



LIVRE BLANC

# Moulage en silicone pour la conception de produits

Moulage par compression, moulage en deux étapes et surmoulage. Études de cas avec OXO, Tinta Crayons et Dame Products.

# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	<b>3</b>
Cinq choses que vous apprendrez .....	3
À propos du silicone .....	3
<b>Première méthode : moulage rapide en silicone pour les prototypes de joints</b> .....	<b>5</b>
Introduction .....	5
Équipement et matériaux .....	5
Méthode étape par étape .....	6
Meilleures pratiques .....	8
<b>Deuxième méthode : moulage à la cire en deux étapes</b> .....	<b>9</b>
Introduction .....	9
Équipement et matériaux .....	9
Méthode étape par étape .....	10
Meilleures pratiques .....	12
<b>Troisième méthode : surmoulage en silicone pour les prototypes destinés aux clients</b> .....	<b>13</b>
Introduction .....	13
Équipement et matériaux recommandés .....	14
Équipement et matériaux optionnels .....	14
Méthode étape par étape .....	14
Meilleures pratiques .....	18
Préparation à la production industrielle .....	19
<b>Conclusions</b> .....	<b>20</b>

# Introduction

Les composants souples sont omniprésents dans la plupart des objets manufacturés, depuis les supports en caoutchouc des ordinateurs portables jusqu'aux poignées ergonomiques des paires de ciseaux. Les matériaux caoutchouteux, comme le polyuréthane, le silicone, le néoprène ou le latex, ont des applications allant de la couverture de toit aux équipements médicaux.

Les moulages de silicone en particulier permettent de diversifier les propriétés des pièces imprimées en 3D en y incluant des éléments souples ou élastiques avec des matériaux aisément accessibles dans les quincailleries, les magasins de loisirs créatifs ou d'autres enseignes grand public.

Ce rapport comprend les études de cas des entreprises **OXO, Tinta Crayons et Dame Products**, qui illustrent trois mises en œuvre différentes du moulage en silicone pour la conception et la fabrication de produits. Ces techniques sont :

- **Le moulage par compression** de mastic silicone pour les prototypes de joints.
- **Le moulage en deux étapes** à la cire ou avec un autre support solide pour la réplique de pièces. Le moulage en silicone est alors une étape intermédiaire dans la réalisation du produit.
- **Le surmoulage** pour encapsuler complètement un prototype électronique.

Il est possible d'utiliser directement ces trois techniques, ou d'emprunter des éléments à chacune d'elles pour des applications personnalisées. En plus du détail étape par étape de leurs processus, nos partenaires nous ont confié les meilleures pratiques éprouvées pour mettre en œuvre ces techniques en utilisant comme étape cruciale l'impression 3D Low Force Stereolithography (LFS) de Formlabs.

## CINQ CHOSES QUE VOUS APPRENDREZ :

- Comment sélectionner le silicone adapté à votre situation
- Comment utiliser un moule de compression pour un prototype de joint
- La meilleure façon de reproduire un master imprimé en 3D avec un côté plat
- Comment encapsuler un appareil électronique avec un surmoulage
- Les meilleures pratiques pour concevoir les points clés des moules imprimés en 3D

## À PROPOS DU SILICONE

Dans ce rapport, nous détaillons des applications de matériaux vulcanisés à température ambiante (RTV) de la famille des silicones. Les silicones sont une catégorie de polymères dont la chaîne moléculaire contient du silicium, et qui passent d'un état liquide (le silicone) à un état solide extrêmement flexible et élastique (le caoutchouc silicone) en cas de réaction avec un catalyseur chimique.

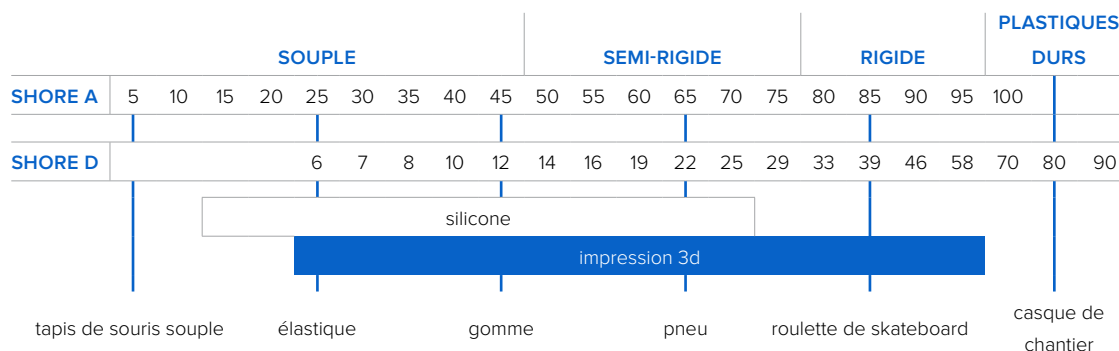
Dans le domaine du moulage et de la fabrication de moules, le caoutchouc silicone RTV restitue les moindres détails, comme un texte en relief. De plus, la plupart des silicones moulables sont sans adhésion chimique et se décrochent des moules imprimés en 3D après la polymérisation. Une adhésion mécanique peut être obtenue en moulant sur des surfaces très poreuses comme une étoffe tissée, et dans certains cas une adhésion chimique peut être obtenue en utilisant des liants spécialisés.

