REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DU LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie

Département de Génie mécanique.

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master

Filière : **Génie mécanique**

Spécialité : Ingénierie des Matériaux et des surfaces

Etude Théorique Pour La Réalisation Des Pièces Métalliques Par Prototypage En Moulage à Cire Perdue.

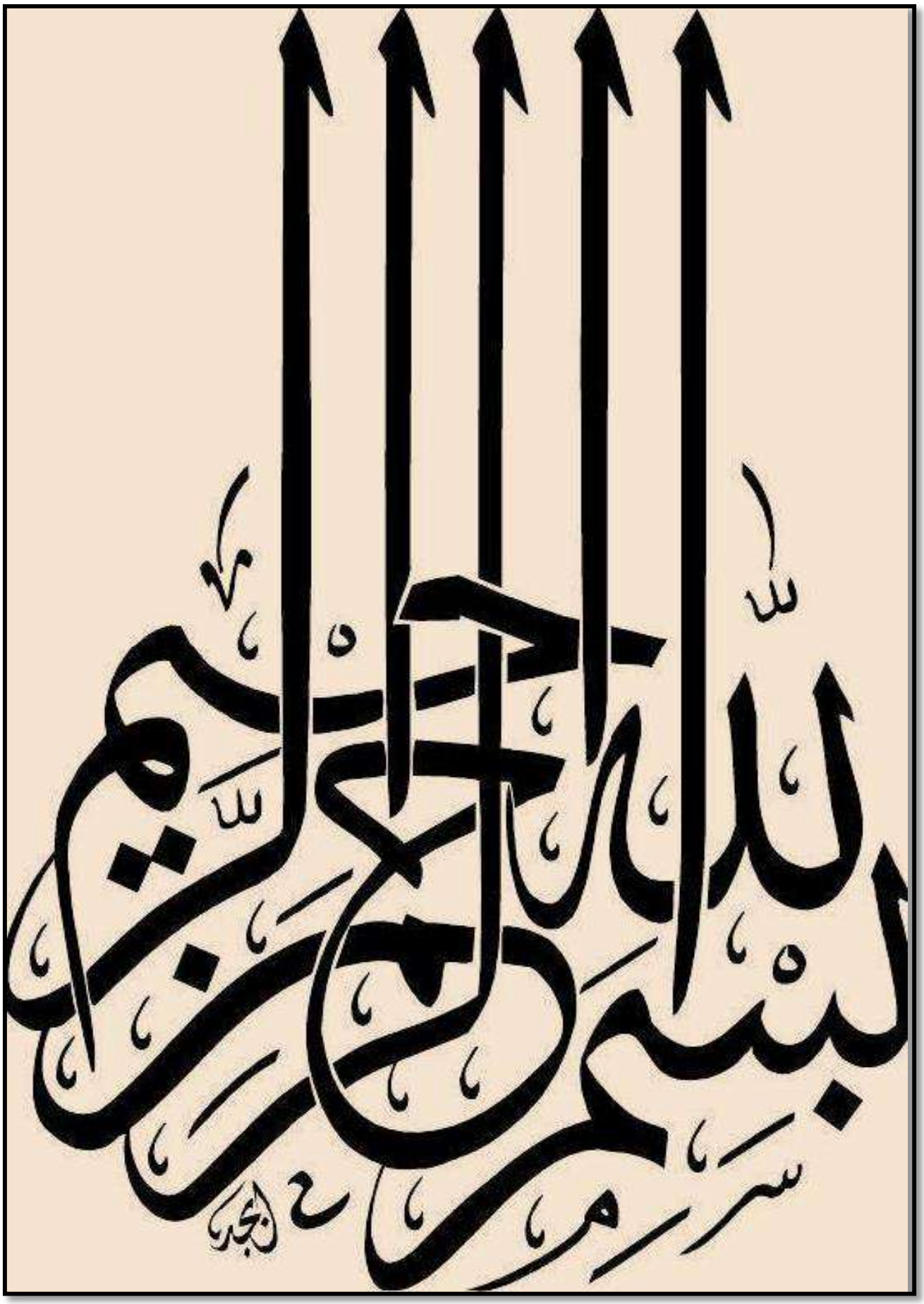
Présenté par :

- Lannab Racha
- Kherroubi Lokmane

Encadré par :

HABIRECHE Mohamed

Promotion 2021/2022


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

Tout d'abord, remercions Dieu qui m'a donné la santé et le pouvoir

de commencer et de terminer ce mémoire.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au Prof : **Mr. HABIRECHE Mohamed**

Directeur de ma recherche, pour la qualité de ses conseils, de sa vigilance et de sa disponibilité lors de la préparation du présent mémorandum, de ses conseils, de ses remarques et de sa patience, Mes profonds remerciements vont aussi à tous mes enseignants qui m'ont accompagné durant mon parcours scolaire et à toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin.

Remercie également tous les membres du jury qui ont accepté de lire ce modeste travail de recherche afin de l'évaluer. Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de ma famille et surtout mes parents que je tiens vivement à remercier.

Dédicace

Avant tous nous remercions DIEU le tout puissant car sans la foi qu'on a en lui on ne serait pas arrivé là ou est aujourd'hui.

À mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour,

La patience,

le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite.

Sans

eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui

Mon père : LANNAB MOHAMED.

Ma mère : AMMI FATIHA.

A mes très chers frères : RAFIK ; NASRE ELDDINE.

A mes très chères sœurs : IMANE , SARAH, MERIEM.

A toute la famille.

A tout les enseignants et les profs qui m'ont appris durant toutes mes années d'étude et

tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

A mes amies : MARWA, CHAIMAA.

Je dédie cet humble travail.

Racha.

Dédicace

Je dédie ce mémoire À :

Mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un Magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce Travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

À mon cher fils : Daia à Aldine.

À ma femme Ihessan.

À Toute la famille.

À tous mes amis.

Lokmane

Résumé :

La fonderie en cire perdue ou à modèle non permanant est issue des métiers d'art et en particulier de la duplication de sculptures en bronze. Cette technique est principalement utilisés pour la réalisation des pièces de formes complexes, nécessitant un excellant état de surface et une précision dimensionnelle très élevée, elle permet de diminuer le recours à l'usinage et donc de réduire les couts. Ce procédé s'applique tout particulièrement à la fonderie des matériaux à haut point de fusion impossible dans des moules métalliques. Cette fonderie à haut point de fusion nécessite un moule en matériau réfractaire (céramique).

Cette étude est focalisée sur la description des détaille des 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.

Summary:

Lost wax foundry or non-permanent casting originates from fine crafts and in particular from the duplication of bronze sculptures. This technique is mainly used for the production of parts with complex shapes, requiring an excellent surface finish and very high dimensional precision, it reduces the need for machining and therefore reduces costs. This process is particularly applicable to the foundry of materials with a high melting point that is impossible in metal moulds. This high melting point foundry requires a mold made of refractory material (ceramic).

This study is focused on the description of the details of the different phases of production of lost wax castings, from the preparation of the cluster and the materials, to the shakeout of the part, through the development of the mold and the casting.

mots clé: pièces Métaliques, prototypage, Moulage, Cire Perdue.

الملخص:

يعتبر الصب بالشمع المفقود أو صب النماذج غير الدائمة من الحرف اليدوية الجميلة وخاصة من نسخ المنحوتات البرونزية. تُستخدم هذه التقنية بشكل أساسي لإنتاج الأجزاء ذات الأشكال المعقدة، والتي تتطلب حالة سطح تشطيبًا ممتَّازة للسطح ودقة أبعاد عالية جدًا، فهي تقلل من الحاجة إلى التصنيع وبالتالي تقلل التكاليف. هذه العملية قابلة للتطبيق بشكل خاص على مسبك المواد ذات درجة انصهار عالية وهو أمر مستحيل في القوالب المعدنية. يتطلب المسبك ذو نقطة الانصهار العالية قالبًا مصنوعًا من مادة مقاومة للحرارة (السيراميك).

تركز هذه الدراسة على وصف تفاصيل المراحل المختلفة لإنتاج مصبوبات الشمع المفقود ، من تحضير الكتلة والمواد ، إلى اهتزاز الجزء ، من خلال تطوير القالب والصب.

SOMMAIRE :

Introduction générale.

Introduction générale : 1

Chapitre I : Le Moulage.

I.1 Introduction : 3

I.2 Informations générales sur les fonderies : 4

I.2.1 Industrie de la fonderie : 4

I.3 Définition de moulage :..... 5

I.4 Principe de moulage :..... 5

I.4.1 Les étapes du moulage semblent simples : 6

I.5 Description des procédés de moulage : 6

I.6 Les Types de moulage : 7

I.6.1 Moulage en moule permanent : 7

I.6.1.1 Éléments d'un moule permanent : 8

I.6.1.2 Thermique du moulage permanent : 9

I.6.1.3 Marchés du moulage en moule permanent : 10

I.6.1.4 Avantages et capacités du moulage en moule permanent : 10

I.6.1.5 Type de Moulage permanent : 36

I.6.2.1 Type de moulage non permanent :..... 36

CHAPITRE II : Techniques Appliquées Dans Le Moulage.

II.1 Les Etapes de Réalisation d'un Modèle pour Pièces Fonderie :..... 44
II.1.1 Choisir le procédé de moulage :..... 44
II.1.1.1 En fonction de la nature de l'alliage coulé :..... 44
II.1.1.2 En fonction du nombre minimal de pièces à produire……..44
II.1.1.3 En fonction du poids de la pièce en Kg et de son matériau :……45
II.1.1.4 En fonction de l'épaisseur de la pièce et de son matériau : 45
II.1.1.5 En fonction de la rugosité et l'intervalle de tolérance : 46
II.1.2 la réalisation des croquis de la pièce brut, du modèle et du noyau :... 46
II.1.2.1 Organigramme de réalisation d' un modèle et moule fonderie :……...47
II.1.3 Surépaisseur d'usinage : 48
II.1.3.1 Classes et valeurs de surèpaisseurs d'usinage : 50
II.1.4 Examen des formes réalisables par coulée : 51
II.1.5 Choix du sens de moulage et du plan de joint : 52
II.1.5.1 Les critères principaux pour le choix du plan de joint ($P_d J$) :..... 53
II.1.6 Ajout de la dépouille :..... 63
II.1.7 Le Retrait :..... 65
II.1.7.1 Définition : ……..65
II.1.7.2 Instrument d'exécution…….65
II.1.7.3 Solutions pour application……...66
II.1.7.4 Défauts engendrés par le retrait……...67
II.1.8.Stabilité des Noyaux Remoulés (LES PORTEES) :..... 71
II.1.9. Châssis : 73

Chapitre III : Le Procédé de fonderie cire perdu.

III.1 Définition: 75

III.2 Un peu d'histoire: 75

III.3 Les différentes étapes du procès de fabrication en fonderie cire perdue: ... 76

III.3.1 La fabrication du modèle en cire : 77

III.3.2 La mise en grappe: 78

III.3.3 Le dégraissage ou le lavage de la grappe: 79

III.3.4 La réalisation de la carapace: 80

III.3.5 Le décirage: 82

III.3.5.1 Recyclage de la cire : 83

III.3.6 Le frittage de la carapace: 83

III.3.7 La coulée du métal: 85

III.3.8 Refroidissement: 85

III.3.9 Les opérations de parachèvement: 86

III.3.9.1 Décochage et finition: 86

III.3.9.2 Découpe des pièces et grenaillage : 87

III.3.9.3 Finitions: 87

III.4 Types de pièces : 87

III.5 Matériaux : 88

III.6 Avantages : 88

III.7 Cas d'utilisations les plus intéressants : 90

Conclusion Générale.

Conclusion Générale : 94

Bibliographie : 96

Listes des Symboles et des Abréviations :

A :	Surface projetée.
Al :	Aluminium.
C :	Carbone.
°C :	Degré Celsius.
C :	La cote correspondante de la pièce en mm.
(CND) :	Contrôle non destructive.
Cr :	Chrome.
Cu :	Cuivre.
D :	Moulage sous pression.
3D :	Impression 3D.
E_P :	Epaisseur.
F :	La force exercée par le métal.
Fe :	Fer.
H :	Hydrogène.
H :	Hauteur.
IT :	Tolérance.
K :	Moulage en coquille.
Kg :	Kilogramme.
KOH :	Potassium.

L :	Longueur.
L :	Moulage de précision (cire perdue).
l :	Largeur.
M :	La cote du modèle en mm.
Mg :	Magnésium.
Mn :	Manganèse.
Mo :	Molybdène.
NaOH :	Hydroxyde de sodium.
Ni :	Nickel.
P :	Phosphore.
P_a :	pression.
Pb :	Plomb.
(P_d J) :	Plan de joint.
Pint :	La pression d'intensification.
R :	Le retrait du métal de la pièce en %.
R_a :	Rugosité.
S :	Moulage au sable.
Si :	Silicium.
Sn :	Etain.
t :	Temps.
T1 :	Traitement de vieillissement.

T_0 :	Température 0.
T_1 :	Température 1.
Ti :	Titane.
$(V_0 – V_1)$:	Contraction.
W :	Tungstène.
Zn :	Zinc.
γ :	Degré.
µm :	Micromètre.
Ø :	Diamètre.

Liste des figures

CHAPITRE I : Le Moulage.

Figure I. 1 : Parts de marché sectorielles relatives.....5

Figure I. 2 : Éléments d'un moule permanent pour bloc à gradin (procédé basse pression). 9

Figure I. 3 : (a) Coquille; (b) Pièce obtenue en alliage d'aluminium (Al Si9 Cu3 Mg)……..11

Figure I. 4 : Exemple de coquille.....13

Figure I. 5 : Exemple de coquille en deux parties et un noyau. 13

Figure I. 6 : Pièce en alliage d'aluminium (Al Si9 Cu3 Mg) moulée en coquille. 14

Figure I. 7 : Moulage par gravité en coquille (a) coulée ; (b) pièce.....15

Figure I. 8 : (a) coulée de l'alliage d'aluminium en fusion ; (b) sortie de la pièce.....16

Figure I. 9 : Exemple d'un outillage coquille pour fonderie aluminium. 19

Figure I. 10 : Moulage sous pression à chambre chaude. 24

Figure I. 11 : Moulage sous pression à chambre froide. 25

Figure I. 12 : Pièces réalisées par moulage sous pression. 26

Figure I.13 : Remplissage manuel du conteneur et début de l'injection.....27

Figure I. 14 : Éléments d'un moule sous pression. 28

Figure I. 15 : Éléments d'une presse sous pression. 29

Figure I. 16 : Moteur et réservoir hydraulique à arrière de la presse. 29

Figure I. 17 : Schéma de machine de coulée continue horizontale. 35

Figure I. 18 : Principe du moulage en sable. 37

Figure I. 19 : Principales étapes du procédé de moulage au sable. 39

Figure I. 20 : les moules au sable. 40

CHAPITRE II : Techniques Appliquées Dans Le Moulage.

