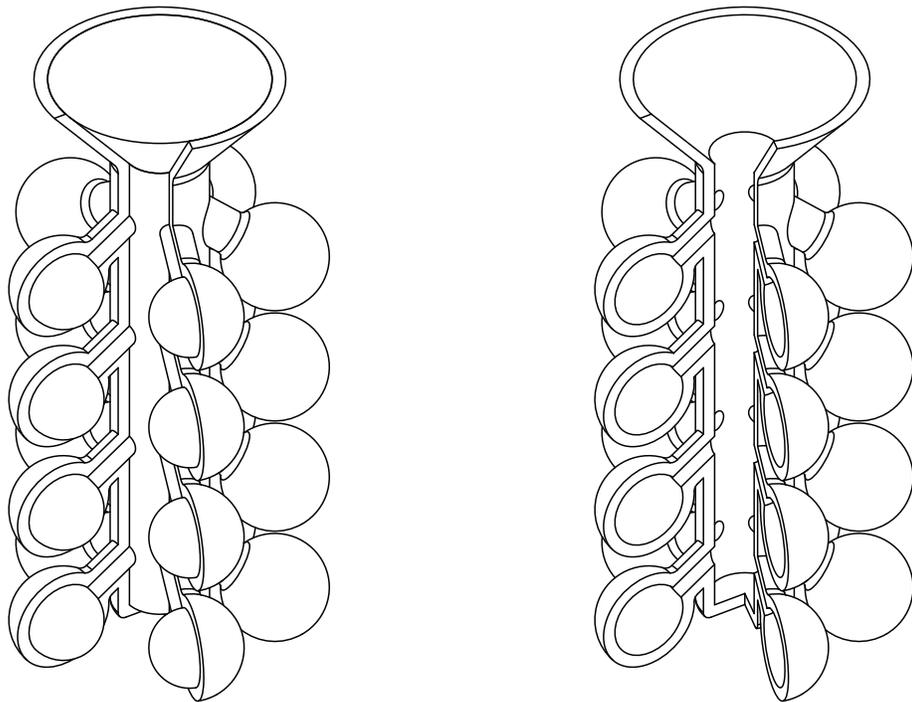
Durant le décirage ou le brûlage, la colonne centrale fond, entraînant avec elle le reste de la cire présente. Elle fait alors office de canal de coulée primaire pour le métal en fusion lors de la coulée.

Selon votre procédé de fonte et le design du modèle, il peut être nécessaire de prévoir des voies d'évacuation pour permettre aux résidus de modèles dégradés de sortir du moule.

L'application d'air comprimé ou d'eau dans le moule vide contribue à éliminer tout résidu de cendre issu du brûlage ou du décirage.

À cette étape, il est important de réfléchir à l'orientation du modèle par rapport au trajet de coulée du matériau. Le métal en fusion doit pouvoir circuler facilement et avec le moins de turbulences possible pendant qu'il remplit la cavité du moule.

Orientez les modèles de sorte que le métal puisse couler des sections épaisses des pièces aux sections fines et ajoutez des événements aux zones risquant de piéger de l'air durant la coulée. Les exigences en matière d'évacuation de l'air varient selon le métal, les matériaux du moule et le processus de coulée utilisé.



*Gauche : Un arbre de pièces avec une coupe de la coque montre la géométrie du motif ;
Droite : Une coupe avec uniquement la coque en céramique, représentant le matériau du modèle après qu'il ait été brûlé.*

Création de la coque en céramique



Coque en céramique après le brûlage des modèles imprimés par SLA en Clear Resin.

Une fois que les modèles, les événements, les conduits d'acheminement et les passages sont rattachés à l'arbre, plongez l'arbre dans une barbotine pour le recouvrir d'un matériau réfractaire et donc obtenir l'épaisseur voulue. Pour les modèles imprimés par SLA, utilisez une coque légèrement plus épaisse que pour les modèles en cire traditionnels pour réduire les risques de fissures durant le brûlage/le décirage.

Une fois le modèle enduit de matériau réfractaire sur une épaisseur appropriée, le modèle et tous les éléments en cire comme les carottes de coulée ou les conduits d'acheminement doivent être brûlés. Prévoyez des événements à travers la coque de céramique dans les modèles SLA creux pour assurer une désintégration et une combustion totales des modèles.

Marquez les emplacements des événements, meulez ces surfaces pour atteindre le modèle puis ponctionnez les parois des modèles à l'aide d'un outil ou fil métallique chaud. Vous pouvez aussi percer les modèles pour créer des orifices d'aération.