**Silicone liquide :** Les silicones liquides se présentent généralement en deux composants ou un composant unique avec une petite quantité de catalyseur à ajouter. Deux grandes catégories sont facilement disponibles. Les silicones catalysés au platine sont généralement plus coûteux mais fournissent une meilleure stabilité dimensionnelle sur le long terme et se contractent très peu après une polymérisation complète. Les silicones catalysés à l'étain sont moins coûteux mais moins stables sur la durée, et ont généralement un taux de contraction plus élevé. Les durées de polymérisation peuvent varier de 10 minutes à plusieurs heures.

**Pâte silicone :** Il s'agit d'une pâte en deux produits qu'il faut mélanger manuellement à part égale. Une de ses applications principales est la fabrication de moules pour le secteur de la joaillerie, mais le silicone lui-même est un bon substitut pour les joints d'étanchéité moulés par compression. Sa dureté est de Shore 40A (voir l'échelle ci-dessous), équivalente à celle d'une gomme de crayon. Ce silicone se polymérise rapidement, en moins de 20 minutes, et ne se contracte pas du tout.

**Peau, muqueuse et sécurité alimentaire :** Certaines applications exigent une sensibilité supérieure à d'autres, quand elles entrent en contact avec le corps humain ou avec la nourriture. Vérifiez toujours la fiche de données de sécurité des matériaux fournie par le fabricant du silicone pour vous assurer de l'innocuité du caoutchouc pour votre application.

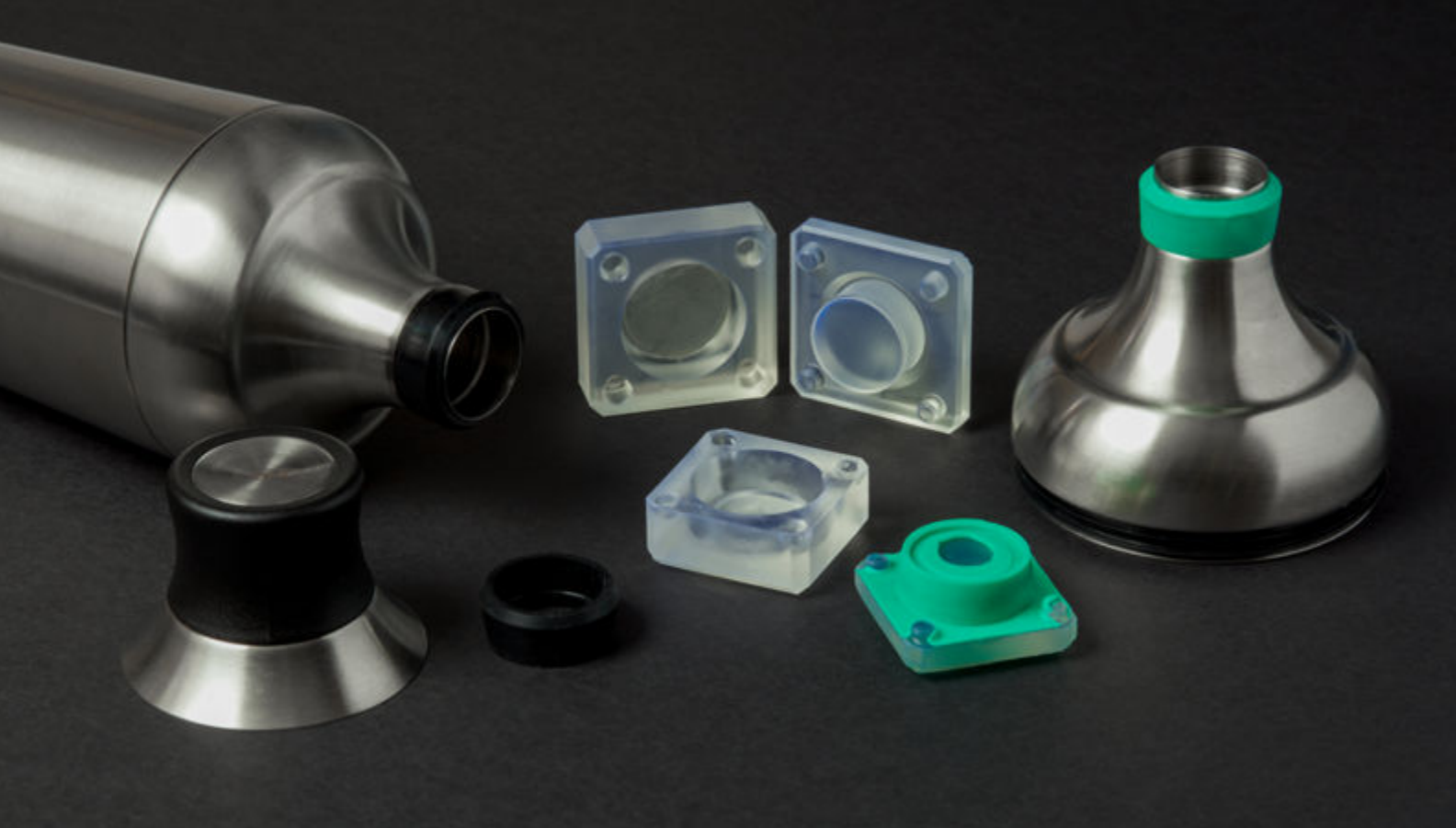
**Échelle et indices de dureté :** On attribue aux matériaux caoutchouteux, comme les silicones, un indice de dureté allant du plus souple au plus ferme, mesuré avec un duromètre selon l'échelle de dureté Shore. Les matériaux les plus mous sont mesurés sur l'échelle de dureté Shore A, et les plus durs sur l'échelle Shore D.



