

# Moulage à cire perdue : du modèle à la pièce

*Cette ressource est issue d'une séance d'application en orfèvrerie réalisée dans le laboratoire de fonderie de l'ENS Paris-Saclay. L'objectif est de réaliser une quarantaine de pendentifs en argent (figure 1). La fabrication par moulage à cire perdue qu'elle soit industrielle ou comme ici plus artisanale, suit les mêmes étapes ; cet exposé est donc aisément transposable en industrie.*



Figure 1 : Médaille finie, la hauteur réelle du  $\Sigma$  est d'environ 2 cm

Le procédé à cire perdue en moule plein consiste à couler, dans un cylindre en acier inoxydable, un coulis réfractaire autour d'une grappe de modèles en cire positionnée sur un support. Lors du cycle de cuisson de la céramique, la grappe fond et laisse l'empreinte des futures pièces ainsi que des systèmes de remplissage et d'alimentation (voir ressources « Réalisation de pièces métalliques par prototypage en moulage à cire perdue » et « Le moulage à cire perdue »). La réalisation des modèles par prototypage rapide a permis un gain de temps et de coût considérable dans l'élaboration des moules au regard de l'usinage de l'outillage et de l'injection de cire.

Cette ressource détaille les différentes phases de réalisation de pièces moulées à cire perdue, de la préparation de la grappe et des matériaux, au décochage de la pièce en passant par l'élaboration du moule et la coulée de l'argent.

## 1 – Contexte

Les pièces à réaliser sont des médaillons en argent ; chaque coulée permet d'obtenir une quarantaine de pièces (figure 2).



Figure 2 : Les médaillons bruts de sortie de moule

## 2 – Prototypage rapide du modèle

Le prototypage rapide désigne un ensemble de techniques permettant d'obtenir à partir de données numériques, des pseudos pièces (polymérisées, laminées, cirées) servant de modèles perdus pour la réalisation de pièces. Dans l'exemple de cette ressource, un groupe de cinq médaillons a été modélisé numériquement sous le logiciel *PreForm* de la société *FormLabs* (figure 3) puis généré dans le laboratoire de prototypage (figure 4).



Figure 3 : Capture d'écran du logiciel *PreForm* de la société *FormLabs*

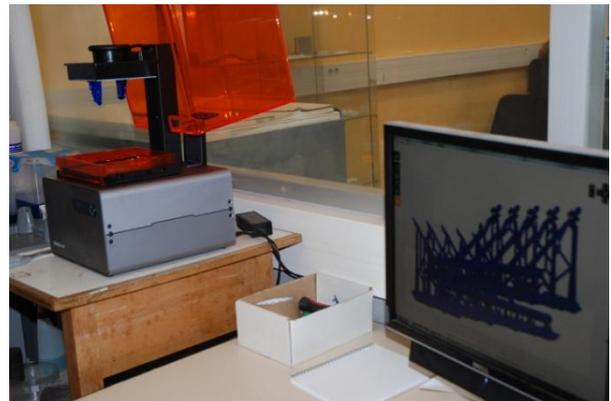
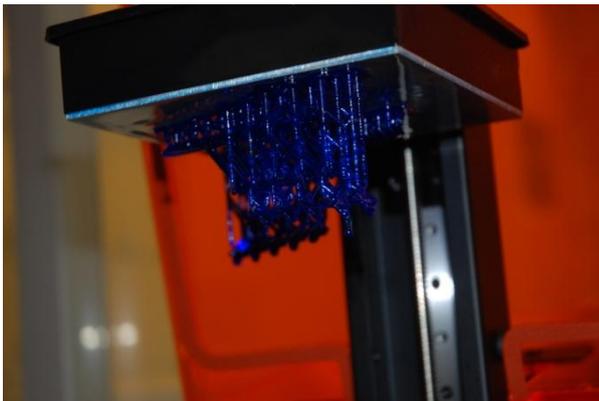


Figure 4 : Vue d'ensemble de la zone prototypage rapide

Une fois décroché du support, le modèle est dégraissé dans un bain alcoolisé (figure 5).