Figure II. 1 : Etude d'un dessin finie. 46

Figure II. 2 : Dessin d'usinage d'une pompe à eau. 48

Figure II. 3 : Dessin de la dimension de la pièce cotée. 49

Figure II. 4 : Dessin de la dimension de pièce cotée hauteur. 49

Figure II. 5 : Dessin de pièce au niveau du plan. 60

Figure II. 6 : Choix du plan de joint évitant la bavure. 60

Figure II. 7 : Pièce brute. 64

Figure II. 8 : La dépouille. 64

Figure II. 9 : Mécanisme de formation de retassure. 67

Figure II. 10 : Les différents types de retassures. 68

Figure II. 11 : Mécanisme de formation de retassure en moule fermé. 69

Figure II. 12 : Refroidisseur externe. 69

Figure II. 13 : Refroidisseur interne 70

Figure II. 14 : Dessin de Figure Masselotte. 70

Figure II. 15 : Dimensionnement du noyau. 72

Chapitre III : Le Procédé de fonderie cire perdu.

Figure III. 1 : Exemples de pièces de fonderie cire perdue. 76

Figure III. 2 : Etapes du process de fabrication de pièces de fonderie cire perdue. 76

Figure III. 3 : fabrication additive de modèles en cire pour la fonderie de précision..... 77

Figure III. 4 : Réalisation d'un modèle en cire par injection dans un moule métallique. 78

Figure III. 5 : (a) Modèle en grappe ;(b) Exemple d'un modèle pièce unique. 79

Figure III. 6 : Grappe multi-empreintes en cire fonderie cire perdue..... 79

Figure III. 7 : Opération de dégraissage de la grappe en moulage cire perdue. 80

Figure III. 8 : a) ligne de trempage automatique ;b) Trempage manuel..... 81

Figure III. 9 : Carapaces en céramique formées..... 82

Figure III. 10 : Autoclave de décirage des grappes en cire perdue. 82

Figure III. 11 : Frittage de carapace. 84

Figure III. 12 : Coulée des carapaces en céramiques. 85

Figure III. 13 : Refroidissement de la grappe..... 86

Figure III. 14 : Comparaison entre pièce obtenue par moulage sable et cire perdue. 89

Figure III. 15 : Etat de surface d'un Couple d'arrêt e Pièce utilisée dans le médical. 89

Figure III. 16 : Différents types de pièces selon leurs poids obtenues par cire perdue. 90

Figure III. 17 : Cas d'exemple..... 91

Figure III. 18 : Hélice d'un concasseur, pièce d'usure, qui doit donc être très dure. 91

Figure III. 19 : Exemple de pièces complexes. 92

Figure III. 20 : Pièce réalisée sans plan..... 92

Figure III. 21 : Réalisation de bague. 93

Liste des Tableaux :

Chapitre I : Le Moulage.

Tableau I. 1 : Les types de moulage. 7

Tableau I. 2 : Matériaux de la coquille en fonction du matériau coulé. 17

Tableau I. 3 : Avantages et inconvénients du moulage en coquille par gravité. 23

Tableau I. 4 : Alliages principaux pour le moulage sous pression traditionnel.....32

Tableau I. 5 : Alliage sous pression pour applications structurales.....33

Tableau I. 6 : Avantages et inconvénients du moulage sous pression.....34

Chapitre II : Techniques Appliquées Dans Le Moulage.

Tableau II. 1 : Nature de l'alliage coulé en fonction du procédé de moulage. .....…..44

Tableau II. 2 : Nombre minimal de pièces à produire en fonction du procédé de moulage..44

Tableau II. 3 : Poids de la pièce et de son matériau en fonction du procédé de moulage. 45

Tableau II. 4 : Epaisseur de la pièce et son matériau en fonction du procédé de moulage. ...45

Tableau II. 5 : la rugosité et l'intervalle de tolérance en fonction du procédé de moulage. ...46

Tableau II. 6 : Organigramme de réalisation d'un modèle et moule fonderie.....47

Tableau II. 7 : classes de surépaisseurs d'usinage spécifiées pour pièce moulée brutes.....50

Tableau II. 8 : surèpaisseurs d'usinage spécifiées.....51

Tableau II. 9 : valeurs de dépouille. 64

Tableau II. 10 : Différents types de châssis.....73

Introduction Générale :

Introduction générale :

La fonderie en cire perdue ou à modèle non permanent est issue des métiers d'art et en particulier de la duplication de sculptures en bronze. C’est une technique très ancienne qui permet de reproduire des objets en trois dimensions.

Ce procédé est aujourd'hui utilisé dans de nombreux domaines comme l'aéronautique (aubes de turbines, ferrure, etc.), le bio médical (prothèses dentaires, orthopédiques), la mécanique, la bijouterie, l'agro-alimentaire, les sports et loisirs, ... Cette technique est principalement utilisée pour des réalisations de pièces de formes complexes, nécessitant un excellent état de surface et une précision dimensionnelle très élevée. Elle permet de diminuer le recours à l'usinage et donc de réduire les coûts.

Cette étude a pour objectifs de présenter le processus d'obtention de pièces par moulage à la cire perdue, les différentes étapes du procédé sont exposées ainsi que les techniques employées selon la taille de la série de pièces à produire.

CHAPITRE I :

Le Moulage

I.1 Introduction :

Les organes et pièces constituants les machines et appareils proviennent de sources diverses de fabrication tels que forgeage, usinage, estampage, fonderie etc. La technique de fonderie est la plus souvent utilisée car elle est non seulement économique mais :

- Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés).
- Obtention de pièces massives telles que bâtis, volants etc.

Dans la spécialisation de la fonderie, on distingue pratiquement les fonderies suivantes :

a. La nature des métaux et alliages :

Fonderie de fonte ;

Fonderie d'acier ;

Fonderie d'aluminium et ses alliages ;

Fonderie de cuivre. Bronzes, laitons, etc.

b. Selon l'utilisation :

Fonderie d'art ;

Fonderie d'ornement (bijoux) ;

Fonderie de mécanique industrielle.

c. Selon le procédé de moulage :

Moulage en sable (manuel ou mécanique) ;

Moulage en carapaces ;

Moulage à la cire perdue ;

Moulage en coquilles (moule permanent).

I.2 Informations générales sur les fonderies :

I.2.1 Industrie de la fonderie :

Les fonderies font fondre des métaux ferreux et non ferreux et des alliages et les refaçonnent en produits de forme finie ou quasi finie par l'intermédiaire de la fonte en poche et de la solidification du métal fondu ou de l'alliage dans un moule. L'industrie de la fonderie est une industrie différenciée et diverse. Elle consiste en un large éventail d'installations, de la plus petite à la plus grande taille ; chacune avec une combinaison de technologies et d'opérations de l'unité de production choisies pour correspondre à l'intrant, la taille de la série et le type de produit fabriqué dans l'installation spécifique. L'organisation au sein du secteur est basée sur le type d'intrant de métal, la distinction principale étant faite entre les fonderies ferreuses et non ferreuses. La fonte de métal est une activité ancienne qui remonte à plus de 3000 avant Jésus Christ.

Le développement de l'industrie de la fonderie est lié à la fois au développement de l'industrie du métal et au développement de l'industrie automobile. Les fonderies actuelles ont souvent une histoire qui remonte au début du 20ème siècle. Les principaux débouchés de l'industrie de la fonderie sont les secteurs de la construction automobile, générale, et mécanique. Les parts relatives de ces secteurs en tant que débouchés pour l'industrie de la fonderie sont représentées sur la (figure I.1). La forte dépendance vis-à-vis du secteur de la construction automobile a une influence majeure sur les activités du secteur de la fonderie, et concerne divers aspects, tels que l'économie, les normes de qualité, les nouveaux développements, etc. Un exemple de cette dépendance se trouve dans le fait que le glissement opéré par l'industrie automobile vers des véhicules plus légers se reflète dans l'industrie de la fonderie par un accroissement de la demande concernant la fonte d'aluminium et de magnésium, permettant ainsi la croissance de ces secteurs. [1]

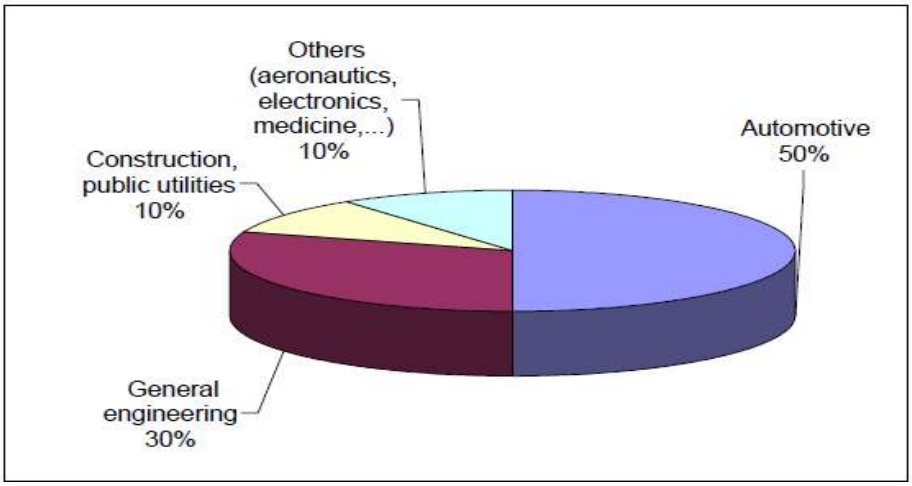


Figure I.1 : Parts de marché sectorielles relatives. [1]

I.3 Définition de moulage :

Le moulage est l'action de prendre une empreinte qui servira ensuite de moule dans lequel sera placé un matériau et qui permettra le tirage ou la production en plusieurs exemplaires d'un modèle. Le moulage consiste donc à placer un matériau (liquide, pâte, poudre, feuille, plaque, paraison, préforme, pastille, etc.) dans un moule dont il prendra la forme. On a plusieurs types de moulage :

- Moulage en sable ;
- Moulage métallique ou moulage permanent ;
- Procédés spéciaux de moulage. [6]

I.4 Principe de moulage :

Le moulage des métaux consiste à verser du métal fondu dans un moule réalisé selon la pièce à produire, à le laisser solidifier puis à récupérer la pièce en métal. Pour une bonne compréhension du procédé, quelques principes physiques entrant en jeu doivent être compris. Il s'agit essentiellement du flux de métal lors du remplissage du moule, de la solidification et du refroidissement du métal et de l'influence du matériau qui constitue le moule. [2]

I.4.1 Les étapes du moulage semblent simples :

1. Fondre le métal ;
2. Le verser dans le moule ;
3. Le laisser refroidir. [2]

I.5 Description des procédés de moulage :

Le moulage consiste à fabriquer un moule dans lequel le métal fondu sera coulé. Certains moules peuvent avoir besoin d'avoir des propriétés particulières pour produire des pièces coulées de haute qualité. Le choix du moulage (au sable, par gravité en coquille, coulée sous pression, coulée sous basse pression, cire perdue, etc.) est aussi dicté par des considérations économiques liées à la taille, à la forme des pièces ainsi qu'à l'importance des séries. Les abréviations suivantes sont utilisées pour désigner les différents procédés de moulage selon la norme NF EN 1706 :

S : moulage au sable ;

K : moulage en coquille ;

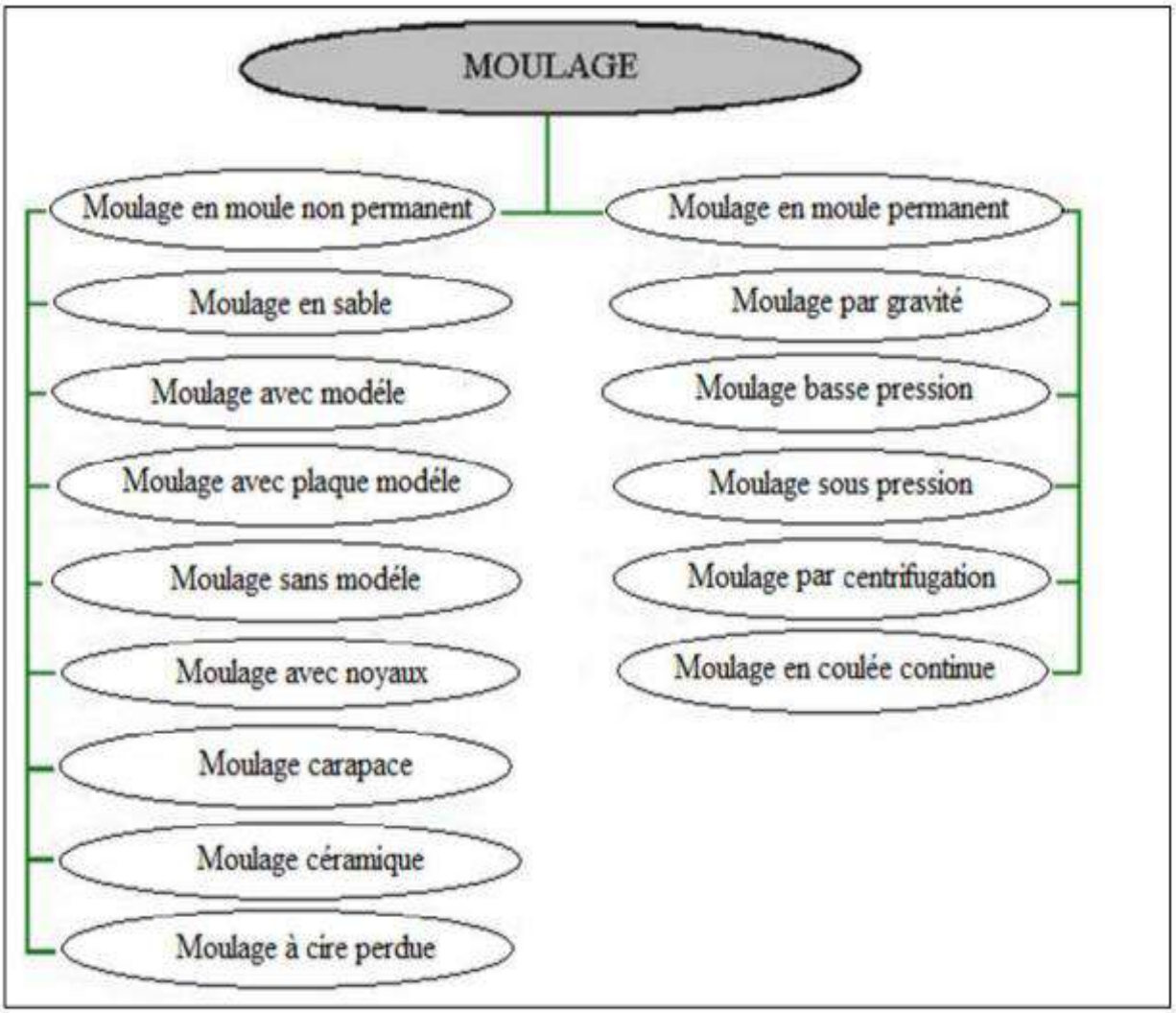
D : moulage sous pression ;

L : moulage de précision (cire perdue). [1]

I.6 Les Types de moulage :

- La figure ci-dessous illustre les différents types de moulage existant : [2]

Tableau I.1 : Les types de moulage. [2]



I.6.1 Moulage en moule permanent :

Les techniques de moulages en moules permanents se basent sur l'utilisation des moules en métal généralement en acier ou en fonte. Les deux méthodes principales entrant dans cette catégorie se différencient par la manière dont le moule est rempli de métal fondu. Il peut être versé, remplissant le moule par gravité, ou injecté sous pression. Il existe également d'autres méthodes de moulage en moules permanents, comme le moulage par centrifugation.