*Adapté du Meridian Laboratory*

Nous avons échangé avec les clients actuels de Formlabs pour mieux comprendre comment ils se servent de leurs imprimantes 3D SLA pour créer des moules en silicone. Même si un point clé à retenir est qu'il n'existe pas de procédé idéal qui conviendrait à tout le monde, les directives de nos utilisateurs sont adaptées à de nombreuses applications. Il y aura toujours des exceptions, mais l'essentiel des conseils rassemblés dans cet ouvrage peut être appliqué pour la plupart des projets.

Et maintenant, intéressons-nous aux bases du moulage de prototypes, au moulage à la cire en deux étapes, et au surmoulage en silicone.



## Première méthode : Moulage rapide en silicone pour les prototypes de joints

### INTRODUCTION

SOCIÉTÉ : **OXO**

Basée aux États-Unis, OXO crée des objets pratiques et ergonomiques pour la vie quotidienne, notamment des ustensiles de cuisine devenus emblématiques. Leurs concepteurs de produits utilisent l'impression 3D pour évaluer la forme et la fonctionnalité des prototypes, mais des méthodes hybrides sont essentielles pour créer les parties souples, comme les joints.

Cette étude de cas est issue de la conception d'un joint pour un shaker à cocktail. Les ingénieurs d'OXO devaient fournir un prototype fonctionnel avec des joints étanches entre les pièces. Après de nombreux essais avec les différents silicones disponibles, ils ont estimé que le moulage par compression de la pâte silicone en deux produits Castaldo Quick-Sil était idéale pour créer un prototype étanche simulant les caractéristiques du joint industriel. En fait, le moule de compression du prototype était lui-même une bonne représentation de la conception des moules et des méthodes utilisées dans la production industrielle de joints.

### ÉQUIPEMENT ET MATÉRIAUX :

- Produit McMaster-Carr 8595K12 Quick-Sil, parties A et B
- Clear Resin Formlabs
- Agent démoulant
- Étau

## MÉTHODE ÉTAPE PAR ÉTAPE

1. **Imprimer le moule en deux parties avec Clear Resin :** Une épaisseur de couche de 50  $\mu\text{m}$  est recommandée pour la plupart des applications. Il est possible de passer à 25  $\mu\text{m}$  pour détailler du texte ou d'autres textures de surface. Orientez les pièces pour que les surfaces internes ne présentent aucune trace de support.

---

2. **Laver et polymériser le moule, puis retirer les supports :** Lavez minutieusement avec de l'alcool isopropylique jusqu'à ce que les pièces ne soient plus collantes. Une polymérisation à 60° C pendant 15 minutes est recommandée pour Clear Resin. Il est préférable de poncer les traces de support pour que le moule soit parfaitement ajusté dans l'étau.

---

3. **Appliquer l'agent démoulant :** La plupart des produits en spray sont appropriés pour enduire les surfaces intérieures.

---

4. **Mélanger consciencieusement les produits A et B :** Mettez un volume égal des produits A et B, et pétrissez à la main. Le caoutchouc silicone commence à polymériser après 90 secondes, donc les produits doivent être pétris pendant le temps minimum nécessaire pour obtenir une couleur uniforme, idéalement moins d'une minute.



5. **Remplir le moule avec le silicone :** Le silicone devrait faire pression sur les deux côtés du moule, afin de saisir tous les détails et toutes les crevasses. Mettre un peu trop de pâte n'est pas problématique. L'excès débordera à l'extérieur du moule.



- 
6. **Presser le moule avec l'étau :** La pression exercée doit être perpendiculaire à la ligne de jonction du moule. Notez que pour les moules de compression, les surfaces de jonction ne se touchent pas complètement tant que le moule n'est pas pressé. Serrez lentement l'étau jusqu'à ce que le moule ne puisse pas se fermer davantage. La polymérisation complète du caoutchouc silicone dure 20 minutes.



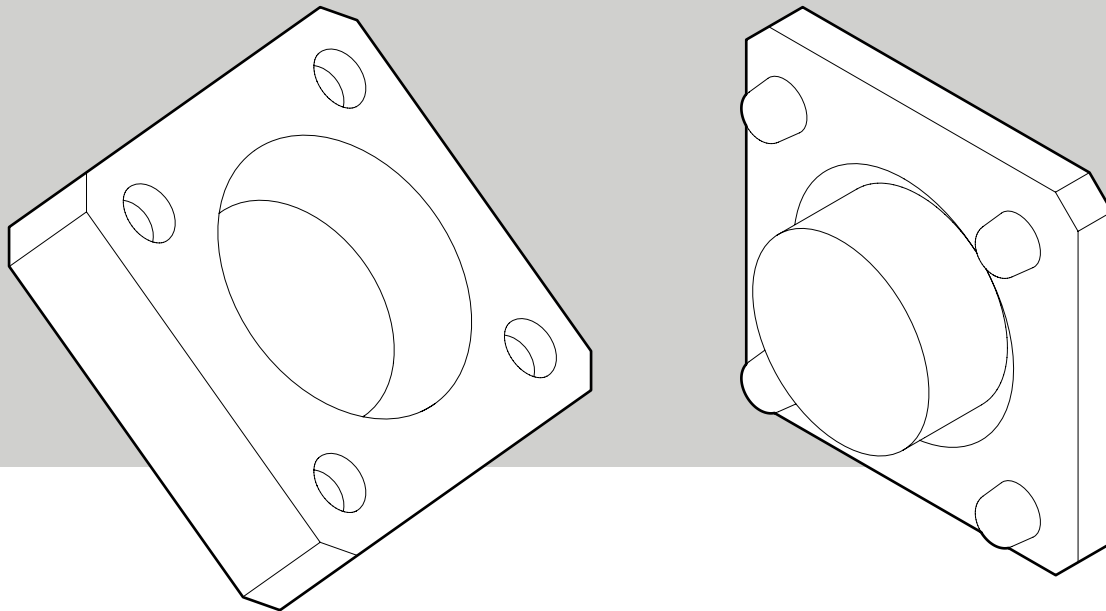
- 
7. **Démouler le prototype :** Vous pouvez ouvrir le moule avec la spatule Formlabs ou un tournevis à tête plate.