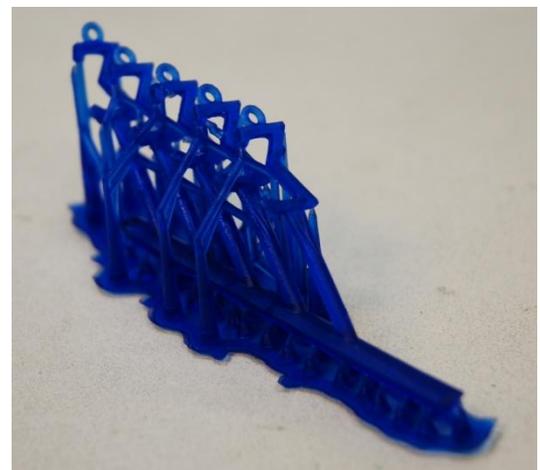


Figure 5 : Modèle réalisé et dégraissé

### 3 – Assemblage de la grappe modèle

Le modèle issu de prototypage rapide comporte bras et supports nécessaires à sa génération qui doivent être éliminés précautionneusement pour la réalisation du moule (figure 6).

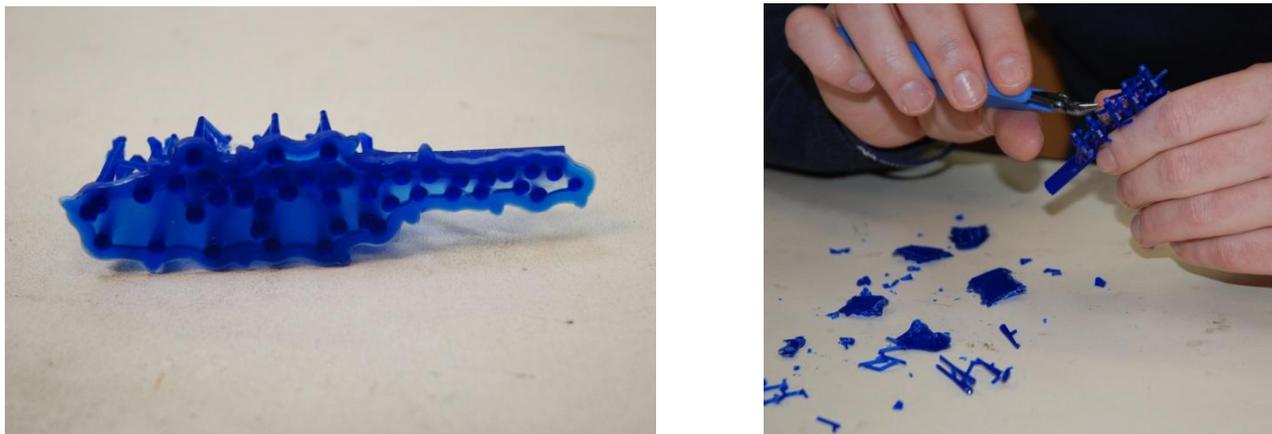


Figure 6 : Brut de prototypage rapide, préparation du modèle pour la réalisation du moule

On obtient alors un modèle d'un groupe de cinq pièces reliées par les futurs canaux d'alimentation au futur canal de coulée, plus exactement au quart du canal de coulée.

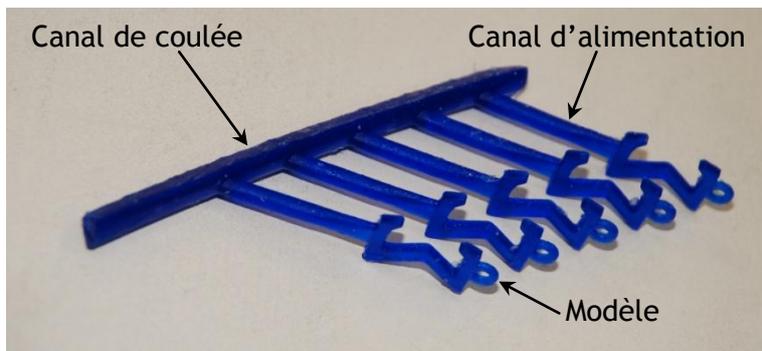


Figure 7 : Modèle comportant les formes à moulées, les canaux d'alimentation et de coulée

Quatre groupes sont alors assemblés par collage et, afin de ne laisser aucun espace, de la cire est déposée sur les joints (figure 8).