Si la surface du modèle n'est pas ponctionnée, les gaz situés à l'intérieur du modèle risquent de se dilater excessivement et de fissurer la coque de céramique.

Une fois le modèle brûlé, les orifices créés pour l'aération durant le brûlage doivent être comblés. Cela consiste dans un premier temps à fermer la coque de céramique à l'aide d'une petite quantité de cire puis d'appliquer une pâte de colmatage au-dessus de la cire pour renforcer la coque de céramique. Ces étapes successives empêchent toute pénétration du

matériau de colmatage dans la cavité du moule où il risquerait de causer des inclusions ou autres défauts sur les pièces coulées.

Exemple de courbe de cuisson

La courbe de cuisson optimale pour les moyens ou grands modèles directement imprimés soumis à un procédé de moulage en céramique varie selon votre équipement, le matériau du moule et toute autre variable.

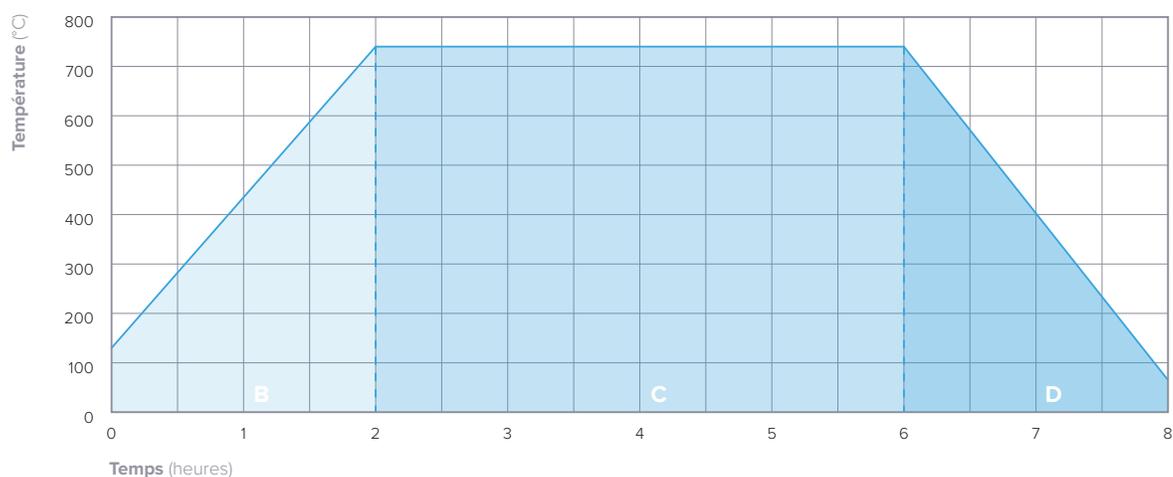
Voici un exemple de courbe de décarage/cuisson utilisée par un client de Formlabs, Artcast, pour produire le taquet de bateau et le bouton de porte illustrés dans le présent Livre Blanc :

Décarage vapeur

| PHASE | DURÉE | PSI |
|--------|--------|---------|
| Vapeur | 30 min | 80 – 90 |

Brûlage après décarage

| | PHASE | DURÉE | TEMPÉRATURE (°C) | TEMPÉRATURE (°F) |
|---|-----------------|-------|------------------|------------------|
| A | Début | 0 h | 130 °C | 266 °F |
| B | Montée | 2 h | jusqu'à 740 °C | 1364 °F |
| C | Maintien | 4 h | 740 °C | 1364 °F |
| D | Refroidissement | | 65 °C | 149 °F |



Fonte à modèle perdu indirecte

Le processus de fabrication de modèles à partir de moules ou d'outils est appelé fonte à modèle perdu indirecte car en plus des moules de coulée finaux, il requiert la création de moules pour obtenir les modèles.

Les moules rigides pour la cire (souvent appelés outils) sont communément fabriqués en aluminium ou en acier d'usinage. La fabrication de moules métalliques usinés coûte des milliers de dollars et nécessite plusieurs semaines d'usinage et de polissage avant de pouvoir procéder aux premiers essais et évaluer les modèles dans un processus de coulage. **En imprimant directement l'outillage, les ingénieurs et concepteurs peuvent réduire le temps séparant la conception et les premiers essais, passant de plusieurs semaines à quelques jours.**

Les moules de fabrication de modèles en cire peuvent être imprimés avec de la High Temp Resin. Pour une finition de surface optimale des modèles, traitez les surfaces internes du moule en les sablant et en les polissant pour un aspect lisse, ou par projection de billes si vous souhaitez un aspect mat uniforme.