- 
8. **Ébavurer et finaliser le prototype :** Il y aura toujours un peu de matériau en excès ou des bavures à découper sur la jonction des pièces du moule. Nous vous conseillons d'utiliser pour ce faire un scalpel ou un cutter le plus tranchant possible.



- 
9. **Préparer le moule pour le moulage suivant :** Le moule peut être réutilisé plusieurs fois. Appliquez à nouveau l'agent démoulant et reprenez à la troisième étape.
-



### MEILLEURES PRATIQUES

- a. **Sélection de la résine :** Tough Resin ou Clear Resin peuvent être utilisées. Nous recommandons Clear Resin pour une vérification visuelle du remplissage du moule, mais Tough Resin permet d'optimiser la résistance à la pression de l'étau. Nous recommandons d'imprimer avec une épaisseur de couche de 50  $\mu\text{m}$  pour un bon équilibre entre un fini bien lisse et une impression rapide. Orientez les pièces sur la plateforme de fabrication pour que les surfaces internes ne présentent aucune trace de support. Vous pouvez polir les surfaces externes pour un fini parfaitement transparent.
- b. **Éléments d'alignement :** Les quatre bosses et creux cylindriques aux coins du moules sont des marqueurs d'alignement pour éviter tout décalage entre les deux parties. Nos partenaires recommandent d'ajouter 0,1 mm de jeu pour ces éléments d'alignement. Pour un objet avec une symétrie de rotation comme celui-ci, les éléments d'alignement peuvent tous avoir des formes et des positions identiques. Autrement dit, un côté du moule peut tourner de 90 ou 180 degrés sans modifier la forme du joint. Pour des géométries moins régulières, en revanche, vous pouvez utiliser une stratégie de verrouillage en modifiant la forme ou la position des éléments d'alignement, afin que le moule ne puisse se fermer que dans un seul sens.
- c. **Biseautage des points d'accroche :** L'ajout d'un chanfrein sur les bords du moule peut permettre une ouverture plus facile. Pour ouvrir le moule, vous pouvez utiliser la spatule incluse dans le Finish Kit de Formlabs ou un tournevis à tête plate.
- d. **Conception du moulage :** L'une des premières caractéristiques à prendre en compte dans la conception est la ligne de séparation du moule. Comment les deux parties du moule de compression vont s'assembler... et se séparer. Notre interlocuteur chez OXO conseille d'envisager la façon dont la pièce sera fabriquée, et de prendre en compte le retrait des bavures. Dans notre cas, il a identifié un angle marqué sur l'extérieur du joint comme étant un endroit pratique pour définir la ligne de jonction.

Il est intéressant de noter que les angles de dépouille ne constituent pas un aspect essentiel de ce procédé de moulage. Un creux intérieur du joint n'a par exemple pas eu besoin d'avoir sa propre ligne de jonction. En effet, la capacité de déformation du caoutchouc silicone pendant le démoulage permet de gérer de nombreux angles, et même les petites contre-dépouilles.



## Deuxième méthode : Moulage à la cire en deux étapes

### INTRODUCTION

SOCIÉTÉS : **Tinta Crayons, Print My Ride**

Tinta Crayons est une petite entreprise australienne de crayons fondée par deux mères de jeunes enfants. Elles ont créé leur propre formule de cire non toxique et respectueuse de l'environnement, et se servent des moulages en silicone pour produire de petits volumes de crayons aux formes fantaisistes avec beaucoup de détails.

Leur procédé commence avec la création d'une copie du produit fini (le master) en résine standard Formlabs. Cette pièce est ensuite dupliquée en cire, d'abord en moulant un plateau de silicone autour du master, puis en moulant la cire dans ce plateau en silicone.

Cette conception en moule ouvert est parfaitement adaptée à la reproduction de pièces ayant un côté plat. Cette méthode peut être étendue à d'autres matériaux comme le béton ou les résines époxy en deux produits. Contrairement aux moules complètement fermés, elle permet aussi de s'adapter à des matériaux qui chauffent pendant la polymérisation, qui se contractent, ou qui au contraire se dilatent comme les mousses moulables.

Pour les instructions qui suivent, nous nous sommes entretenus avec Matt Schmotzer, l'ambassadeur Formlabs de Print My Ride, qui a mis en place le même processus de fabrication pour créer des carreaux de béton afin de décorer la cuisine de sa maison de Détroit, dans le Michigan.

### ÉQUIPEMENT ET MATÉRIAUX

- Silicone liquide en deux produits (OOMOO 30 de Smooth-On)
- Grey Resin Formlabs
- Agent démoulant
- Cire, béton, résine, ou autre matériau pour l'utilisation finale

## MÉTHODE ÉTAPE PAR ÉTAPE

1. **Imprimer les masters du produit en résine standard** : C'est la forme de votre produit fini, qui sera dupliqué dans un autre matériau. Il est recommandé de l'imprimer avec une épaisseur de couche de 50 µm. Veillez à ne pas avoir de traces de support sur le côté du motif.



2. **Laver minutieusement les pièces avec de l'alcool isopropylique** : Toute viscosité résiduelle sur la surface peut nuire au processus de moulage.