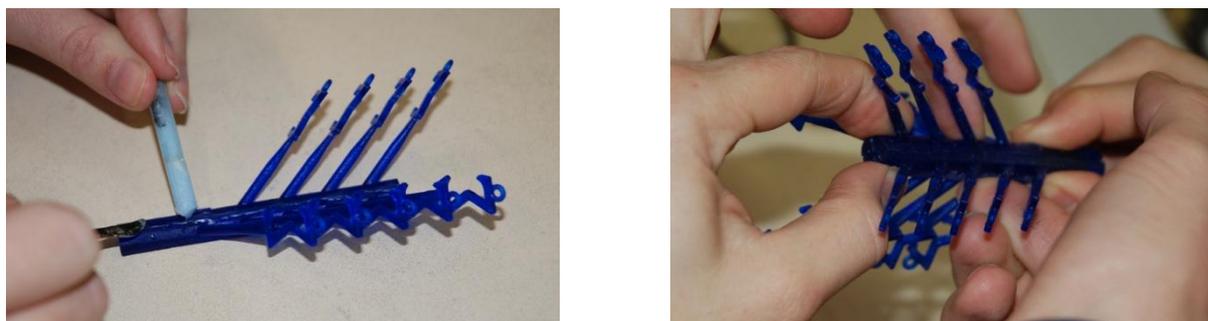


Figure 8 : Deux groupes assemblés et jointés et assemblage de quatre groupes.

Un second assemblage de quatre groupes de modèles est collé dans le prolongement du premier ; de la cire est déposée sur le joint (figure 9). On obtient ainsi une grappe d'une quarantaine de modèles. La grappe de modèles est ensuite insérée dans un support dont la base conique formera le haut du trou de coulée (figure 10).