Moule imprimé en Clear Resin pour injection de cire.

Pour vous assurer que les pièces coulées finales auront les bonnes dimensions, compensez le rétrécissement en produisant un moule imprimé plus grand. Le rétrécissement exact de la cire et le processus de coulage sont spécifiés dans les caractéristiques techniques du fournisseur.

Tandis que les pièces moulées doivent se plier à des règles de conception pour pouvoir être moulées (p. ex. aucune contre-dépouille, ébauche préférable, etc.), vous pouvez réaliser des modèles d'une plus grande complexité en utilisant des outils d'assemblage pour former une structure homogène à partir de plusieurs composants.

Outils et dispositifs d'assemblage imprimés en 3D pour les procédés de moulage

High Temp Resin de Formlabs est capable de résister à des températures élevées. Elle convient donc bien pour les outils de moulage à modèle perdu. Vous pouvez utiliser la High Temp Resin pour produire des moules pour l'injection de cires, des dispositifs d'assemblage et des outils sur mesure pour travailler la cire.

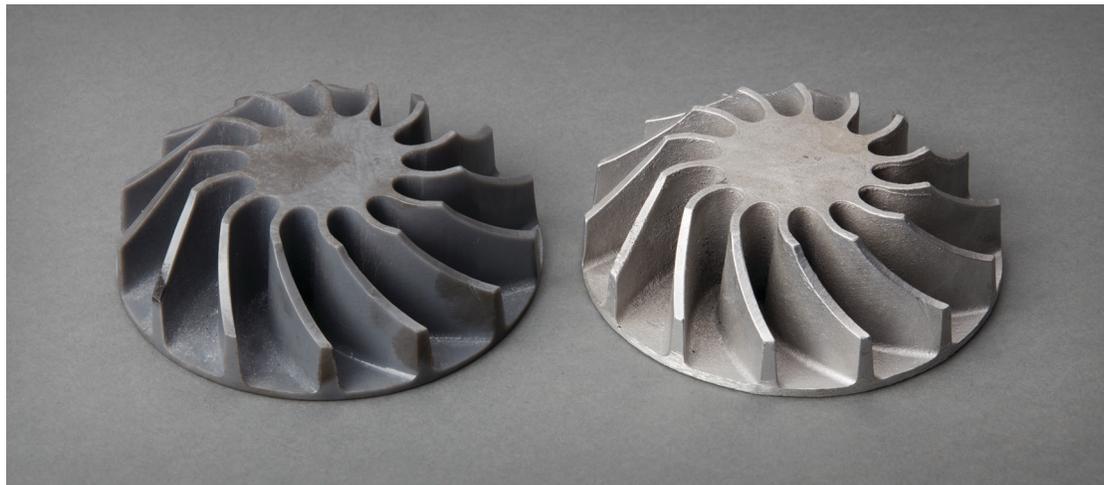
Si les cycles de production des moules sont courts, les pièces en cire fraîchement moulées peuvent être encore souples et enclines à se déformer. Vous pouvez transférer les pièces du moule « chaud » activement utilisé pour l'injection à un moule froid agissant comme porte-pièces : les pièces sont entièrement soutenues durant le refroidissement.

High Temp Resin est également utile dans la production de modèles de cire pour créer des porte-pièces qui permettront de retravailler et d'assembler des composants faciles à fabriquer et qui résistent à la haute température constante des outils sans les coûts de fabrication élevés du métal. Isolante par nature, High Temp Resin contribue également à protéger le reste de la pièce d'une chaleur excessive.

Moulage en sable

Pour la méthode du moulage en sable, un ouvrier de la fonderie remplit des récipients appelés moules d'un mélange de sable et de liant puis enrobe le modèle de sable. On retire ensuite le modèle, il reste donc son empreinte. Du métal en fusion est versé dans la cavité.

Il est possible d'utiliser un moule ouvert pour les pièces comportant des éléments sur un seul côté. Les pièces comportant des éléments sur plusieurs faces doivent être fabriquées dans des moules fermés avec châssis de dessus et châssis de dessous.



Modèle imprimé en Grey Resin et pièce finie coulée en aluminium issue d'un moule à sable ouvert.

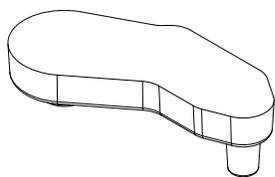
Dans un moule fermé, le métal circule à travers un système d'attaque avant d'atteindre la cavité de la pièce. Ce système d'attaque est soigneusement étudié pour minimiser les imperfections structurelles et esthétiques dues à un écoulement non adéquat du métal.