3. **Fabriquer un boîtier de moule** : Le MDF enduit est un choix classique pour la boîte de confinement du moule en silicone. Dans notre exemple, nous avons tout simplement récupéré un récipient en plastique. L'essentiel est d'avoir un matériau non poreux et un fond plat.



4. **Disposer les masters et appliquer l'agent démoulant** : Commencez par pulvériser légèrement l'intérieur de votre boîtier avec votre agent démoulant. Nous avons utilisé l'agent démoulant universel de la marque Smooth-On. Positionnez les masters dans la boîte, avec la face gravé vers le haut. Pulvérisiez-les également avec l'agent démoulant. Il faudra ensuite à peu près 10 minutes pour qu'ils soient bien secs.

---

5. **Préparer le silicone** : Mélangez le caoutchouc silicone en suivant les instructions de son emballage. Un appareil vibrant comme une ponceuse électrique à main peut être utilisé pour éliminer les bulles d'air.

---



6. **Verser le silicone dans la boîte** : Faites couler lentement le caoutchouc silicone mélangé dans la boîte de confinement. Visez d'abord le fond pour que le silicone remonte le long des contours des pièces imprimées en 3D. Versez jusqu'à ce que les pièces soient couvertes d'au moins un centimètre de silicone. Le processus de polymérisation prendra entre une heure et une journée, en fonction de la marque et du type de silicone.

---

7. **Démouler le silicone** : Une fois la polymérisation terminée, décollez le silicone du boîtier et ôtez les masters. Vous avez maintenant le moule, de type bac à glaçons, qui va servir à couler vos produits finis.



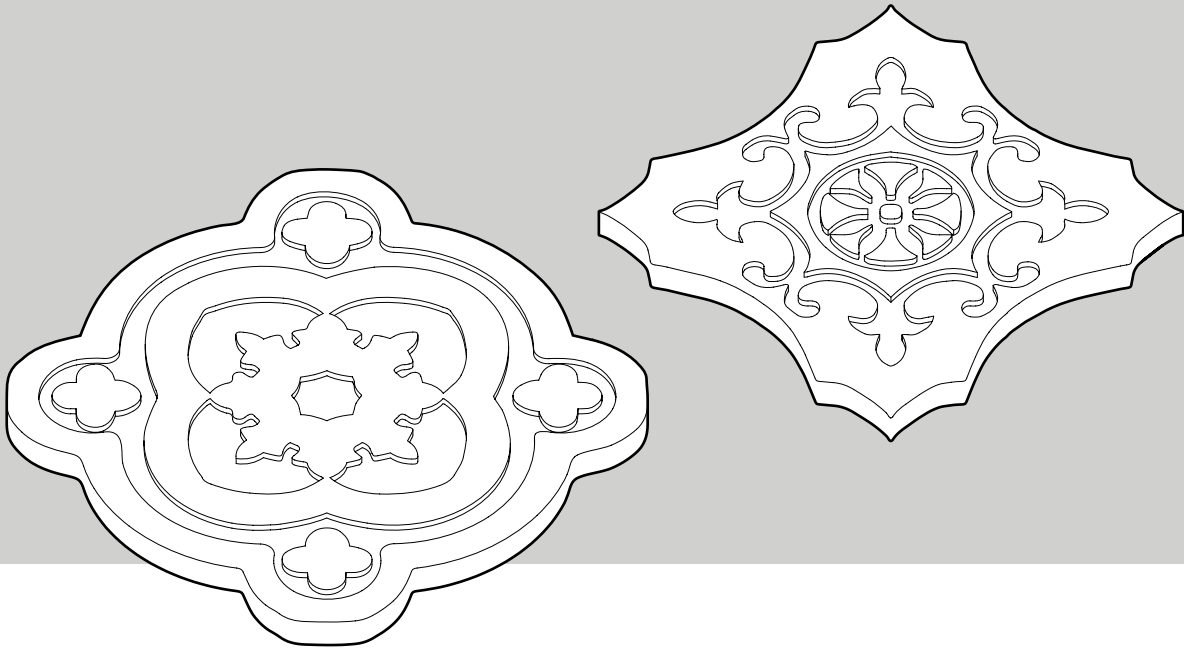
8. **Couler votre pièce** : Une fois encore, il est préférable de pulvériser légèrement le moule en silicone avec l'agent démoulant et de laisser sécher pendant 10 minutes. Versez votre matériau final (cire, béton ou autre) dans les cavités et laissez le durcir.

---

9. **Préparer le moule pour la coulée suivante** : Ce moule en silicone peut être utilisé plusieurs fois. Revenez à la huitième étape et répétez la procédure.

---





### MEILLEURES PRATIQUES

- a. **Sélection de la résine :** Les résines standard comme Grey Resin restituent parfaitement les détails. Le silicone reproduit les détails les plus fins de la surface, y compris les lignes de couches. Même si une épaisseur de couche de 50 microns est un bon compromis entre le lissage de surface et la vitesse d'impression, imprimer avec une épaisseur de couche de 25 microns peut être préférable pour les applications esthétiques.
- b. **Agent démoulant :** Il est important de l'utiliser lors des deux étapes de votre procédure de moulage, aussi bien pour la création du moule en silicone que pour le coulage de votre pièce finale. La marque Smooth-On commercialise un agent démoulant universel qui convient bien pour la plupart des applications.
- c. **Angles de dépouille :** Matt a utilisé un angle de dépouille de deux degrés pour les éléments verticaux de ses carreaux. Cependant, le procédé de moulage en silicone est assez tolérant en la matière, et peut gérer des angles de 90 degrés ou de petites contre-dépouilles. Si vous prévoyez une utilisation répétée, essayez tout de même de minimiser les flexions et les étirements du moule lors de la sortie des pièces, ou orientez-vous vers un caoutchouc silicone avec une résistance au déchirement élevée.