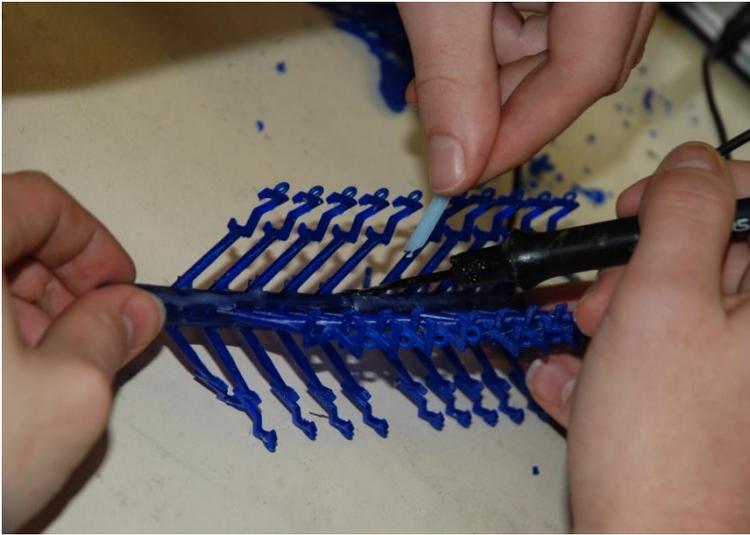


Figure 9 : Assemblage de la grappe complète et dépose de cire sur les joints

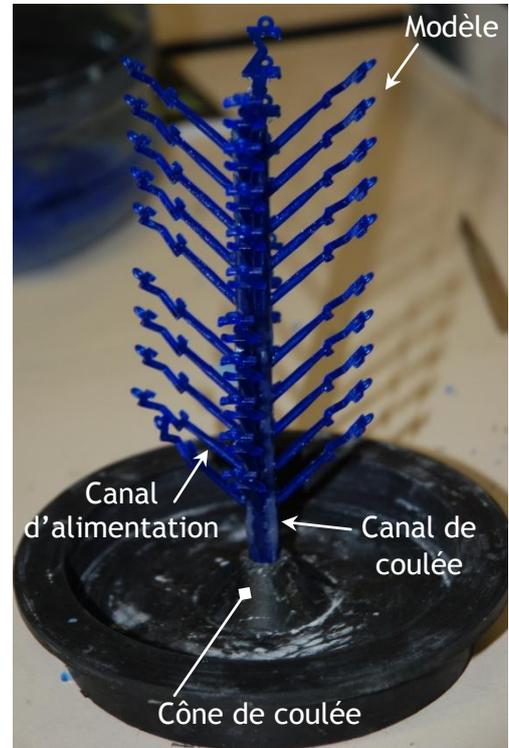


Figure 10 : La grappe de modèles sur son support

## 4 – Réalisation du moule

Le moule est réalisé en plaçant la grappe de modèles dans un cylindre rempli de barbotine, cela forme un moule bloc. Industriellement, il est possible aussi de plonger la grappe dans la barbotine à plusieurs reprises entre des phases de séchage ; on obtient ainsi une carapace de moins d'un centimètre d'épaisseur, limitant la quantité de barbotine utilisée (voir ressource « *Réalisation de pièces métalliques par prototypage en moulage à cire perdue* »).

### 4.1 - Préparation du cylindre de coulée

Le cylindre est enrobé d'adhésif, afin que la barbotine, lors de sa coulée, ne sorte par les trous par ailleurs nécessaires lors de la phase de cuisson. Le cylindre est posé sur le support, la grappe modèle bien centrée (figure 11 et 13). L'étanchéité de l'ensemble lors de la coulée de la barbotine est assurée par un joint de pâte à modeler (plasticine) posée entre le support et le cylindre enrobé (figure 12).



Figure 11 : Positionnement du cylindre sur le support de grappe



Figure 12 : Etanchéité support/cylindre



Figure 13 : Cylindre prêt à la coulée de barbotine

## 4.2 - Préparation de la barbotine

La barbotine est constituée de matières sèches et d'eau dans des proportions de 100 pour 31. Afin de connaître le volume de barbotine à préparer temps il faut calculer le volume à remplir ; le cylindre utilisé a un diamètre intérieur de 125mm et une hauteur à remplir de 200 mm.

$\phi$ cylindre [mm]	Hauteur à enrober [mm]	Volume total [L]	Masse totale [Kg]	Masse de plâtre [Kg]	Masse d'eau [Kg]
120	150	1,7	3,05	2,32	0,74
120	175	1,98	3,56	2,7	0,86
120	200	2,26	4,07	3,08	0,99
250	100	4,91	8,84	6,7	2,14
250	150	7,36	13,25	10,04	3,21
250	200	9,82	17,68	13,39	4,29
250	250	12,27	22,09	16,73	5,36
350	100	9,62	17,32	13,12	4,2
350	150	14,43	25,97	19,67	6,3
350	200	19,24	34,63	26,23	8,4
350	250	24,05	43,29	32,8	10,49
350	300	28,86	51,95	39,36	12,59
350	350	33,67	60,61	45,92	14,69

Figure 14 : Tableau des dosages des composants de la barbotine

Lors du séchage et de la cuisson du matériau réfractaire, les trous du cylindre de coulée laissent échapper l'excès d'eau sous forme de vapeur. Les jets de vapeur fusants lavent les pores de l'empreinte des résidus du modèle. L'excès d'eau évacué en vapeur, donc non impliqué dans l'hydratation du coulis réfractaire formant la barbotine, induit le taux de porosité. Il influe sur l'état de surface (rugosité des porosités). S'il y a moins d'eau, les porosités seront moindres et l'état de surface meilleur. Il apparait donc nécessaire de correctement doser les deux composants (figure 15).



Figure 15 : La matière sèche est pesée afin de doser précisément l'eau.