Ces méthodes sont caractérisées par un faible coût de production, mais un investissement initial important. Elles conviennent donc particulièrement à la production de grandes séries.

L'utilisation de moules en métal restreint le choix des alliages pouvant y être coulés à ceux dont le point de fusion est inférieur à celui du métal du moule. Les plus courants sont les alliages de zinc, cuivre, aluminium ou magnésium, mais également les aciers et les fontes, suivant le moule utilisé.

Les pièces obtenues sont précises, grâce à la grande rigidité du moule et présentent de bons états de surface. [2]

I.6.1.1 Éléments d'un moule permanent :

Le moule permanent (figure I.2) est constitué dans la majorité des cas de deux coquilles métalliques en alliage ferreux. Selon le nombre de pièces prévues, les matériaux utilisés pour la fabrication des coquilles sont :

- La fonte grise (séries de 1000 unités et moins) ;
- L'acier au carbone de type 1020,1045 ou l'acier allié 4140 ;
- L'acier à outil de type H13.

Le moule contient aussi des tiges d'éjection en acier trempé qui sont montées sur une plaque mobile qui sert au démoulage de la pièce après la solidification et un temps de prise raisonnable pour sortir la pièce sans la déformer. La plaque mobile est reliée à un cylindre hydraulique actionné après le temps de prise. La plaque retourne à sa position initiale à la fermeture du moule soit par le cylindre hydraulique ou par l'intermédiaire d'une contre tige qui repousse la plaque et les tiges lors de la fermeture du moule. Des noyaux mobiles actionnés par des cylindres hydrauliques sont utilisés pour les parties latérales qui ne se démoulent pas dans le sens de l'ouverture ou pour les cavités. Si le moule utilise des inserts pour le surmoulage ou des noyaux en sable, le moule comportera des portées pour placer ces éléments. Le moule et les boîtes à noyaux (si utilisées) appartiennent au client.

Le dernier élément du moule est l'ajout des poteyages. Ceux-ci sont à base de produits réfractaires isolants (mica, mullite, talc) servant à protéger le moule et ralentir la solidification ou encore lubrifiants et conducteurs de chaleur (graphite, nitrure de bore) servant à accélérer la solidification et assister au démoulage. Le choix du poteyage isolant ou conducteur permet

de définir un profil thermique dans le moule afin de promouvoir la solidification dirigée. Le poteyage est appliqué hors ligne avant le début de la production puis entretenu par application pendant la campagne de coulée. Le poteyage donne un bon fini de surface de 125 micro pouces RMS et plus une certaine rugosité aide à évacuer l'air à l'interface moule-métal. [3]

- On schéma ci-dessous présenter la (figure I.2) suivante :

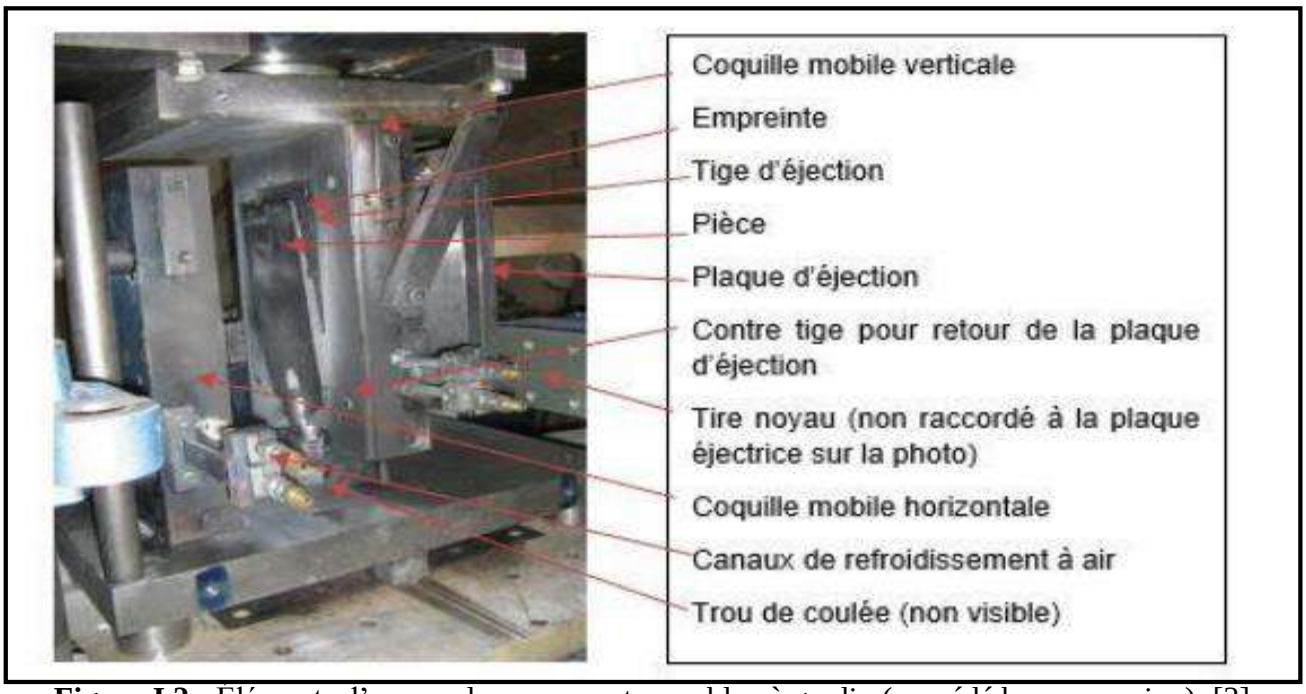


Figure I.2 : Éléments d'un moule permanent pour bloc à gradin (procédé basse pression). [3]

I.6.1.2 Thermique du moulage permanent :

Le défi du procédé est d'obtenir un profil thermique de moule assurant la solidification dirigée. On y parvient par :

Une température de coulée stable établie par une cadence de coulée régulière qui permet de conserver la température du moule stable (autour de 400°C. Ce cycle est : fermeture du moule, coulée, temps de solidification, temps de prise (assez long pour obtenir un gain de propriétés mécaniques et éviter les déformations au démoulage, mais aussi court pour éviter la fissuration dans le moule), ouverture du moule et démoulage, opérations d'entre coulée et attente avec moule ouvert si requis un contrôle local de l'extraction de chaleur assuré par le choix des éléments :

- Poteyages isolants ou conducteurs l'usage de canaux refroidis à l'air comprimé ou par un fluide ;

- Caloporteur des matériaux plus conducteurs comme un alliage cuivreux (carbone aluminium afin d'éviter la dissolution du cuivre dans l'aluminium) ;
- Peuvent être insérés dans le moule à certains endroits. [3]

I.6.1.3 Marchés du moulage en moule permanent :

En résumé le procédé offre les caractéristiques économies de la fabrication des moules au sable si la quantité le permet suivantes :

- Bonnes tolérances dimensionnelles, bon fini de surface plus rugueux ;
- Plan de joint peu visible. Optimisé pour les moyennes à fortes séries ;
- Usinage requis après le moulage, mais certains détails fonctionnels ;
- Comme des hauteurs ou longueurs. Tous de détails fonctionnels peuvent être moulés sans usinage ;
- Adapté à la production de pièces simples à moyennement complexes ;
- Avec un degré de liberté de conception plus limité, aussi limité au niveau des alliages.

Le marché du moulage en moule permanent est centré sur les pièces de séries. L'usage structural est possible après traitement thermique. On trouve des pièces commerciales : attaches, boîtiers, pièces d'équipement électrique, attaches structurales, pièces automobiles structurales (piston, tête de moteur, roue en aluminium). [3]

I.6.1.4 Avantages et capacités du moulage en moule permanent :

Le moulage en moule permanent offre les meilleures propriétés mécaniques parmi les procédés de moulages à partir du métal liquide surtout les procédés par basculement et basse pression où la turbulence du remplissage est limitée. Ceci est dû à l'absence d'inclusion et au refroidissement rapide du métal. Le procédé permet la coulée de parois minces et épaisses. Les tolérances dimensionnelles sont meilleures qu'en moulage au sable, car le moule ne change pas de dimension avec le temps. La perte au niveau des tolérances est liée à l'utilisation d'un poteyage neuf en début de campagne et à l'accumulation de poteyage dans l'empreinte du moule pendant la campagne de coulée. La conception de la pièce doit tenir compte du mouvement des deux coquilles au démoulage. En général le procédé devient plus économique que le procédé au

sable à partir de 3000 unités pour les petites pièces. Si la quantité de pièces dépasse les 10 000 pièces, il faut envisager le moulage sous pression si la géométrie est adaptée et que la pièce n'est pas trop épaisse. Un moule permanent peut avoir une durée de vie de 10 000 à 100 000 pièces. Un autre avantage est l'élimination de défauts dû au sable de fonderie. Finalement le procédé est écologique en ce sens qu'il présente une économie en énergie de préparation du sable et n'émet aucun gaz nocif. [3]

I.6.1.5 Type de Moulage permanent :

1) Moulage par gravité (en coquille) :

Procédé très ancien, le moulage en coquille consiste à obtenir une pièce à partir d'un moule métallique, appelé coquille, constitué d'éléments assemblés dans lesquels une cavité ayant la forme extérieure de la pièce a été réalisée (figure I.3). Dans cette cavité dénommée empreinte, l'alliage liquide est versé par l'intermédiaire d'un orifice de remplissage. 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, soit, suivant le principe des vases communicants, de bas en haut, dite en source. [4]



(a) (b)

Figure I.3 : (a) Coquille éclatée avec ses broches ;(b) Pièce obtenue en alliage d'aluminium (Al Si9 Cu3 Mg). [4]

a) Définition :

Le moulage en coquille par gravité offre plusieurs avantages, principalement une production rapide et constante dans le temps, la possibilité de grandes séries à de grandes cadences, et une mise en forme de pièces aux formes complexes, au plus près de la pièce finie.

- Le procédé de moulage en coquille permet :

- Précision et constance dans les dimensions des pièces ;
- Une simplification et une réduction de l'usinage (même s'il est difficile de supprimer complètement l'usinage) ;
- La possibilité d'utiliser des noyaux en sable afin de réaliser les pièces de formes internes complexes ;
- Des caractéristiques mécaniques améliorées par rapport à un moulage en sable. Ces améliorations sont dues au refroidissement plus rapide de l'alliage coulé contre les parois métalliques du moule.

- Ce procédé de moulage convient plus particulièrement :

- Aux moyennes et grandes séries, dans le cas de pièces simples, la rentabilité peut être obtenue à partir d'une série de 500 pièces et en général pour des quantités de 2000 pièces en moyenne. ;
- A la fabrication de pièces sollicitées exigeant un alliage à traitement thermique ;
- Aux alliages à bas point de fusion (alliage d'aluminium par exemple). [4]



Figure I.4 : Exemple de coquille. [4]

b) Le principe du procédé :

La forme de la pièce à obtenir est donnée par l'empreinte constituée par la surface interne du moule. Les formes intérieures de la pièce sont obtenues à l'aide de noyaux en sable, ou encore de noyaux ou broches métalliques (figures I.5). [4]

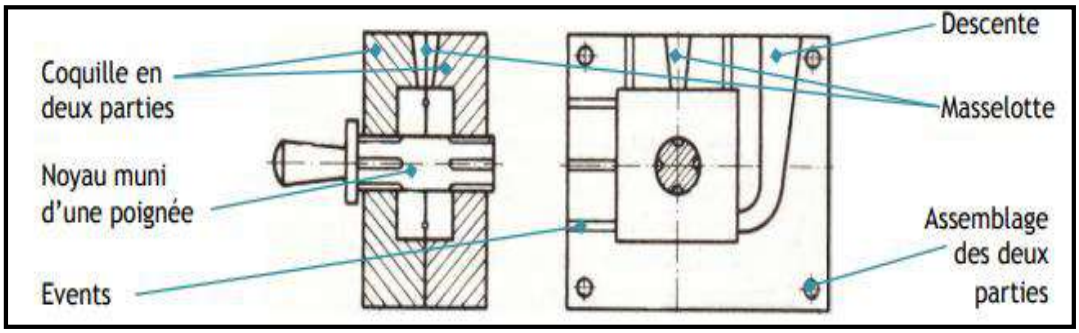


Figure I.5 : Exemple de coquille en deux parties et un noyau. [4]

Le plus souvent, cette cavité comporte également le, ou les canaux d'alimentation, appelés« descentes » et, le ou les canaux d'évacuation de l'air, appelés « évents ». Le métal qui se solidifie dans ces canaux est séparé ultérieurement de la pièce proprement dite au cours de l'ébarbage. Au cours de la solidification, le métal subit généralement une contraction dite contraction de solidification. La réduction de volume correspondante doit être compensée par un apport de métal : cet apport est réalisé par des « masselottes » qui constituent des réserves de métal liquide au-dessus des parties à nourrir. La position de ces réserves liquides, en charge au-dessus des pièces, leur donne la possibilité de vaincre certaines résistances à l'écoulement en fin d'opération (figures I.6 et I.7). Cette action est toutefois de faible intensité et beaucoup plus restreinte qu'on ne le croit parfois. La charge est à déterminer pour chaque pièce et en fonction du métal coulé.

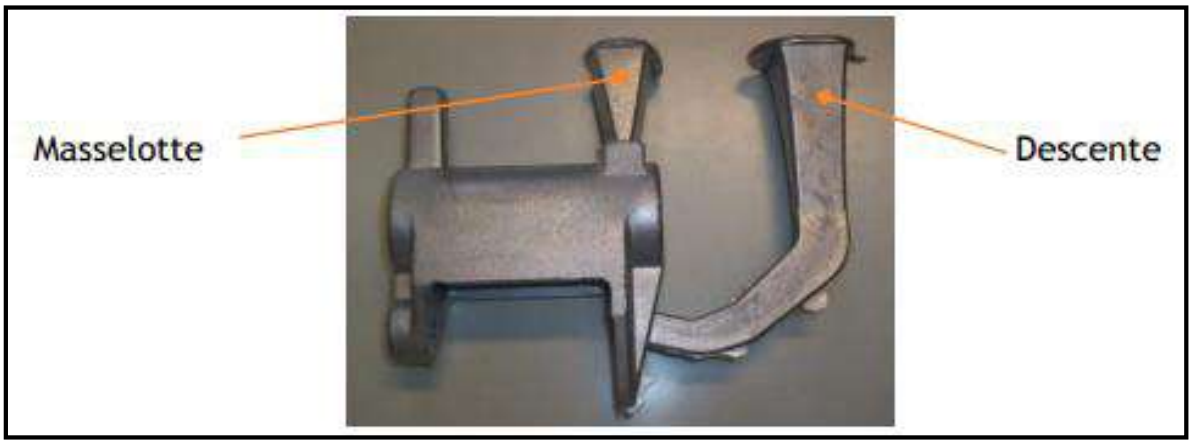


Figure I.6 : Pièce en alliage d'aluminium (Al Si9 Cu3 Mg) moulée en coquille. [4]

Après solidification de l'alliage, la pièce est extraite de la coquille aussi celle-ci doit être composée de parties démontables et séparables de la pièce coulée. Chaque partie de la coquille en contact avec la pièce, doit être munie d'un angle de dépouille afin d'assurer le démoulage. L'étanchéité du moule est réalisée par la juxtaposition d'éléments à surface de joint rectifiée, maintenus appliqués les uns contre les autres par des systèmes de fermeture efficaces.