## Troisième méthode : Surmoulage en silicone pour les prototypes destinés aux clients

### INTRODUCTION

SOCIÉTÉ : **Dame Products**

Dame Products est une start-up de Brooklyn qui conçoit des produits pour l'industrie de la santé et du bien-être. Certains produits de leur ligne ont des géométries ergonomiques complexes, entièrement recouverte aux couleurs vives d'un silicone sans risque pour la peau. Leur équipe utilise le surmoulage en silicone dans leur production et pour encapsuler les composants internes de leurs prototypes en version bêta, destinés aux clients.

Les ingénieurs de Dame Products peuvent fabriquer des douzaines de prototypes surmoulés dans la journée en utilisant par roulements trois ou quatre moules imprimés en SLA. Pendant que le caoutchouc silicone d'un prototype est en phase de polymérisation, le suivant peut être démoulé et préparé pour le prochain remplissage. Les finitions et le nettoyage des prototypes démoulés se déroulent en parallèle.

Quand un prototype est renvoyé à la société, l'appareil est désinfecté, la fine couche de silicone est retirée, et les composants internes sont réutilisés dans un nouveau prototype en version bêta.

## ÉQUIPEMENT ET MATÉRIAUX RECOMMANDÉS :

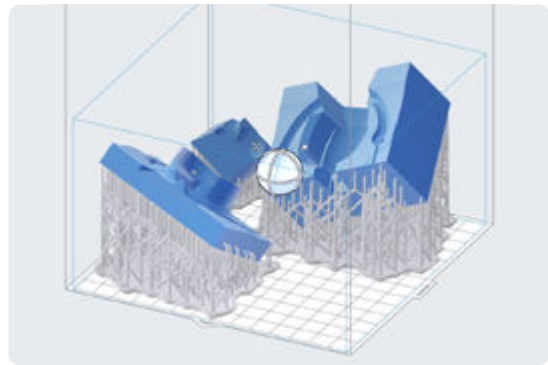
- Clear Resin Formlabs
- Spatule et pince coupante Formlabs (fournies dans le Finish Kit)
- Silicone liquide RTV en deux produits de qualité médicale : dureté Shore recommandée de 20 à 40 A
- Seringues
- Cartouche à époxy
- Pistolet à époxy
- Buse mélangeuse
- Bâtonnets
- Presses en C
- Appareil à encapsuler

## ÉQUIPEMENT ET MATÉRIAUX OPTIONNELS :

- Colorant pour silicone (optionnel)
- Source de vibrations (optionnel)
- Vaseline (optionnel)
- Ruban adhésif (optionnel)

## MÉTHODE ÉTAPE PAR ÉTAPE

1. **Imprimer le moule en plusieurs pièces avec Clear Resin Formlabs** : Il est recommandé de l'imprimer avec une épaisseur de couche de 50  $\mu\text{m}$ . Orientez les pièces pour que les surfaces internes ne présentent aucune trace de support.



2. **Laver et polymériser le moule, puis retirer les supports** : Lavez minutieusement avec de l'alcool isopropylique jusqu'à ce que les pièces ne soient plus collantes. Une polymérisation à 60° C pendant 15 minutes est recommandée pour Clear Resin. Polir l'extérieur du moule pour un fini parfaitement transparent peut être pratique.



3. **Au moins une heure à l'avance : préparer le silicone** : Remplissez chaque côté de la cartouche à époxy avec un produit (A ou B), en utilisant une seringue différente pour chaque liquide. Maintenez-la en position verticale et laissez l'air s'échapper lentement pendant au moins une heure et au plus une journée. L'ajout de colorant est une étape optionnelle à effectuer ici. Le cas échéant, ajoutez le colorant au côté A ou B de la cartouche et mélangez minutieusement.

---

4. **Appliquer l'agent démoulant (optionnel) :** Appliquez une couche très fine de vaseline aux surfaces internes du moule avec un petit pinceau. Cette technique de surmoulage en silicone fonctionne aussi sans agent démoulant.

---

5. **Positionnez l'appareil interne :** Les chevilles d'alignement sur le moule sont là pour aider à ajuster l'appareil.



6. **Fermer le moule et le comprimer à la main :** Vérifiez la position et l'alignement de l'appareil à travers l'extérieur du moule. S'il semble ne pas être aligné correctement, répétez les étapes cinq et six.

---

7. **Presser le moule :** Commencez par un serrage dans « l'axe de dépouille », soit perpendiculaire à la ligne de jonction principale du moule. C'est un bon moment pour vérifier une nouvelle fois l'alignement, car le serrage peut avoir déplacé l'appareil interne. Une étape optionnelle découverte par l'équipe de Dame Products consiste à couvrir les bords avec du ruban adhésif avant le serrage, pour aider à réduire les écoulements de matériau et les bavures qui arrivent lors de la fabrication de moules par vulcanisation à température ambiante.

---



8. **Assembler le pistolet à époxy :** Insérez les cartouches dans le pistolet et vissez la buse mélangeuse. Il est conseillé de faire couler un peu de liquide à ce stade pour vous assurer que le mélange se fait correctement.

---

---

9. **Remplir le moule avec le silicone :** Insérez l'embout de la buse mélangeuse dans l'ouverture du moule et appuyez doucement sur la gâchette. Regardez le silicone se répandre dans le moule, et continuez à pomper jusqu'à ce que le moule soit plein et que le silicone ressorte par tous les événements. Une fois que vous avez arrêté, le silicone peut continuer à descendre dans le moule à cause de la décantation des bulles d'air ou de l'écoulement du matériau sur les lignes de jonction. Vous devrez peut-être en rajouter un peu à plusieurs reprises après le remplissage initial. Après le remplissage, tenir un appareil vibrant (comme une ponceuse à main) contre la surface du moule peut encourager l'évacuation des bulles d'air.