Les moules à sable fermés sont parfois utilisés avec des noyaux en suspension pour former des cavités internes dans les pièces coulées finies, comme pour les blocs moteurs ou les boîtiers de pompes.

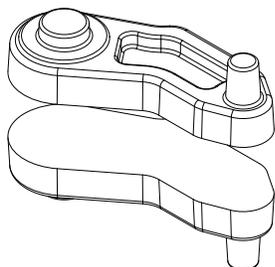
Il existe quelques styles basiques de modèles de moulage en sable, dont les types ouvert, divisé, avec châssis de dessus et de dessous, et plaque-modèle double-face.

Comparaison de la création de modèles et des méthodes de coulée

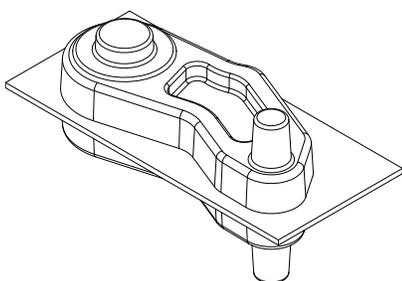
| | PETITES PIÈCES | GRANDES PIÈCES | PETITS ÉLÉMENTS/FINITION DE SURFACE LISSE SUR LA PIÈCE COULÉE | LIBERTÉ DE CHOIX DES GÉOMÉTRIES |
|---|----------------|----------------|---|---------------------------------|
| Moulage à modèle perdu : modèle directement imprimé en Castable Wax | Oui | Non | Oui | Grande liberté |
| Moulage à modèle perdu : modèle directement imprimé en Clear Resin | Non | Oui | Oui | Grande liberté |
| Moulage à modèle perdu : modèle indirect (moule imprimé) | Oui | Oui | Oui | Liberté moyenne |
| Moulage en sable : modèle directement imprimé avec n'importe quelle résine dure | Oui | Oui | Non | Faible liberté |



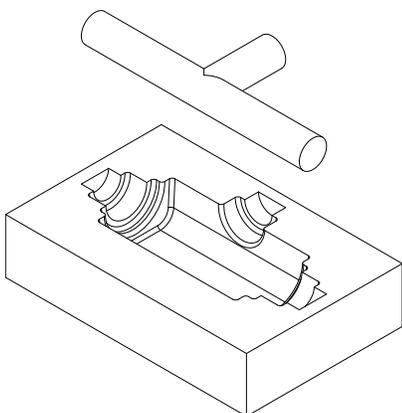
Ouvvert réfère à un type de moule à face ouverte où le métal est versé dans une seule cavité formée par l'empreinte du modèle.



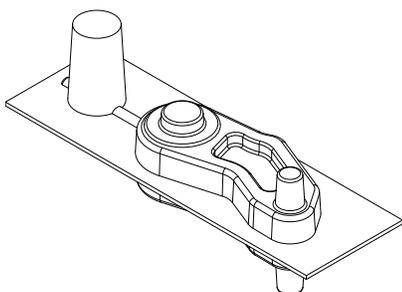
Un **modèle divisé** prend la géométrie complète de la pièce et divise cette géométrie le long d'une ligne. Une moitié du modèle est utilisée sur le côté supérieur et l'autre sur le côté inférieur du boîtier du moule.



Les plaques-modèles double-face ont une approche similaire à celle du modèle divisé mais elles incluent aussi une plaque. La plaque est généralement faite de métal ou de bois mais dans le cas d'un modèle imprimé, la plaque peut être intégrée à la géométrie du modèle.



Les boîtes à noyaux sont utilisées pour mouler les pièces en sable qui constituent les cavités internes des pièces (p. l'évidement d'un élément de plomberie) et qui ne peuvent pas être fabriquées avec un seul modèle moulé en sable. Ces noyaux sont en suspension dans la cavité du moule créée par les éléments du modèle. Le métal en fusion est versé autour des noyaux et lorsqu'il refroidit, la portion de noyaux est brisée et retirée de la pièce coulée.



Les modèles avec châssis de dessus et de dessous sont une extension du concept de plaque-modèle double-face. Outre la plaque d'alignement, un modèle avec châssis de dessus et de dessous comprend des masselottes, des passages et d'autres éléments relevant du processus de coulée. Cela permet de réduire le travail manuel lié à la préparation du moule en sable fini avant la coulée et de limiter les variations dans les pièces coulées qui pourraient être causées par le déplacement d'un ouvrier à l'autre.