Le moulage d'une pièce métallique est donc réalisée par les chapes du moule, autrement dit les blocs constituants l'empreinte, et par là les formes extérieures de la pièce. Les chapes sont mobiles et nécessitent un positionnement relatif. Les formes intérieures de la pièce moulée sont réalisées par des noyaux généralement métalliques, ils sont mobiles ; il faut prévoir leur guidage et centrage et s'assurer qu'ils restent en place durant la coulée. Pendant

la coulée du métal en fusion, il est nécessaire de maintenir les chapes en position pour éviter leur déplacement sous l'action de la poussée du métal.

La coulée en coquille par gravité offre des possibilités importantes, en particularité la réalisation des pièces aux formes complexes. Cependant dans la pratique cette technique est limitée par les tracés des pièces : épaisseurs très faibles ou très fortes, formes très complexes… Les principales règles de tracé sont présentées dans la ressource « Le moulage en coquille par gravité : règles de base ». [4]

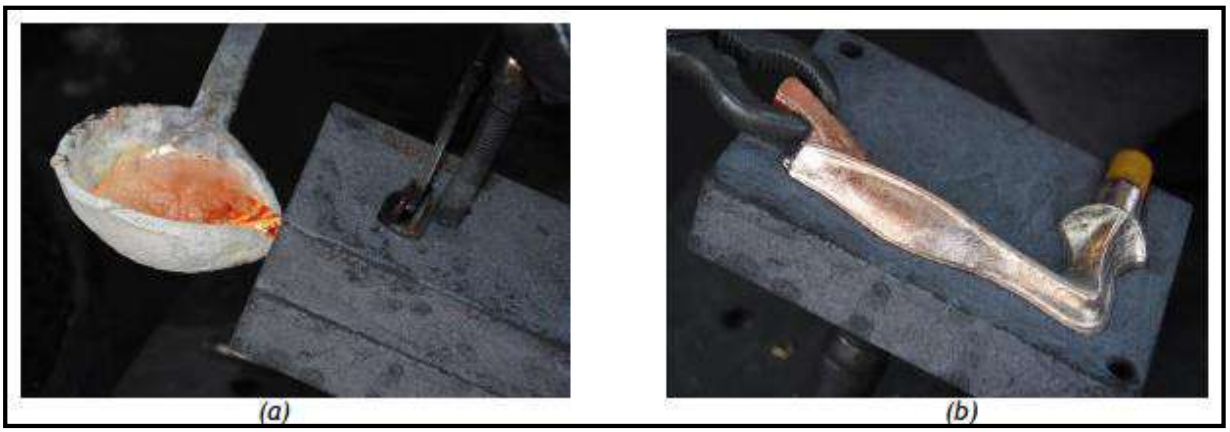


Figure I.7 : Moulage par gravité en coquille (a) Coulée ; (b) Pièce. [4]

c) Les matériaux mis en forme par moulage en coquille :

- L'aluminium et ses alliages sont les matériaux les plus employés par le moulage en coquille. Voici quelques exemples :

- Les alliages présentant une bonne aptitude au moulage obtenue par l'apport de silicium : Al Si 13 - Al Si 10 Mg - Al Si 5 Cu ;

- Les alliages traités thermiquement à hautes caractéristiques mécaniques obtenues par l'apport de magnésium : Al Cu 5 Mg T1 - Al Si 7 Mg - Al Si 10 Mg.

- Le zinc et ses alliages sont fréquemment moulés par ce procédé, à savoir :

- Zamak - Zn Al4 Mg (principalement en fonderie sous pression) ;
- Zn Al12 ;
- Zn Al Cu.

- Mais également le cuivre et ses alliages :

- Laiton - Cu Zn39 Pb2 ;
- Bronze - Cu Sn7 ;
- Cupro-aluminiums ;
- Cupro-nickels. [4]



Figure I.8 : (a) Coulée de l'alliage d'aluminium en fusion ; (b) Sortie de la pièce (photo en insert : la pièce dans la coquille ouverte). [4]

d) Les matériaux constituant le moule :

Les diverses pièces constituant les coquilles de fonderie sont soumises à des sollicitations qui varient considérablement selon leur fonction et l'alliage coulé. Il convient en général de prévoir la réalisation de chacun dans le matériau le mieux adapté et ayant subi le traitement thermique susceptible de lui assurer une tenue en service aussi longue que possible (Tableau I.2). [4].

Tableau I.2 : Matériaux de la coquille en fonction du matériau coulé. [4]

Matériau coulé	Matériaux	État	Remarques
Alliages d'aluminium	Fonte grise perlitique 35 Ni Cr 15	Recuit Trempé et revenu	Coquille Noyaux sollicités
Laiton	Fonte grise perlitique 25 Cr Mo 4	Recuit Trempé et revenu	Coquille Noyaux sollicités
Cuivreux	X 30 W Cr 09 03	trempé et revenu	

Ce pendant dans le cas de petites séries non renouvelables, il peut être judicieux de minimiser le prix de revient de la coquille en employant pour sa construction les matériaux les mieux adaptés mais également les moins onéreux, tant par leur prix d'achat brut que par la plus grande difficulté que peut présenter leur usinage.

- D'autres impératifs peuvent également influencer le choix du matériau de la coquille, On citera :
  - Précision dimensionnelle attendue ;
  - Le système de fermeture (automatique ou manuel) ;
  - Les moyens d'usinage possibles pour la réalisation du moule ;
  - Les coquilles utilisées pour les moyennes séries sont souvent réalisées en fonte grise perlitique ;
  - Ce matériau s'usine facilement et a une bonne tenue à la température. [4]

e) Technologie de la coquille :

Afin d'assurer la conformation de la pièce, la coquille doit contenir en plus de l'empreinte, un certain nombre d'éléments importants :

A. Le système de remplissage :

Au minimum composé d'un trou de coulée, d'un bassin de coulée et de canaux, son rôle est d'acheminer le métal liquide du trou de coulée à l'empreinte. Il est préférable d'assurer via ce système une veine fluide non perturbée et une alimentation homogène de l'empreinte. Enfin il est possible d'ajouter dans le bassin de coulée ou les canaux, des filtres céramiques et des bassins de décantation pour retenir les impuretés.

B. Le système d'alimentation :

Communément appelé masselottes, son objectif 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. Lors du moulage en coquille par gravité, le système de remplissage peut faire office (au moins pour une partie) de système d'alimentation.

C. Les évents :

Ces trous généralement fins dans la coquille permettent l'échappement de l'air lors du remplissage et évitent ainsi les incomplets et les bulles d'air diminuant les propriétés mécaniques de la pièce coulée.

D. Les portées :

Lors de l'utilisation de noyaux en sable ou de broches métalliques afin de réaliser les formes intérieures de la pièce, il est important d'ajouter des portées. Ces liaisons noyau-coquille, broche-coquille ou broche-broche, assurent la mise en position des éléments dans la coquille et la résistance de cette mise en position aux efforts de la coulée (chute du liquide et pression hydrostatique).

E. Mise en position des chapes :

La coquille et les empreintes n'étant jamais monobloc il est nécessaire d'ajouter entre chaque liaison une mise en position précise (centreur, locating, goujon...) et un maintien en position efficace (crampe de fermeture, goupille d'arrêt...). Sans ces éléments, ou avec des éléments mal dimensionnés, des écarts géométriques importants peuvent apparaître, voire une fuite de métal si le plan de joint n'est pas correctement maintenu fermé. [4]

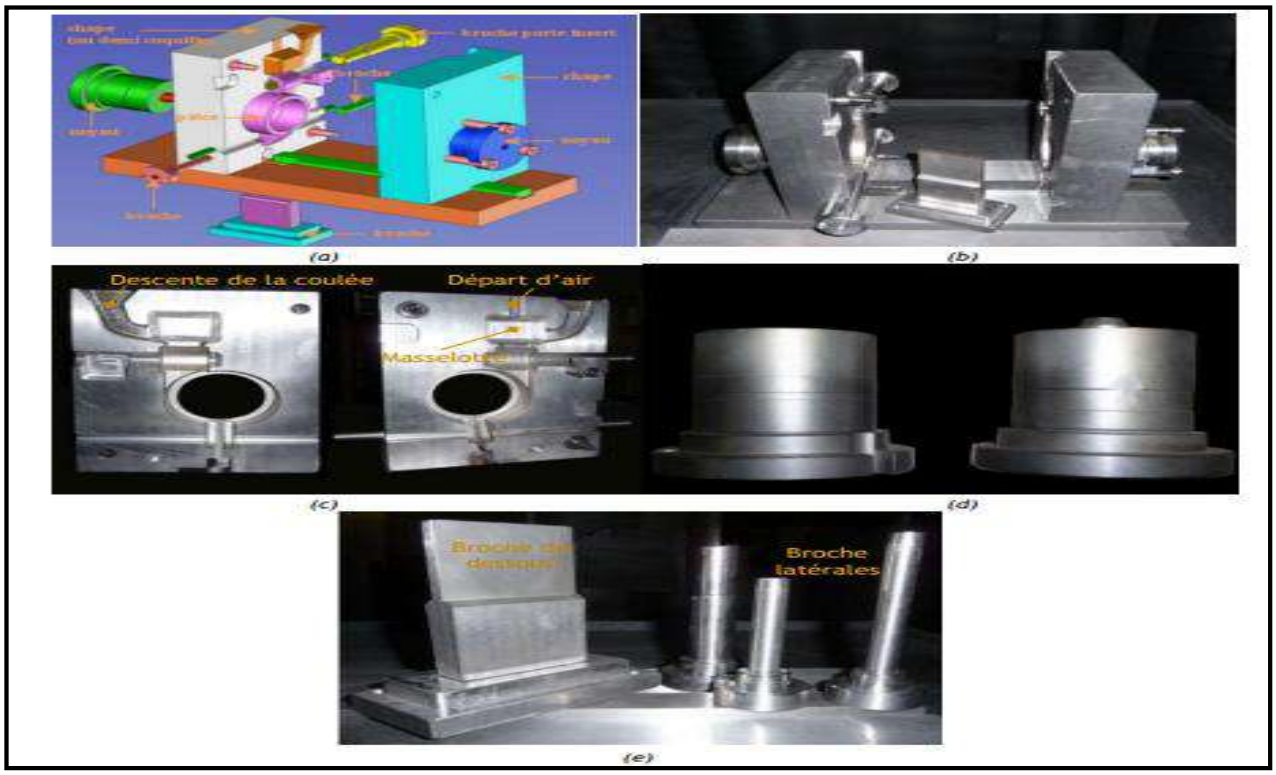


Figure I.9 : Exemple d'un outillage coquille pour fonderie aluminium, **(a)** Modèle 3D ; **(b)** Outillage réalisé ;**(c)** Les deux chapes ; **(d)** Les noyaux ; **(e)** Les broches. [4]

f) Le poteyage :

Le poteyage est un enduit dont on recouvre les surfaces des moules destinées à être en contact avec le métal liquide. En effet malgré le préchauffage des coquilles, leur température avant le remplissage est nettement inférieure à celle du métal en fusion. Lorsque ce dernier pénètre dans l'empreinte la température de celle-ci s'élève brusquement. Durant la solidification de la pièce Broche de dessous Broche latérales Descente de la coulée Départ d'air Masselotte 7 et son éjection la température de surface baisse.

Les variations thermiques sont ainsi considérables en surface, alors que les couches sous-jacentes ont des variations bien plus amorties. Les couches superficielles, bridées par les couches internes, supporte une succession de contraintes de compression et de traction pouvant être importantes. Réduire ces contraintes sera le premier rôle demandé aux poteyages. Son rôle, se présente sous quatre aspects :

- Protection de la coquille ;
- Ajustement du refroidissement ;
- Amélioration de l'état de surface ;
- Lubrification et agent de démoulage. [4]

- **Rôle de protection :**

Le poteyage a un rôle important de protection de la coquille contre l'attaque par l'alliage coulé et l'action des chocs thermiques. Aux températures de coulée, presque tous les alliages réagissent sur les matériaux des moules. C'est surtout le cas des alliages d'aluminium qui attaquent l'acier et la fonte. Leur action est très sensible sur les noyaux et les broches métalliques. Mais c'est également le cas aussi pour le zinc qui entre dans la composition des laitons ; il forme avec le fer des coquilles, un composé fragile très sensible aux variations de température. Ainsi la présence d'une couche de poteyage permet d'éviter ces interactions entre le moule et l'alliage coulé. Une couche de poteyage, quelle que soit la nature de celui-ci, constitue une barrière qui limite la température de surface du moule à une valeur inférieure à celle de coulée du métal. [4]

- **Ajustement du refroidissement :**

Le poteyage est un facteur prépondérant dans la solidification du métal. C'est un isolant dont l'effet peut être réglé. Le refroidissement de l'alliage dans un moule métallique est intense. Une solidification trop rapide peut entraîner des défauts comme les malvenues (le métal refroidit ne peut tout remplir) et reprises (mauvaise refusion), les retassures (cavité) et les criques (fissures) ou la création de tensions internes. Pour cela, la mise en place d'une couche de poteyage constituera un obstacle à l'évacuation de la chaleur et ralentira la solidification. De plus, le poteyage retardant la solidification du métal, il améliore considérablement les possibilités de remplissage du moule. Il

permet en particulier une bonne venue des parties minces et renforce, dans de grandes proportions le rôle des masselottes. [4]

- **Amélioration de l'état de surface :**

Le dépôt d'une fine couche de poteyage améliore nettement l'état de surface de la coquille et par la même celui de la pièce à couler, surtout en diminuant le grain de la pièce. De plus en facilitant la coulée du métal, en assurant à la surface de l'empreinte une continuité et une homogénéité correcte, le poteyage influe favorablement sur l'aspect des pièces coulées. [4]

- **Rôle d'agent démoulant :**

Les alliages d'aluminium lors de leur refroidissement peuvent provoquer des adhérences sur les coquilles gênant considérablement le démoulage des pièces. Ces adhérences, dont les causes sont multiples (réaction chimique entre l'alliage et le matériau de la coquille, érosion par la circulation de l'alliage, ...) sont localisées principalement au droit des attaques et aux changements brusques de directions du flot de métal. Leur formation est amplifiée par les défauts de l'état de surface : rugosité, traces d'usinage, entailles. Le poteyage qui limite le contact entre le métal coulé et la surface du moule supprime ainsi les phénomènes d'adhérences et rend plus facile le démoulage. [4]

❖ **Constitution du poteyage :**

Afin de satisfaire aux différents attendus par le poteyage, celui-ci doit posséder plusieurs qualités :

- ✓ Etre un isolant thermique plus ou moins puissant suivant l'endroit où il est appliqué ;
- ✓ Une granulométrie permettant d'obtenir un état de surface satisfaisant ;
- ✓ Posséder un bon pouvoir d'accrochage à la surface de la coquille afin de tenir lors de la coulée du métal ;
- ✓ Etre économique et d'un emploi facile ;
- ✓ Posséder un bon pouvoir de lubrification mais non oxydant.