## 4.3 - Enrobage sous vide

Le cylindre avec le support et la grappe, est posé dans la cuve inférieure de l'enrobeuse (figures 16 et 18) en veillant à la position des modèles lors de la coulée afin d'éviter que la grappe ne soit directement sous le jet de chute du coulis et ne rompe. Le cylindre éclipable est positionné sur

la cuve inférieure, le couvercle transparent assure l'étanchéité. L'eau dosée se dépose au fond du cylindrique éclipable de l'enrobeuse. Un panier à matière sèche muni d'un malaxeur à bras opposé est installé sur le haut du cylindre éclipable, puis rempli de la quantité pesée de matière sèche (figures 17 et 18).



Figure 16 : Cylindre de coulée dans la cuve inférieure de l'enrobeuse



Figure 17 : Panier à matière sèche positionné dans le cylindre éclipable



Figure 18 : Enrobeuse

Le vide est commandé, en effet la coulée de la barbotine s'effectue à environ 0,97 atmosphère pour éviter la mise en ébullition de l'eau et la formation de bulles. La matière sèche descend en pluie dans l'eau ; le mélange est homogénéisé à la vitesse de 10 tr/min et durant une 30 secondes puis à 60 tr/min durant 2 min 30. Enfin la barbotine est coulée (figure 19).



Figure 19 : Coulée de la barbotine dans le cylindre contenant le modèle

Après quelques minutes, la barbotine est solidifiée, la plasticine est enlevée (figure 20). Si le moule ne doit pas être utilisé rapidement, sa cuisson est retardée en maintenant le cylindre plein sous plastique afin de conserver l'humidité nécessaire au lavage de l'empreinte.



Figure 20 : Solidification de la barbotine, élimination de la plasticine

#### 4.4 - Cuisson du matériau réfractaire ou céramisation

Le cylindre contenant la barbotine hydrolysée, est libéré de l'adhésif, le support de grappe est ôté (figure 21). Le cylindre est placé dans le four (figure 22), le futur trou de coulée vers le bas afin que le matériau de la grappe s'évacue ; le cylindre subit la cuisson dans le même sens qu'a été coulée la barbotine, il sera retourné pour la coulée de l'argent.

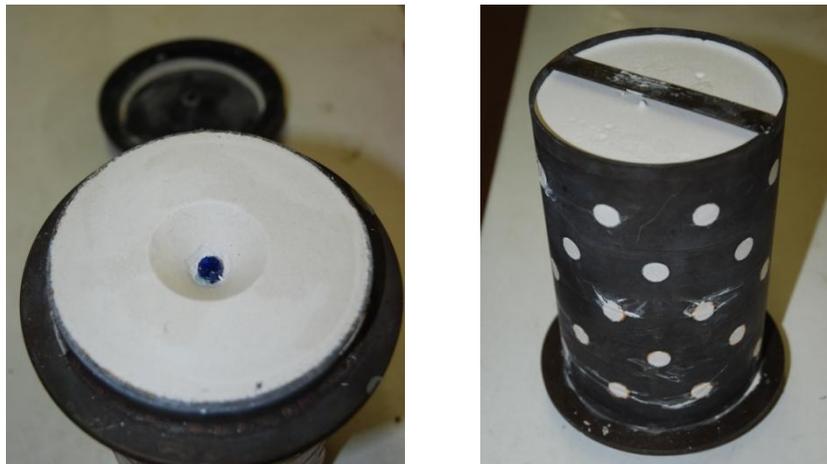


Figure 21 : Cylindre avant cuisson, grappe encore présente au centre du futur trou de coulée



Figure 22 : Le cylindre placé dans le four

La montée en température du moule, afin d'obtenir la fusion du modèle et la cuisson du matériau réfractaire, se fait avec des rampes et des paliers afin d'éviter les chocs. Le cycle de chauffe est le suivant (figure 23) :

- Première montée de la température ambiante à 100°C réalisée en 1 heure,
- Palier maintenu 2 heures,
- Deuxième montée de 100°C à 250°C réalisée en 1 heure,
- Palier maintenu 1 heure 30,
- Dernière montée de 250°C à 660°C réalisée en 4 heures,
- Palier maintenu 6 heures,
- Descente de température de 660°C à 510°C réalisée en 3 heures,
- Palier maintenu en attendant la coulée.