---



10. **Attendre dix minutes :** Le silicone utilisé par Dame Products se polymérise entièrement en à peu près 10 minutes pour former la coque en caoutchouc. Vérifiez la durée de polymérisation recommandée sur la notice de votre silicone. C'est le moment idéal pour commencer à ébavurer.

---

---

11. **Démouler le prototype** : Découpez d'abord tout le silicone en excès à l'extérieur du moule. Puis ouvrez le moule avec la spatule Formlabs ou un tournevis à tête plate. Faites attention aux minces fils de silicone qui se forment dans les événements du moule. Prenez le temps de les découper individuellement pour éviter qu'en restant fixés au moule ils arrachent la coque en silicone de votre appareil. Il peut aussi être utile de découper une partie des bavures avant de libérer complètement l'objet.

---

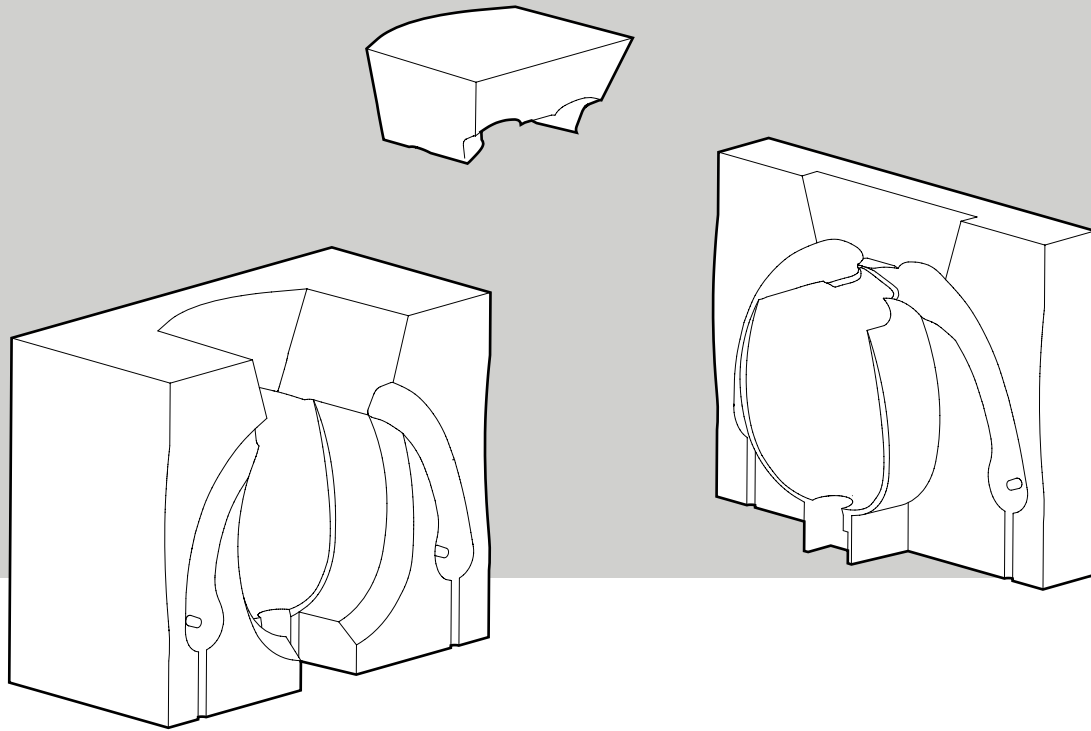


12. **Bavures, finitions et nettoyage du prototype** : Il y aura toujours quelques bavures à découper avec la pince coupante Formlabs ou une lame acérée. Si des bulles d'air ont formé des creux à la surface, vous pouvez les colmater en repeignant avec du silicone liquide et en le laissant polymériser. Les prototypes doivent être nettoyés suivant les recommandations particulière du secteur avant d'être confiés à des testeurs.

---

13. **Préparer le moule pour la coulée suivante** : Le moule peut être réutilisé plusieurs fois, mais vous devrez peut-être préalablement nettoyer les événements avec un objet pointu comme un trombone ou un foret. Retournez à l'étape quatre ci-dessus.