- Toutes les qualités citées ne se retrouvant pas dans un seul type de produit, il existe différents types de poteyage dont l'emploi judicieux permettra d'obtenir le résultat attendu. Les poteyages peuvent être classés en deux groupes principaux :

- ✓ Les poteyages isolants ;
- ✓ Les poteyages conducteurs.

Les poteyages isolants, généralement de couleur blanche, possèdent un pouvoir isolant élevé, ils sont employés dans les zones où le métal doit se solidifier en dernier (trou de coulée, masselottes) et dans les parties de l'empreinte où le métal a tendance à figer trop rapidement ainsi que pour la protection générale de l'empreinte. On les utilise également pour l'isolement des outillages : louches de coulée, écumoires ... Ils sont à base de blanc de Meudon, de kaolin, de silicate de soude, d'eau et parfois d'éthanol. En jouant sur la quantité d'eau, on ajuste la fluidité du poteyage.

Les poteyages dits conducteurs sont moins isolants que les précédents. Ils sont employés dans les zones de l'empreinte correspondant aux parties massives de la pièce dont ils facilitent également l'extraction grâce à un bon pouvoir lubrifiant. Ainsi, ils sont employés fréquemment pour le poteyage des broches et des noyaux. Ils sont souvent à base de graphite, d'où leur désignation de poteyages noirs. [4]

- ❖ **Application du poteyage :**

Si la nature du poteyage utilisé influe beaucoup sur son efficacité, la technique d'application est également un facteur primordial dans le résultat attendu. Dans le cas d'un outillage neuf, il est nécessaire de disposer d'une bonne base d'accrochage du poteyage. Pour cela il est nécessaire de débarrasser la coquille de toutes traces d'huile ou de graisse. Ensuite, pour une bonne tenue, le poteyage doit être déposé sur une coquille chauffée vers 150°C. Le procédé qui assure la meilleure application du poteyage est celui assuré par le pistolet vaporisateur, type pistolet à peinture et ce de façon automatique pour une meilleure régularité du dépôt.

Le moulage en coquille est un procédé qui permet de couler par gravité le métal en fusion directement dans un moule métallique en fonte ou en acier appelé coquille.

Ce type de moulage est destiné pour la réalisation de pièces compliquées en métaux et alliages ferreux (fonte grise et acier) et alliages non ferreux à point de fusion relativement bas, bronzes (10 à 13 % Zinc), Al-Si possédant de bonnes propriétés de fonderie, AI-Si-Cu, Al-Cu (4 à12 % Cu). Le moule est constitué de deux ou plusieurs parties appelées chapes, formant l'empreinte, de trou de coulée et les évents (fig. 3), les chapes sont solidement assemblées

pendant la coulée du métal afin d'éviter leur séparation. Le métal liquide remplit les cavités du moule sous l'effet de son propre poids (par gravité). Les masselottes, le trou de coulée doivent être situées dans le plan de joint avec des formes permettant le démoulage. Les joints ont généralement des surfaces finement striées, ce qui permet l'évacuation des gaz lors de la coulée du métal. Dans certains cas les évents sont réalisés dans les noyaux. [4]

g) Des avantages et des inconvénients du moulage en coquille par gravité :

Le tableau qui suit dresse une courte liste des avantages et des inconvénients du moulage en coquille par gravité : [1]

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients du moulage en coquille par gravité. [1]

Avantage :	Inconvénients :
○ Des caractéristiques mécaniques améliorées dues au refroidissement plus rapide de l'alliage coulé contre les parois métalliques du moule ; ○ Pièces présentent un très bon fini de surface ; ○ Les parois plus minces peuvent être coulées, elles peuvent être plus petites que celles du procède de coulée sous pression ; ○ Une simplification et une réduction de l'usinage (même s'il est difficile de le supprimer complètement) ; ○ La possibilité d'utiliser des noyaux en sable afin de réaliser les pièces de formes internes complexes.	○ Cout élève des moules restreint l'utilisation du procède a une production élevée ; ○ Cette technique ne permet pas de réaliser des formes très complexes, on ne peut pas concevoir des trous de diamètre inferieurs à 6 mm, des filets extérieurs ou intérieurs ainsi que des rainures ; ○ Écoulement turbulent du métal en fusion peut causer des inclusions.

2) Le moulage sous pression :

La coulée sous haute pression est l'une des technologies de traitement des métaux les plus compétitives utilisées aujourd'hui dans l'industrie. On peut parfois l'appeler le moulage sous pression. Dans ce procédé, le métal en fusion est injecté dans une empreinte d'un moule

métallique sous haute pression. Le processus se déroule à une vitesse et une pression élevées. Dans la plupart des cas, la température de la coulée sous pression est toujours de l'ordre de 700°C. La pression est maintenue pendant la solidification, ensuite le moule est ouvert et la pièce est injectée. Cette technologie a été adoptée par un certain nombre de sociétés de fabrication. Cela est dû à la qualité supérieure des pièces coulées sous pression à parois minces.

- Il existe deux types de machines sous pression :
  - Machines à chambre chaude ;
  - Machine à chambre froide. [1]

A. Le moulage sous pression en chambre chaude :

Le métal est fondu dans un conteneur et un piston injecte le liquide sous pression dans l'empreinte (Figure I.10). Lorsque les coquilles sont fermées et que le piston est remonté le métal liquide rempli la chambre. Le vérin force le métal à remplir les coquilles et maintient la pression durant le refroidissement et la solidification. La cadence de production est élevée, environ 500 pièces par heure. Il est appliqué aux alliages à faible température de fusion comme le zinc, l'étain et le magnésium. Les métaux à température de fusion plus élevée, y compris les alliages d'aluminium, provoquent une dégradation rapide du système d'injection du métal. [1]

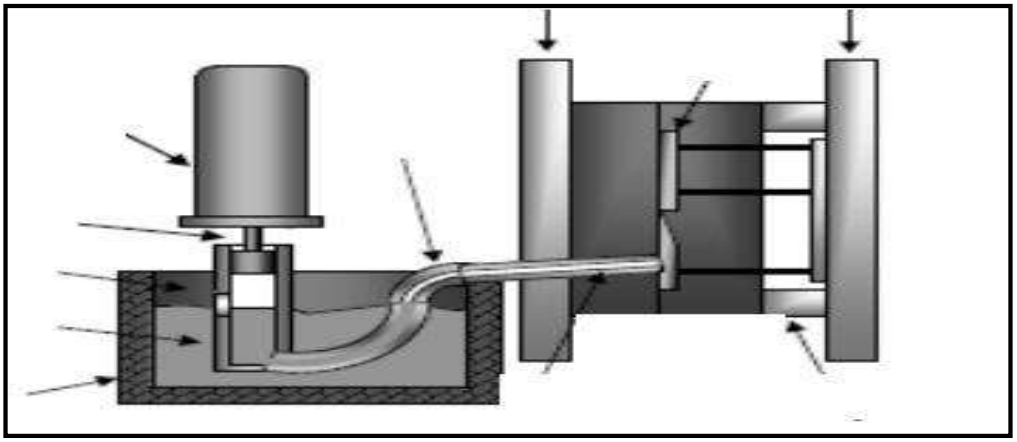


Figure I.10 : Moulage sous pression à chambre chaude. [1]

B. Le moulage sous pression en chambre froide :

Le métal en fusion versé dans le piston d'injection est poussé dans l'empreinte du moule en utilisant un dispositif hydraulique à piston cylindrique. La (Figure I.11) donne un exemple du moule utilisé en moulage à chambre froide. La cadence est élevée mais moins qu'en chambre chaude à cause de la phase de remplissage de la chambre froide. Il est mieux adapté aux alliages à plus haute température de fusion qu'en chambre chaude comme les alliages d'aluminium, et de magnésium. [1]

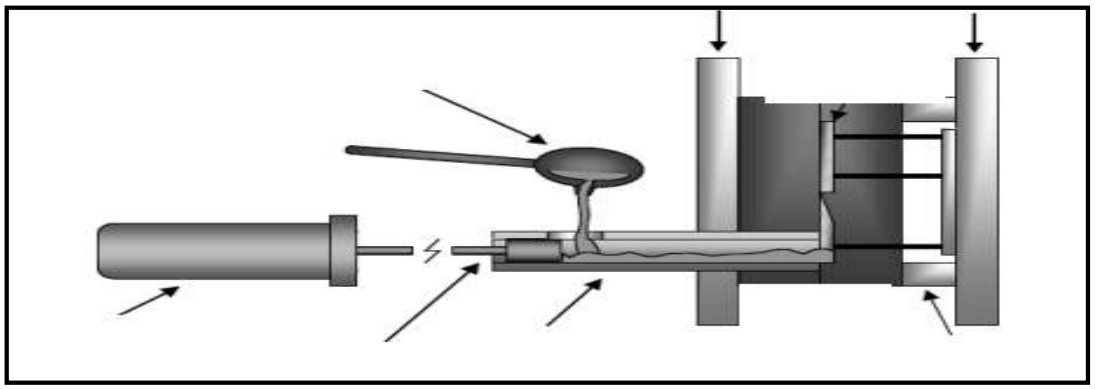


Figure I.11 : Moulage sous pression à chambre froide. [1]

a) Le procédé de moulage sous pression :

Le procédé de moulage sous pression se divise en 6 phases : le transfert de métal liquide, la phase d'approche de l'injection, l'injection rapide, l'intensification, l'éjection et la lubrification du moule. Chaque phase est optimisée pour maximiser la cadence de production et minimiser le nombre de pièces rejetées. On distingue trois variantes de ce procédé :

1. Moulage sous pression traditionnel ;

2. Moulage sous pression sous vide incluant le moulage sous vide pour applications structurales ;

3. Moulage sous pression semi solide, beaucoup moins répandu. [5]

b) Le principal avantage du procédé :

Le principal avantage du procédé est la cadence rapide qui permet d'abaisser les coûts de production et d'approcher les marchés de masse comme l'automobile. Le refroidissement rapide assuré par le moule métallique produit une structure métallurgique très fine en surface

appelée peau qui contribue à l'obtention de bonnes propriétés mécaniques. Le fini de surface et les tolérances dimensionnelles sont excellents. Par contre, la liberté de conception est pratiquement limitée à l'axe d'ouverture du moule comme pour les pièces montrées à la (figure I.12). Le procédé demande peu de main-d'œuvre, mais un coût d'immobilisation et d'outillage élevé. Pour une grande série de plus de 10000 pièces, le procédé de moulage sous pression offre le coût de production par pièce le plus faible parmi les procédés de fonderie. [5]



Figure I.12 : Pièces réalisées par moulage sous pression. [5]

Le désavantage principal du procédé traditionnel (où aucun vide n'est appliqué dans la cavité) est la présence de porosité au centre des pièces moulées sous pression dû à l'air emprisonné pendant l'injection. La présence d'air emprisonné cause la formation de cloques lorsque la pièce est chauffée. Ces cloques sont causées par l'expansion du gaz emprisonné dans la pièce et ne permet pas de réaliser de traitements thermiques de mise en solution standard en vue d'obtenir des propriétés mécaniques optimales (T6) ; ce phénomène limite aussi l'utilisation de la soudure ou l'application de certaines peintures cuites. Heureusement, la résistance mécanique est assurée par la peau du moulage ce qui fait que plusieurs pièces moulées en fonderie sous pression traditionnelles sont encore moulées avec succès par cette méthode qui représentent plus de 50 % des moulages d'aluminium réalisés. En fonderie sous pression traditionnelle, on utilise souvent des alliages secondaires (recyclés) fortement dosés en élément d'alliage (fer et zinc) qui donne de bonnes résistances mécaniques malgré un allongement inférieur à 3 %. Un traitement thermique de type T5 est utilisé pour augmenter la

résistance mécanique des alliages moulés sous pression sans provoquer le cloquage des pièces.

On obtient une très bonne qualité de pièce par l'usage du vide dans l'empreinte pour réduire la présence d'air emprisonné, et par le pilotage en temps réel du cycle de moulage. Le procédé sous pression sous haut vide (développements sont motivés par l'allègement des véhicules terrestres et le moulage sous pression sous vide apporte la solution idéale d'un procédé de moulage à forte cadence pour les pièces structurelles moulées en aluminium. Le développement de ce procédé et des alliages dédiés est présentement le plus actif du domaine de la fonderie. [5]

c) Éléments d'un moule et de la cellule de production :

Le procédé de moulage sous pression se décline en deux principes d'alimentation du métal liquide soit la technologie de chambre chaude et la technologie de chambre froide. Le procédé en chambre chaude utilise un piston directement dans le bain de métal en fusion pour alimenter le moule, tandis que le procédé de chambre froide utilise un conteneur « froid » dans lequel est transféré, à la louche ou par robot doseur, le métal liquide requis pour remplir la pièce (voir Figure I.13). L'acier étant dissout par l'aluminium, la production de pièces d'aluminium moulées sous pression ne se fait qu'en chambre froide. [5]



Figure I.13 : Remplissage manuel du conteneur et début de l'injection (la majorité des fonderies québécoises utilisent un robot doseur pour cette opération). [5]

A. Description du moule de moulage sous pression :

Le moule sous pression est constitué dans la majorité des cas de deux coquilles métalliques en alliage ferreux. Selon le nombre de pièces prévues les matériaux utilisés pour la fabrication des coquilles sont :

- L'acier à outil de type H13 pour les empreintes ;
- L'acier allié de type 4140 ou acier à outil P20 pour les parties de support.

Les tiges d'éjections sont toujours fabriquées avec un matériau plus dur et dans certains cas elles sont traitées superficiellement (par exemple par nitruration) pour limiter le collage de l'aluminium.

Le moule (figure I.14). Est composé d'une partie fixe du côté de l'alimentation en métal liquide et d'une partie mobile de l'autre. La partie fixe contient le trou d'entrée du métal et une partie de l'empreinte de la pièce. Elle peut aussi avoir des noyaux (fixes ou à tiroir) pour mouler des cavités dans la pièce. La partie mobile contient les tiges d'éjections servant au démoulage en plus des noyaux et de l'empreinte de la pièce. Les moules sont dotés de canaux de refroidissement à l'huile (chauffée) ou à l'eau qui servent aussi à préchauffer le moule au départ dans le cas de l'huile chaude.