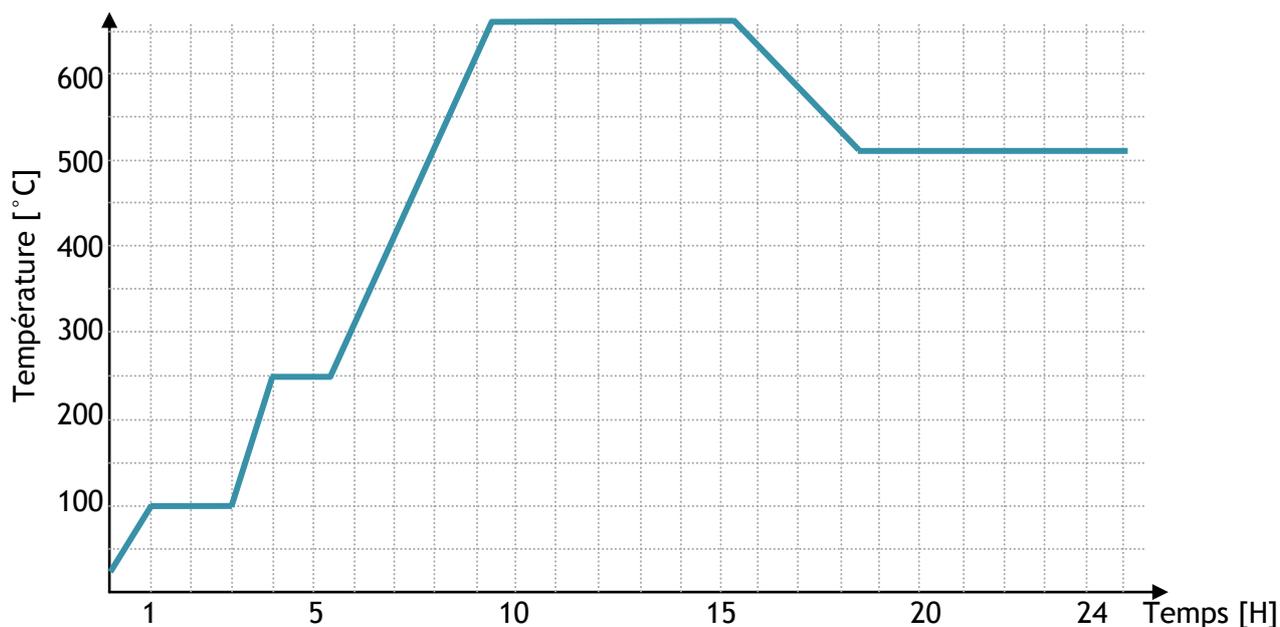


Figure 23 : Courbe de cuisson du moule

## 5 – Coulée de l'argent

Le four à creuset est mis en température à 1145°C et l'argent pesé afin de ne fondre que la quantité nécessaire (figure 24). L'argent est ensuite mis dans le creuset (figure 25) en prenant des précautions de sécurité élémentaires (blouse, tablier aluminisé, gants, pinces).



Figure 24 : Four à creuset mis en température et pesage de l'argent



Figure 25 : Insertion de l'argent dans le creuset à température (ce qui lui donne la couleur rougeoyante)

Le cylindre de coulée maintenu à 510°C est sorti du four juste avant la coulée et installé à proximité du creuset afin de limiter le temps de déplacement et donc de refroidissement du métal. Il faut couler vite pour ne pas risquer de solidification précoce empêchant la coulée complète.