---



### MEILLEURES PRATIQUES

- a. **Sélection de la résine :** Clear Resin permet une vérification visuelle du remplissage du moule et de l'alignement de l'appareil interne. Nous recommandons d'imprimer avec une épaisseur de couche de 50  $\mu\text{m}$  pour un bon équilibre entre un fini bien lisse et une impression rapide. Orientez les pièces sur la plateforme de fabrication pour que les surfaces internes ne présentent aucune trace de support.
- b. **Préparation du moule :** La résine résiduelle peut interférer avec la chimie du moulage de silicone. Un lavage minutieux du moule avec de l'alcool isopropylique permet d'assurer un meilleur résultat du premier moulage. Le procédé indiqué fonctionne sans agent démoulant, mais une fine couche de vaseline peut faciliter le processus de démoulage. Mais soyez attentif au fait qu'une couche d'agent démoulant trop épaisse peut interférer avec la chimie du moulage ou nuire à la finition de surface de la pièce moulée.
- c. **Préparation du silicone :** Cette application utilise un pistolet à époxy pour injecter le silicone dans le moule. Le mélange des produits A et B est effectué dans la buse mélangeuse. Pour le remplissage, les cartouches d'époxy sont placées verticalement (Dame Products a créé un support en impression 3D !) et des seringues servent à y transférer les silicones A et B depuis des récipients plus grands. Pour évacuer l'air du silicone, l'équipe le met en cartouches et le laisse reposer une journée plutôt que de faire un dégazage actif dans une chambre à vide. Si vous profitez de ce moment pour ajouter un colorant pour silicone à l'un des produits, vous pouvez obtenir un caoutchouc silicone éclatant de couleur.
- d. **Chevilles d'alignement :** Les petites bosses apparentes sur le schéma du moule sont là pour orienter et contraindre les pièces, et pour définir l'épaisseur de la coque en silicone. Les ingénieurs de Dame Products utilisent généralement un diamètre de 0,2 mm pour ces éléments. Essayez de fixer toutes ces chevilles d'alignement dans « l'axe de dépouille », soit perpendiculaire à la ligne de jonction principale du moule. Plus les chevilles s'écarteront de cet angle, plus elles risqueront de se rompre ou de compliquer l'ouverture du moule. En ce qui concerne l'épaisseur de la couche de silicone, essayez de conserver un minimum de

1,5 mm. Une conception avec une épaisseur minimum de 2 mm est généralement plus sûre, et 1 mm peut être suffisant pour de petites zones de la coque.

Notez que les chevilles d'alignement ont tendance à laisser de petits trous sur la surface.

Au besoin, ces derniers peuvent être comblés avec une petite retouche de silicone liquide qu'on laissera polymériser.

- e. **Événements :** L'air se déplace quand un espace fermé se remplit de silicone, et les canaux des événements sont incorporés dans les moules pour lui permettre de s'échapper. Il est donc naturel de placer un événement sur l'emplacement du moule qui se remplira en dernier, mais l'équipe de Dame Products nous a confié d'autres meilleures pratiques pour le positionnement des événements. Lors de la conception du moule, il est important de réfléchir aux zones qui risquent de piéger de l'air, et de connecter des événements également à ces points. Même sous pression, des bulles d'air peuvent se former sur les virages serrés, dans les coins, ou encore là où deux coulées se rejoignent. Ces bulles causeront des trous dans la pièce moulée.  
Les canaux peuvent être conçus pour suivre un plan de jonction du moule ou être creusés dans le moule (voir le diagramme ci-dessus). Évitez de placer un canal qui serait creusé à travers plusieurs éléments du moule. Si de longs événements sont indispensables, ils peuvent avoir un diamètre plus petit à la base (contre la pièce moulée) et plus large à leur sortie.  
Une note sur les itérations de vos modèles 3D : si vous avez régulièrement une bulle d'air au même endroit, ajoutez un événement à cet emplacement sur le moule.
- f. **Remplissage du moule :** Dame Products utilise un pistolet à époxy et des cartouches, et conçoit les points d'injection de ses moules pour correspondre à sa buse mélangeuse. Pour les formes complexes, la direction de remplissage peut avoir une grande importance. Vous devriez toujours essayer de remplir depuis le point le plus élevé de l'objet, et prendre en compte le développement des coulées. Dans l'exemple représenté, le produit Eva II de Dame Products, nous avons affaire à une géométrie à embranchements. La meilleure méthode de remplissage est de partir du point le plus élevé du corps de la pièce, et les bras plus étroits sont les dernières zones à se remplir. Attendez de voir du silicone ressortir par tous les événements avant d'arrêter de remplir. Si une zone se remplit trop vite, vous pouvez bloquer l'événement avec un doigt jusqu'à ce que le reste du moule soit plein.
- g. **Bavures, finitions et nettoyage :** Une problématique à considérer avec attention pendant le démoulage est le silicone coincé dans les événements. N'ouvrez pas le moule d'un coup sec, car les départs des événements sont des points où la surface caoutchouteuse peut se déchirer. Il est souvent possible de découper une partie des bavures pendant que la pièce est encore partiellement dans le moule, en coupant avec une lame tranchante directement contre le moule.

## PRÉPARATION À LA PRODUCTION INDUSTRIELLE

L'équipe de Dame Products met en lumière deux différences importantes entre les moules de prototypes imprimés en 3D et les moules utilisés pour la production industrielle. D'abord, un moule de production est en métal usiné. Ensuite, les chevilles d'alignement sont généralement orientées dans le plan de la ligne de jonction principale du moule, et conçues pour se rétracter à l'intérieur du moule. Ce qui permet d'avoir une couche surmoulée sans les creux et les trous créés par les chevilles d'alignement.



## Conclusions

Les techniques hybrides comme le moulage de silicone permettent d'étendre la palette matérielle de l'impression 3D en utilisant des équipements et des matériaux aisément accessibles. Les méthodes exposées dans ce livre peuvent être utilisées directement, ou on peut y piocher des éléments pour des applications personnalisées.

Quelques variations de ces méthodes sont décrites ci-dessous :

1. Si vous dupliquez des pièces avec des détails structurels ou de surface sur tous les côtés, vous pouvez développer la méthode du « bac à glaçons » pour créer un moule en silicone en deux parties.
2. Si vous faites du prototypage de poignées ou de manches, un surmoulage partiel peut être réalisé sur une pièce. Comme la pièce ne sera pas entièrement encapsulée, vous devrez peut-être ajouter des caractéristiques à la géométrie ciblée pour verrouiller la position de la couche de silicone. Ce qui serait possible en ajoutant du silicone liquide ou en pâte.
3. Pour créer des objets avec de petits détails fins, vous pouvez faire du moulage à modèle perdu, avec par exemple de la cire.