Pour la réduction des coûts d'outillage, l'empreinte est souvent constituée d'un insert principal placé dans un cadre plus gros et permanent pouvant produire plus d'un type de pièces. Les inserts ou les moules appartiennent typiquement au client. [5]

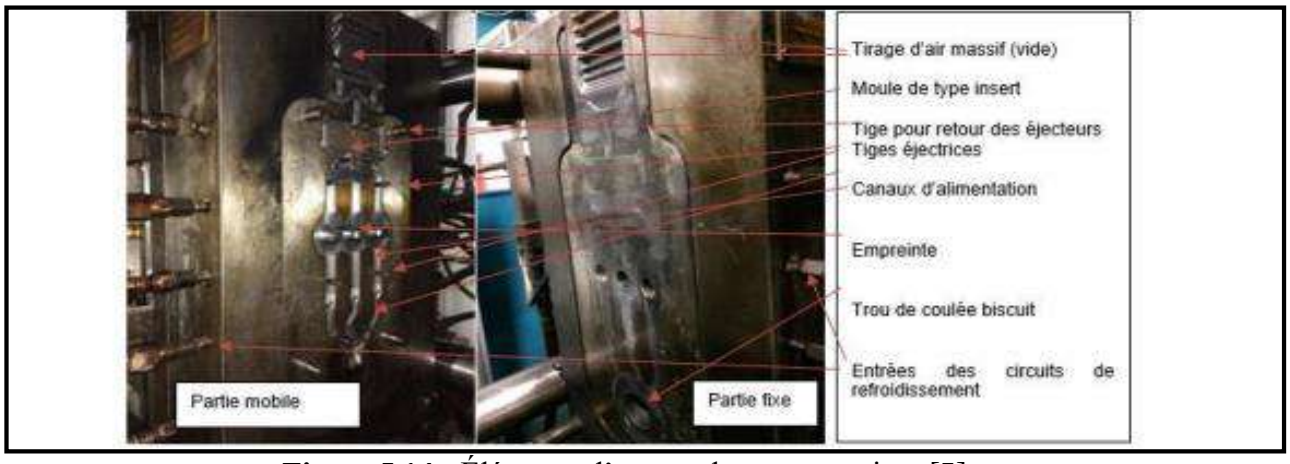


Figure I.14 : Éléments d'un moule sous pression. [5]

B. Description de la presse de moulage sous pression :

La presse de moulage (figures I.15 et I.16) est constituée de trois unité principales : l'unité d'injection, l'unité de fermeture et les périphériques (robot verseur, bras de lubrification, système de de la machine est actionnée grâce à un moteur hydraulique. [5]



Figure I.15 : Éléments d'une presse sous pression. [5]

1. Valves du système de refroidissement du moule et console de programmation.
2. Groupe de fermeture, colonnes, plateaux et moule.
3. Console d'opération, conteneur, piston, accumulateur et intensification au gaz, four à résistance visible à l'avant. [5]



Figure I.16 : Moteur et réservoir hydraulique à arrière de la presse. [5]

L'unité d'injection est un système hydraulique complexe composée d'un accumulateur d'injection, d'un vérin d'injection, d'un accumulateur multiplicateur, d'un vérin multiplicateur et d'un vérin de positionnement du cylindre d'injection. Ces composantes permettent de moduler la vitesse du piston d'injection en 3 phases afin d'obtenir une vitesse lente pour l'approche (phase 1 du remplissage), une accélération rapide grâce à l'accumulateur d'injection lors du remplissage (phase 2) et la compaction du métal à l'aide de l'accumulateur multiplicateur lors de l'intensification (phase 3). Les systèmes modernes permettent un contrôle précis de la courbe de vitesse, une transition progressive entre la vitesse d'approche et de remplissage tandis que les systèmes plus anciens sont souvent limités à une vitesse unique pour l'approche et une vitesse de remplissage.

L'unité de fermeture est composée d'un plateau mobile qui contient le système d'éjection et d'un plateau fixe où se trouve l'accouplement avec l'unité d'injection. Un système de fermeture constitué de leviers à genouillères sert à appliquer la force de fermeture sur les plateaux de la machine. Cette force de fermeture doit être supérieure à la force exercée par le métal pendant l'intensification. La force exercée par le métal se calcul selon la formule suivante :

$$F = Pint * A \qquad \textbf{(I.1)}$$

- ✓ Où :

F : est la force exercée par le métal.

Pint : est la pression d'intensification.

A : est la surface projetée de la pièce incluant le biscuit et les chemins de coulés/talons de lavage. [5]

d) Marchés du moulage sous pression :

- o En résumé, le procédé offre les caractéristiques suivantes :
- o Prix minium pour les grandes séries ;
- o Excellente tolérances dimensionnelles et fini de surface ;
- o Usinage minimum requis après le moulage ;

- Pièces avec un degré de liberté de conception limité dans 2 axes ;
- Large choix d'alliage possible ;
- Le marché du moulage sous pression traditionnel est centré sur les pièces de série. L'industrie de la petite quincaillerie, attaches, boîtiers (couvercles), pièces automobiles (couvercles de valves, supports de bras d'essuie-glace, carters, petits blocs moteurs). Les procédés sous vide avec alliages structuraux et le moulage semi solide permettent la fabrication de pièces structurales pour le marché automobile (berceaux moteurs, piliers A et B, structures de portières, pièces de liaison). [5]

e) Alliages pour le moulage sous pression :

L'alliage le plus répandu pour le procédé sous pression traditionnel est le 380 qui sont produit à partir de recyclage de l'aluminium ou une variation, le 383, plus fluide pour le moulage de détails fins. Un autre alliage répandu est le 360 utilisé pour les applications à haute résistance de pièces compliquées et sujettes à la corrosion. Ces alliages sont aussi disponibles à basse teneur en fer (A380 et A360) pour obtenir un meilleur allongement à la rupture, mais leur utilisation abaisse la durée de vie des outillages dus à l'attaque du moule par l'aluminium liquide.

❖ Les autres alliages communs sont :

- Le 413 utilisé pour une plus grande résistance à l'usure et pour les pièces ;
- D'étanchéité le 443 pour obtenir une bonne ductilité ;
- Le 390 pour les blocs moteu ;
- Le 518 pour les pièces maritimes. [5]

- Le tableau 1 donne les propriétés mécaniques pour ces alliages :

Tableau I.4 : Alliages principaux pour le moulage sous pression traditionnel. [5]

Alliages et état	Propriétés mécaniques typiques * selon ASTM B85 pour les barreaux à part			Commentaires et utilisations
	Résistance mécanique MPa	Limite élastique MPa	A % %	
360.0 F A360 F	305 315	170 165	2.5 3.5	Alliage I pour des pièces complexes et sujettes à la corrosion.
380.0 F A380 F	315 325	160 160	2.5 3.5	Alliage d'usage général. Variante à bas fer pour plus d'allongement
383	310*	150	3,5*	Variante plus fluide du 380 pour détails fins
390	280	240	<1	Alliage à haut silicium pour blocs moteurs
413 A413 *	295 290	145 130	<1 2,5	Pièces pour résistance à l'usure et pièces d'étanchéité.
C443 F	230	95	8	Alliage avec bonne ductilité pour pièces de sécurité
518.0 F	310	190	4	Pour la résistance à la corrosion marine
				* En moulage sous pression, on ne peut pas couler des barreaux de traction en même temps que la production. Par conséquent, on ne peut demander de certifier la production ainsi.

Ces alliages sont aussi utilisés pour le moulage sous vide lorsqu'on désire limiter la porosité dans les pièces.

Le procédé de moulage sous pression sous vide permet l'usage d'une nouvelle gamme d'alliages pour application structurales. Ces alliages (tableau 4) contiennent du silicium de 7 à 12 %, une teneur en fer en général inférieures à 0,25 %, et du magnésium pour obtenir une bonne fluidité et une aptitude aux traitements thermique. Ils contiennent aussi du manganèse et du strontium pour limiter le collage dans le moule. Ces alliages permettent d'obtenir une

limite élastique allant de 100 à 230 MPa avec des allongements de 4 à 20 % aux états F et traités thermiquement T5 T6 et T7. [5]

Tableau I.5 : Alliage sous pression pour applications structurales. [5]

Alliages	Composition chimique %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Autres
Silafont 36	9.5-11,5	0,15	0,03	0,8	0,1-0,5	0,07	0,15	Sr
Castasil 37	8,5-10,5	0,15	0,05	0,35-0,6	0,06	0,07	0,15	Sr, Mo 0,1-0,3, Zr 0,1-0,3
Aural 2	9.5-11,5	0,15-0,22	0,03	0,45-0,55	0,27-0,33	0,03	0,08	Sr 0,01-0,016
Aural 3	9.5-11,5	0,15-0,22	0,03	0,45-0,55	0,4-0,6	0,03	0,08	Sr 0,01-0,016
Mercalloy 367	8.5-9,5	0,25	0,25	0,25-0,35	0,3-0,5	0,10	0,20	Sr 0,05-0,07
Mercalloy 368	8.5-9,5	0,25	0,25	0,25-0,35	0,1-0,3	0,10	0,20	Sr 0,05-0,07
Mercalloy 362	10,5-11,5	0,25	0,20	0,25-0,35	0,5-0,7	0,10	0,20	Sr0,05-0,07 Ni 0,10
Magsimal 59	1,8-2,6	0,2	0,03	0,5-0,8	5-6,0	0,07	0,20	Be

f) Des Avantages et inconvénients du moulage sous pression :

Le tableau suivant présente quelques avantages et inconvénients du moulage sous pression. [1]

Tableau I.6 : Avantages et inconvénients du moulage sous pression. [1]

Avantages	Inconvénients
o Fabrication d'un produit a partir d'une seule coulée plutôt qu'a partir d'un assemblage de composants de coulée ; o Pièces moulées présentent des dimensions dans les tolérances (minimise ou élimine les opérations d'usinage) composants de coulée ; o Permet le moulage de sections minces (de 1 a 2.5 mm) ; o Il peut être utilise pour fabriquer des pièces complexes ; o Cadence de production très élevée ; o Ce procède peut se faire sans dépouille.	o Les couts d'outillage sont plus élèves que les procèdes de coulée par gravite ; o Il peut ne pas être économique pour la production de pièces a petite échelle ; o Écoulement turbulent du métal dans la cavité du moule piège de l'air dans la pièce (problèmes de porosités) ; o Requiert des machines complexes ; o Émissions de gaz, d'oxydes métalliques et de produits chimiques provenant du lubrifiant lorsqu'il est pulvérise sur la matrice métallique chaude ou lorsqu'il est en contact avec le métal fondu.

3) Moulage en coulée continu :

a) Description du procédé :

Après fusion et traitement éventuel dans un four de maintien, le métal liquide est coulé dans une filière ou une coquille, refroidie par circulation d'eau, ayant la forme du profil à fabriquer. A la sortie de cette filière, une couche solidifiée assure la tenue de l'ensemble jusqu'à la fin de la solidification. La pellicule d'alliage solidifiée, d'épaisseur contrôlée, présente un certain retrait lors de sa solidification, ce qui facilite son décollement de la coquille, alors que le métal au centre du profilé est encore liquide, formant une sorte de V plus ou moins effilé. La barre profilée, totalement solidifiée à une distance également réglée à partir de la coquille (longueur de V), est tirée au moyen de galets commandés qui servent

également de guides pour soutenir la barre encore chaude en la maintenant rectiligne, l'extraction des barres peut se faire à vitesse constante ou par à-coups. Après solidification, et toujours en continu, les barres sont tronçonnées à la longueur voulue, voir la (figure I.17). [2]

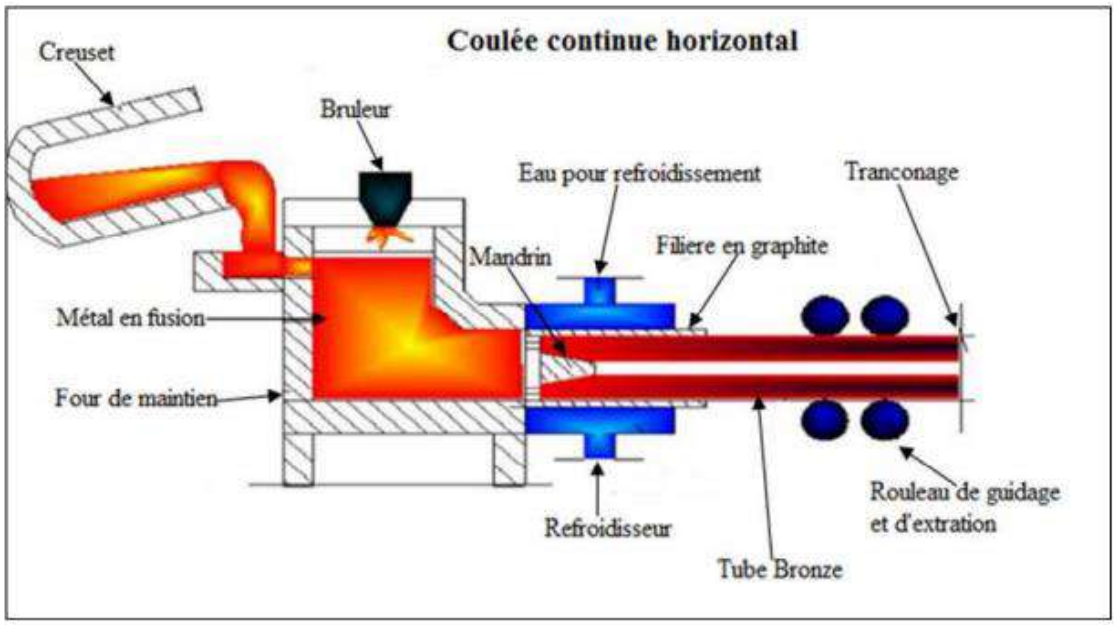


Figure I.17 : Schéma de machine de coulée continue horizontale. [2]

b) Caractéristiques du procédé :

Le moulage en coulée continue est un procédé très performant, fiable, très productif qui permet des productions de qualité mais qui demande beaucoup de soin dans la mise au point et, dans la fabrication, une gestion et de contrôles rigoureux de tous les paramètres de production pour obtention d'une qualité totale des produits. Ce type de moulage présent des nombreuses caractéristiques, on peut citer :

- ✓ ce procédé permet d'obtenir des profils de bel aspect, facilement usinables, avec des cotes précises, et des caractéristiques mécaniques élevées ;
- ✓ la longueur des barres n'est pas limitée ;
- ✓ sur le plan métallurgique, le refroidissement rapide, joint à l'influence de la pression fer statique dans le creuset. [2]

I.6.2 Moulage en moule non permanent :

Moule non-permanent est un moule qui ne sert qu'une seule fois, pour réaliser une pièce. Pour chaque pièce brute de coulée produite, le moule est détruit. La structure d'un moule non permanent est principalement réalisée avec des matériaux de moulage, composée d'une ou de plusieurs parties et offrant après assemblage un évidement appelé empreinte. Cette empreinte correspond à la future pièce brute, tout en tenant compte du système d'attaque, du système d'alimentation et du retrait à l'état solide Les formes intérieures des pièces sont généralement données par des noyaux, qui sont des éléments de Chapitre II Le moulage 19 moule réalisés séparément avec un outillage spécial, cette structure est désagrégée (décochage) pour extraire la pièce brute solidaire du système de remplissage et du système de masselotte, la réalisation d'une autre pièce conduise à la fabrication d'un autre moule. Les techniques les plus employées sont le moulage au sable et la cire perdue. [2]

I.6.2.1 Type de moulage non permanent :

1) **Moulage en sable :**

   a. **Définition :**

C’est l’un des procédés les plus courants du moulage des métaux et qui consiste à utiliser un modèle en métal, ou en bois pour former une empreinte en tassant un sable relativement fin, additionné d’un liant, afin d’obtenir un moule réfractaire.