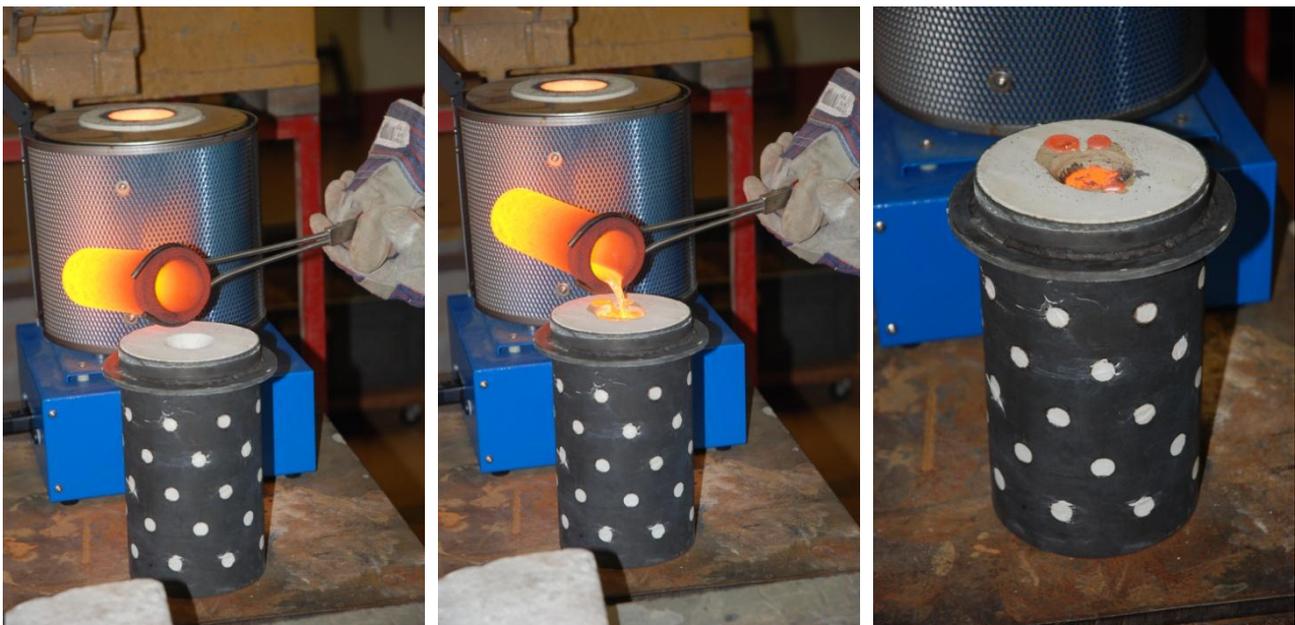


Figure 26 : Coulée de l'argent

Dans cette application, la coulée n'a pas été effectuée en dépression, c'est-à-dire sous vide partiel, le diamètre du cylindre aurait nécessité un réducteur pour pouvoir utiliser les moyens du laboratoire de fonderie. Couler en dépression permet d'assurer un remplissage optimal de l'empreinte.

## 6 – Décochage de la grappe

Après solidification et refroidissement partiel, le cylindre de coulée est trempé dans l'eau afin de désagréger le matériau réfractaire et récupérer la grappe moulée (figure 27). Dans l'industrie, cette opération se réalise après une nuit de refroidissement pour éliminer les risques de déformations, la grappe est dégagée à l'aide d'un jet d'eau sous puissante pression.



Figure 27 : Phase de trempage du cylindre de coulée et désagrégation du matériau réfractaire

La grappe est libérée, puis les médaillons sont décrochés des systèmes de coulée et d'alimentation (figure 28). Des opérations de finitions sont nécessaires : élimination du reste du système d'alimentation puis polissage. On remarque que l'argent s'est oxydé lors de sa phase de moulage, il retrouve sa couleur et son éclat aisément (figure 1).



Figure 28 : Grappe libérée du moule et un des médaillons décroché

## 7 – Conclusion

Le moulage à cire perdue est un procédé à moule non permanent (voir ressource « *Fonderie : éléments d'initiation* »). A l'image de la fonderie en sable (voir ressources « *Fonderie en sable : du modèle à la pièce* »), le moule réalisé est détruit pour récupérer la pièce moulée. Dans le moulage à cire perdue, le modèle mis en œuvre est aussi détruit, il ne sert que pour la réalisation d'un seul moule.



Figure 29 : Canaux de coulée et d'alimentation qui seront recyclés

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>