Le moule se compose de deux parties essentielles :

Un châssis inferieur rempli du sable dans lequel se trouve en creux la partie principale de l’empreinte du modèle.

Un châssis supérieur qui sert de couvercle et qui peut aussi contenir une partie de l’empreinte.

Le métal liquide est coulé dans l’empreinte par un trou de coulée aménagé à cet effet. Après solidification par refroidissement naturel, on obtient une pièce ayant la forme de l’empreinte. [2]

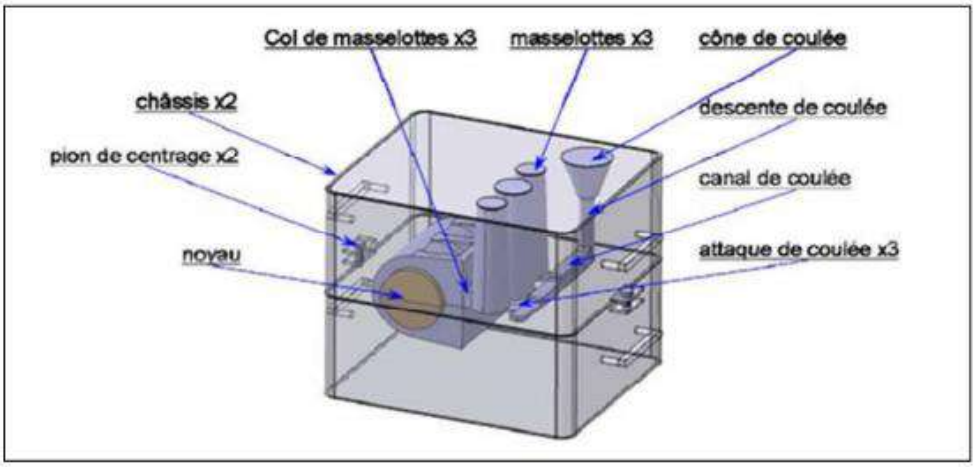


Figure I.18 : Principe du moulage en sable. [2]

b. **Le moule :**

Le moule, en sable, est réalisé à partir de l'outillage décrit. Il se compose d'un fond de moule, d'un dessus de moule, et suivant les cas, d'un ou plusieurs noyaux. Si l'outillage de fonderie (le modèle) est permanent, il n'en est pas de même du moule qui sera cassé pour en extraire la pièce réalisée. On fabriquera donc autant de moules que de pièces à produire. Deux types de sable peuvent être utilisés :

❖ **Moulage au sable Silico-argileux dit sable noir ou «sable vert » :**

Elle s'applique principalement aux modèles montés sur plaques et peut être aussi utilisée pour les modèles nature, en bois ou en résine. Le sable est principalement composé de silice cristallisée sous forme de quartz et d'argile sous la forme de bentonite, il est directement réutilisable après avoir été convenablement humidifié, aéré et tamisé. L'argile humidifiée sert de liant entre les grains de silice de granulométrie bien précise, par enrobage de ces grains. Il est de couleur brun-jaune lorsqu'il est neuf, mais il se colore très rapidement en noir au contact du métal chaud, d'où l'appellation de sable noir. Les deux parties principales du moule, le fond et le dessus, sont maintenues par des châssis, généralement en aluminium, qui comportent des douilles de centrage dans lesquelles on introduit des broches afin d'assurer le positionnement des deux demi moules. [6]

❖ **Moulage au sable a prise chimique :**

La technique du sable à prise chimique permet plus de précision que le sable noir et donne un meilleur aspect de peau de pièce. On peut obtenir, avec ce procédé, des toiles

beaucoup plus fines. Elle s'applique principalement aux modèles montés en caissons et peut être aussi utilisée pour certains modèles nature en bois ou en résine ainsi que pour les modèles en stéréo lithographie et en polystyrène qui, eux, ne sont pas moulables au sable noir. Il s'agit, cette fois, d'un sable siliceux, tamisé, lavé et séché. On y adjoint, peu de temps avant la réalisation du moule, des résines et un catalyseur destinés à former un polyuréthane (désigné couramment «PEP-SET ») par exemple ou bien d'autres types de liant, comme la «Furanique ». La durée de vie de ce sable (durée pendant laquelle on peut le travailler pour réaliser le moule) varie en fonction de la température ambiante et de la concentration en catalyseur. [6]

❖ **Noyautage :**

Les parties intérieures en creux ou certaines parties extérieures en contre dépouille «ne démoulent pas » (c'est-à-dire que l'on ne pourrait pas extraire le modèle du moule en sable sans arracher une partie de ce dernier). On place donc un ou plusieurs noyaux à l'intérieur du moule, une fois le modèle enlevé, afin de réaliser les formes de la pièce. Pour la réalisation de ces noyaux. [6]

c. Principales étapes du procédée du moulage en sable :

Le moulage en sable (Figure I.19) est un procédé de fonderie utilisant un moule destructible et une coulée par gravité (assez rarement par centrifugation). C'est le procédé qui permet la production des pièces de plus grande taille. Il offre au concepteur plus de liberté que le moulage coquille au niveau de la complexité des formes mais la qualité des surfaces est comparativement plus mauvaise que celle obtenue par les autres procédés présentés ici et sa mise en œuvre est plus complexe. Le procédé se décompose comme suit. Des plaques modèles en bois ou plastiques, répliques partielles de la pièce finale souhaitée sont placées dans des châssis métalliques (a). Relativement à la pièce finale souhaitée, les dimensions des plaques modèles sont augmentées afin de compenser le retrait volumique engendré lors de la solidification du métal. Les formes du système de coulée doivent également être prévues. Le volume restant des châssis est alors rempli (b) avec un sable spécifique (base de silice, argile

avec un taux d'humidité contrôlé et éventuellement des additifs chimiques ou liants). Suivant la nature du sable utilisé, un compactage manuel ou mécanique est effectué (sable à vert) ou une réaction chimique de durcissement aussi appelée prise est déclenchée (sable aggloméré prise chimique à froid ou prise à chaud). Les modèles sont séparés de leur empreinte en sable (c). Les châssis sont ensuite réunis en y insérant éventuellement des noyaux de sable qui permettront de créer les formes intérieures (d). La mise en position des châssis, afin d'avoir les empreintes bien en regard, doit être prévue et on utilise pour cela des pions de centrage. Le maintien en position des châssis est assuré par leur propre masse. Si celle-ci est Si celle-ci est insuffisante, on ajoute des masses de serrages supplémentaires posées sur le châssis supérieur (e). La coulée est alors réalisée (f). Le flux thermique au contact métal/sable entre l'alliage et le moule étant très faible, la solidification est donc lent. On sépare ensuite les châssis de la pièce en détruisant le sable du moule et du noyau par vibrations (g). Là encore, la grappe récupérée (h) devra être ébarbée puis sablée ou grenaillée afin d'obtenir la pièce brute finale (i). [2]

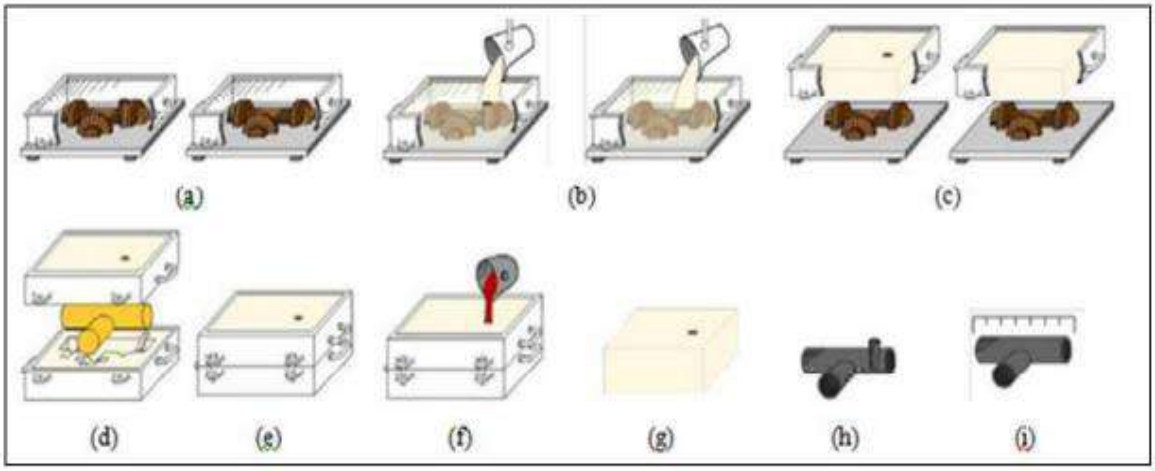


Figure I.19 : Principales étapes du procédé de moulage au sable, (a): châssis métalliques,(b): remplissage de châssis,(c): séparation de modèle,(d): insertion de noyaux de sable,(e): mise en position des châssis : La réalisation de la coulée,(g): détruisant le sable du moule,(h): récupération de la grappe,(i): pièce final. [2]

d. Les étapes du moulage au sable pour choisir les meilleurs matériaux :

Le moulage au sable est l'un des plus anciens processus métallurgiques et reste l'un des plus populaires à ce jour. Lorsque le processus de moulage au sable est utilisé, il est important de choisir les bons matériaux. Les matériaux que vous choisirez dépendront en grande partie de la taille de la pièce, de l'usage auquel celle-ci est destinée et des coûts associés aux matériaux disponibles. Lorsque vous choisissez votre matériel, il est utile de comprendre le processus. Nous décrivons brièvement les six principales étapes du processus de moulage au sable ci-dessous :



Figure I.20 : Les moules au sable. [7]

- **La fabrication des moules** : La première partie consiste à concevoir et préparer les moules. Les moules sont faits de sable compacté à l'intérieur d'un moule selon un modèle (qui suit la forme extérieure de votre pièce). La conception d'un moule de sable peut être très simple ou très complexe, selon les spécifications du projet. Il y a souvent des composantes conçues pour prendre place à l'intérieur d'une pièce ou des noyaux uniques caractéristiques à la coulée. Le temps requis pour concevoir et préparer les moules dépend de la complexité de la coulée. Les moules sont souvent chauffés ou cuits au four avant l'ajout des métaux en fusion.

- **Le serrage :** Une fois que le moule de fonte initial en sable est fait et préparé, il est temps d'ajouter le métal fondu. À ce stade, un lubrifiant est ajouté afin de faciliter le retrait de la coulée finale. Une fois lubrifié, des carottes sont ajoutées au moule, mises

en place et fixées. Le moule est mis en serres très étroitement pour s'assurer qu'aucune matière ne puisse s'en échapper.

- **La coulée :** La coulée est assez simple : le métal fondu est coulé dans le moule de sable. Le métal fondu doit être maintenu à une température constante et versé adéquatement pour remplir le moule et tous ses coins et racoins. La durée du remplissage est généralement assez rapide, car la température peut chuter rapidement, causant ainsi la solidification d'une ou plusieurs parties du moule avant les autres.

- **Le refroidissement :** Le refroidissement est une étape importante pour la qualité de la finition de la coulée. Selon l'épaisseur de la fonte et la température de la matière, temps de refroidissement peut varier. Il est important d'assurer un refroidissement complet et adéquat, puisque celui-ci affectera la qualité du produit fini. Un refroidissement trop rapide peut entraîner un rétrécissement des pièces, des fissures ou des pièces incomplètes ; il est donc essentiel d'avoir un environnement de refroidissement contrôlé.

- **Le démoulage :** Retirer la pièce coulée du moule se fait généralement en brisant le moule. Ce processus s'appelle « shakeout » et est habituellement fait à l'aide d'une machine spéciale qui vibre et enlève le sable et la coulée du moule. Une fois enlevé, le morceau de fonte est souvent grenaillé pour enlever toute oxydation ou sable sur la surface interne.

- **La finition :** Parce qu'il existe des canaux à l'intérieur du moule, il y aura du matériel excédentaire rattaché à la pièce finie qu'il faut enlever. À l'aide d'une presse de parage, d'une scie ou d'autres méthodes de coupe, tout matériel supplémentaire pourra être enlevé. Selon le type de coulée, cela peut être très rapide ou prendre plus de temps. Lors du choix de matériaux possibles pour la production d'une pièce moulée, il est pertinent de parler avec un consultant expérimenté qui comprend le processus de moulage au sable et les spécifications de votre projet. Les consultants présents chez Monet ont travaillé sur de nombreux projets de moulage et de forge de toutes tailles depuis des générations. Si vous cherchez à entreprendre un projet de moulage au sable, appelez-nous pour discuter des matières idéales pour votre projet. [7]

e. Caractéristiques du procédé :

1). Le moulage en sable présente les avantages suivants :

- Il peut être utilisé pour des pièces de 150 à 200 tonnes ;
- Il permet de réaliser une grande variété de formes ;
- On peut couler des métaux ayant une température de fusion dépassant 1100°C.

2). Ce type de moulage comporte les inconvénients suivants : La surface de la pièce moulée contient du sable, ce qui cause une usure rapide des outils de coupe.

- Les pièces du moulage en sable ont des propriétés mécaniques bien plus faibles que celles du moulage en moule métallique à cause du refroidissement / environnement du métal. Ainsi, aucune direction des grains n'est obtenue et la pièce moulée résiste mal aux efforts de traction et de pliage, c'est pour cela que ce genre de procédés est limité au bloc moteur complexe, aux culasses et toutes pièces généralement creuses.
- Lors du refroidissement, les pièces sont portées à se déformer à cause de la variation des épaisseurs ou du refroidissement inégal. [2]

2) Moulage en cire perdu :

La fonderie en cire perdue, parfois appelée fonderie de précision, est une méthode qui ressemble au moulage au sable, mais qui présente l'avantage de réaliser des pièces avec une précision bien meilleure. Le moule est réalisé en céramique à partir de modèles en cire. Des modèles de la pièce à réaliser sont fabriqués en cire, par différentes méthodes suivant L'importance de la série : injection pour des grandes série, prototypage rapide, moules silicones. Les modèles sont ensuite reliés sous forme de grappes de pièces par des éléments en cire qui représentent les futurs canaux d'alimentation. Cet assemblage est plongé plusieurs fois dans un bain appelé barbotine, puis recouvert de sable réfractaire afin de former une couche suffisamment résistante pour supporter la coulée du métal. L'ensemble est placé dans un four pour éliminer la cire, puis cuire la céramique. Enfin le métal choisi est coulé dans le moule ainsi formé, puis le moule est cassé et les pièces séparées de la grappe. La précision des modèles en cire perdue et la gestion des dilatations dues à la température détermineront la précision de la pièce finie. [2]

Chapitre II :

Techniques Appliquées Dans Le Moulage

II.1 Les Etapes de Réalisation d'un Modèle pour Pièces Fonderie :

II.1.1 Choisir le procédé de moulage :

II.1.1.1 En fonction de la nature de l'alliage coulé :

Tableau II.1 : Nature de l'alliage coulé en fonction du procédé de moulage. [8]

Procédé de moulage	*Métaux ou alliages*					
	Fontes	*Aciers*	*Alliages de cuivre*	*Alliages d'aluminium*	*Alliages de magnésium*	*Alliages divers (Zn, Sn, Pb)*
En sable	+++	+++	+++	0	++	0
En carapace	+++	+++	+++	+++	0	0
A la cire perdue	++	+++	+	+++	++	0
En coquille par gravité	+++	0	+++	+++	+++	+++
En coquille sous pression	0	0	+++	+++	+++	+++
Par centrifugation	+++	+++	+++	+	0	0
+++: Très utilisé; ++: Emploi possible; +: Rarement utilisé; 0: Inutilisé						

II.1.1.2 En fonction du nombre minimal de pièces à produire :

Tableau II.2 : Nombre minimal de pièces à produire en fonction du procédé de moulage. [8]

Procédé de moulage	*Métaux ou alliages*					
	Fontes	*Aciers*	*Alliages de cuivre*	*Alliages d'aluminium*	*Alliages de magnésium*	*Alliages divers (Zn, Sn, Pb)*
Au sable	1	1	1	-	10 à 50	-
En carapace	500 à 1000	500 à 1000	500	500	-	-
A la cire perdue	500	50	-	50	100	-
En coquille par gravité	250 à 1000	-	200 à 300	500	500	500
En coquille sous pression	-	-	2000	2000	5000	2000
Par centrifugation	200 à 1000	200 à 1000	200 à 1000	-	-	-

II.1.1.3 En fonction du poids de la pièce à mouler en Kg et de son matériau :

Tableau II.3 : Poids de la pièce à mouler en Kg et de son matériau en fonction du procédé de moulage**.** [8]

Procédé de moulage	*Métaux ou alliages*					
	Fontes	*Aciers*	*Alliages de cuivre*	*Alliages d'aluminium*	*Alliages de magnésium*	*Alliages divers (Zn, Sn, Pb)*
Au sable	Pas de limite	Pas de limite	5000	-	700	-
En carapace	100	100	5 à 30	20	-	-
A la cire perdue	20	25	-	10	1,5	-
En coquille par gravité	100	-	5	60	10	10
En coquille sous pression	-	-	5	30 à 50	15	30 à 50
Par centrifugation	20000	8000	600	-	-	-

II.1.1.4 En fonction de l'épaisseur de la pièce à mouler en mm et de son matériau :

Tableau II.4 : Epaisseur de la pièce à mouler en mm et de son matériau en fonction du procédé de moulage. [8]

Procédé de moulage	*Métaux ou alliages*					
	Fontes	*Aciers*	*Alliages de cuivre*	*Alliages d'aluminium*	*Alliages de magnésium*	*Alliages divers (Zn, Sn, Pb)*
Au sable	2,5	5	2,5 à 3	-	3,5	-
En carapace	2,5	3	4	3	-	-
A la cire perdue	1,5 à 2	0,5 à 1	-	0,8 à 1,5	1,5 à 5	-
En coquille par gravité	3	-	3	2,5 à 3	3 à 3,5	1,5 à 2
En coquille sous pression	-	-	2 à 4	1,5 à 3	1 à 3	0,8 à 2
Par centrifugation	2	5	5	-	-	-

❖ Les dimensions inscrites dans le tableau sont la dimension minimale et maximale de la pièce à mouler (cette dimension englobe les surépaisseurs d'usinage et les dépouilles). [8]

II.1.1.5 En fonction de la rugosité en µm et l'intervalle de tolérance en mm :

Tableau II.5 : La rugosité en µm et l'intervalle de tolérance en mm en fonction du procédé de Moulage.[8]

Procédé de moulage	*Fontes GL ou GS*		*Fontes malléables*		*Aciers*		*Alliages de cuivre*		*Alliages d'aluminium*		*Alliages de magnésium*		*Alliages divers (Zn, Sn, Pb)*	
	IT	R_a	*IT*	R_a	*IT*	R_a	*IT*	R_a	*IT*	R_a	*IT*	*IT*	*IT*	R_a
Au sable	±2	20	±1,5	20	±3	25	±1,7	20	±1,5	12	±0,8	10	±0,5	10
En carapace	±0,7	8	±0,6	7	-	-	±0,5	5	±0,6	4	±0,6	4	-	-
En coquille par gravité	±1,5	5	±1,2	5	-	-	±1	3	±0,8	2	±0,8	2	±0,6	1,5
En coquille sous pression	-	-	-	-	-	-	±0,4	2	±0,3	1,5	±0,3	1,5	±0,2	1
Par centrifugation	±1,5	10	±1,2	6	-	-	±0,8	4	-	-	-	-	-	-
Coulée continue	±0,6	10	±0,8	15	-	-	±0,6	10	-	-	-	-	-	-

II.1.2 la réalisation des croquis de la pièce brut, du modèle et du noyau :

- **Quelle serait la forme approximative du moule nécessaire pour le moulage de cette pièce ?**

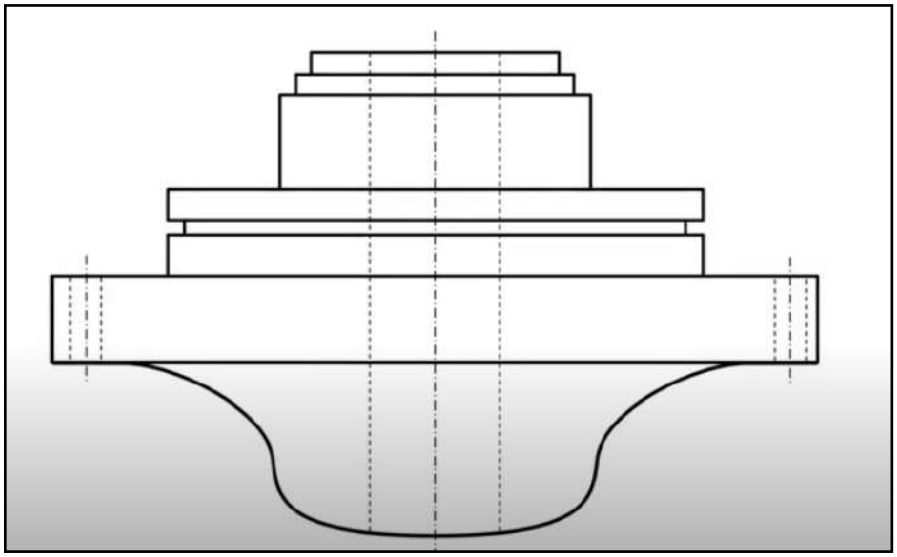
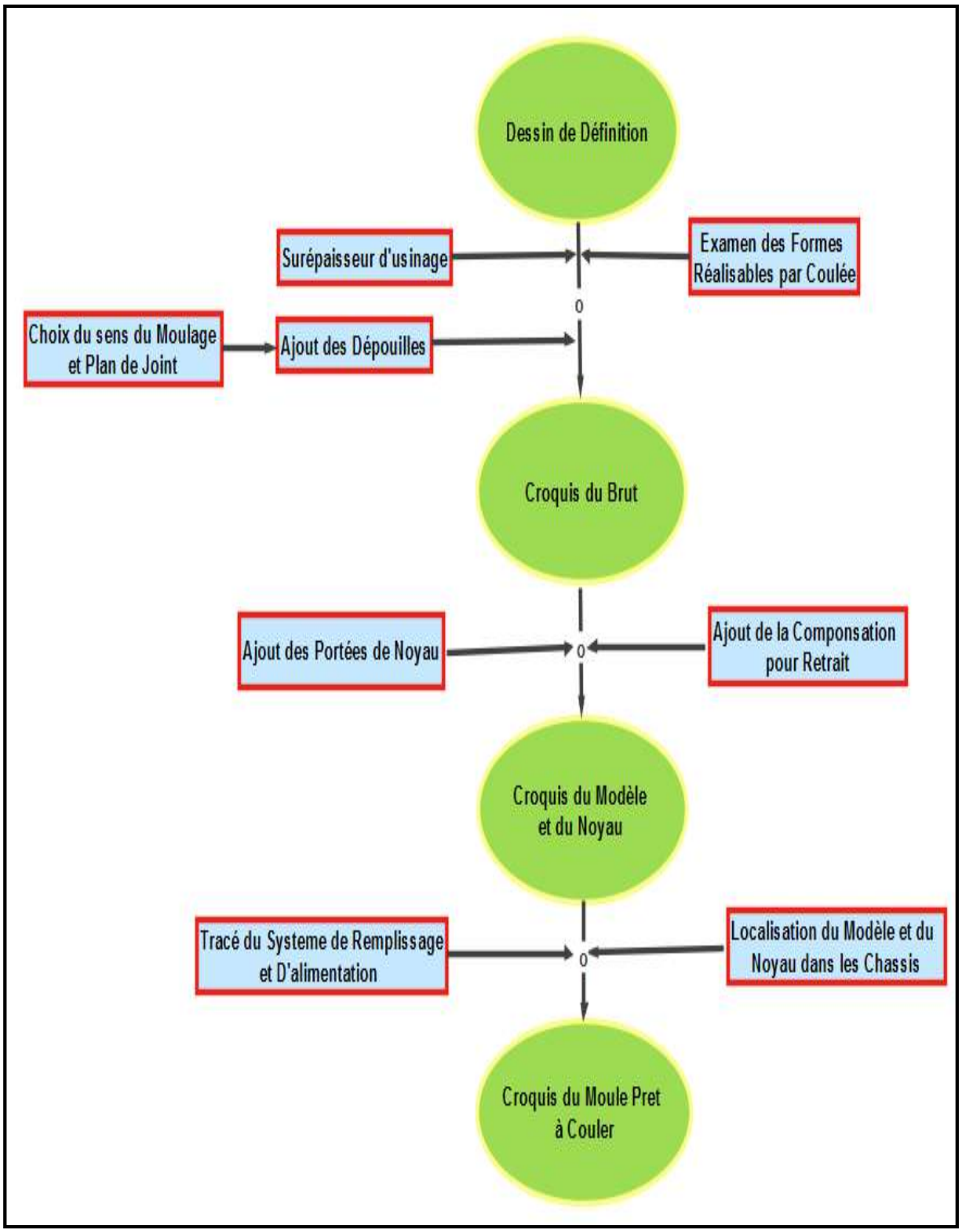


Figure II.1: Etude d'un dessin finie. [12]

II.1.2.1 Organigramme de réalisation d'un modèle et moule fonderie :

Les etapes de réalisation d'un modèle et moule fonderie sont présentés dans le tableau (II.6) :

Tableau II.6 : Organigramme de réalisation d'un modèle et moule fonderie. [12]



II.1.3 Surépaisseur d'usinage :

- Sur les surfaces qui seraient usinées. Comment les reconnaitre ?
  - Indication de faible rugosité ;
  - Angle Vif (pas d'arrondis ni de congés) ;
  - Cote dimensionnelle précise ;
  - Surface de contact (dessin d'ensemble) ;
  - Tolérance géométrique.

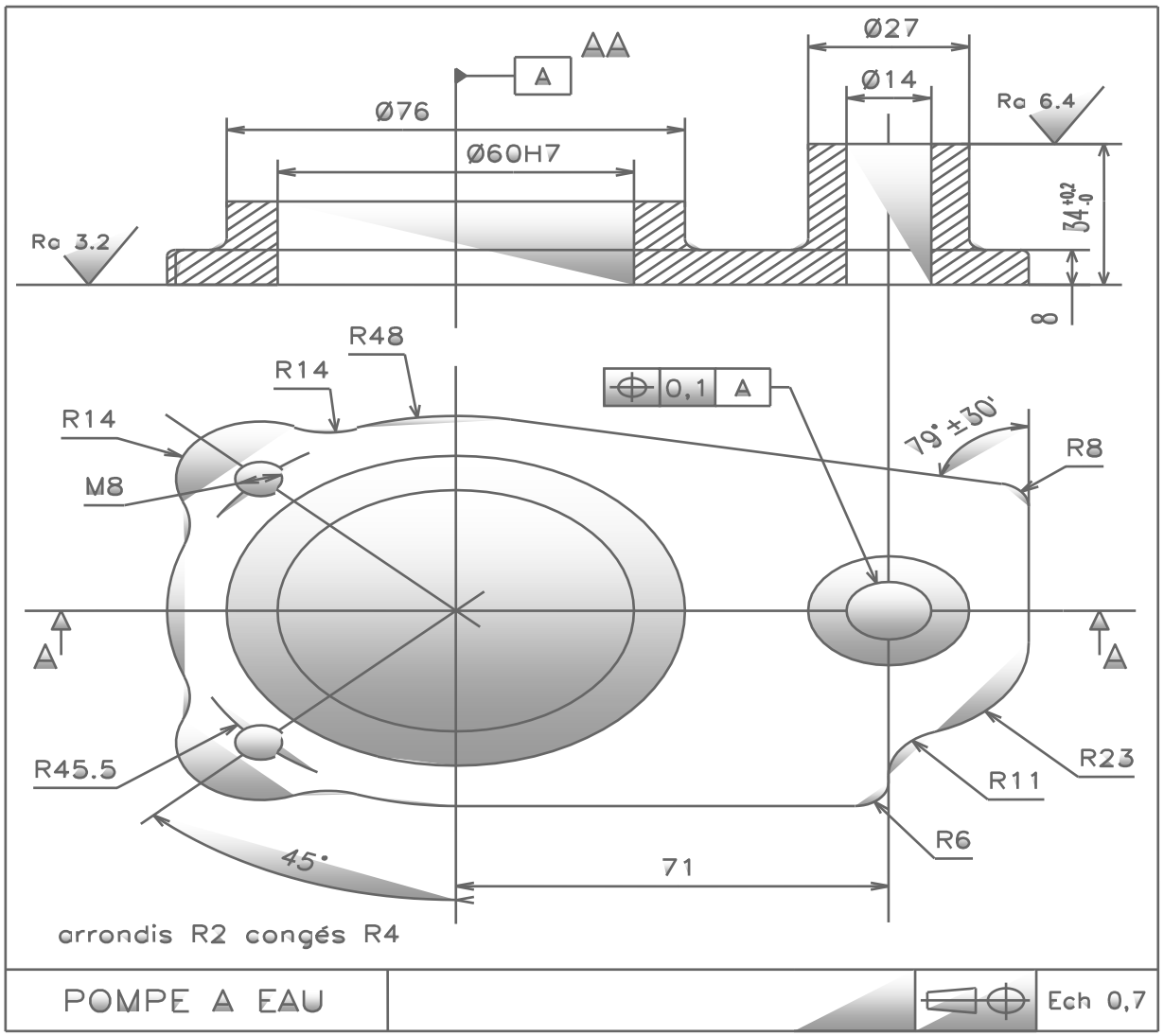


Figure II.2 : Dessin d'usinage d'une pompe à eau.

➢ **Exemple :**

- Les dimensions de la pièce :

1) 1ere Partie :

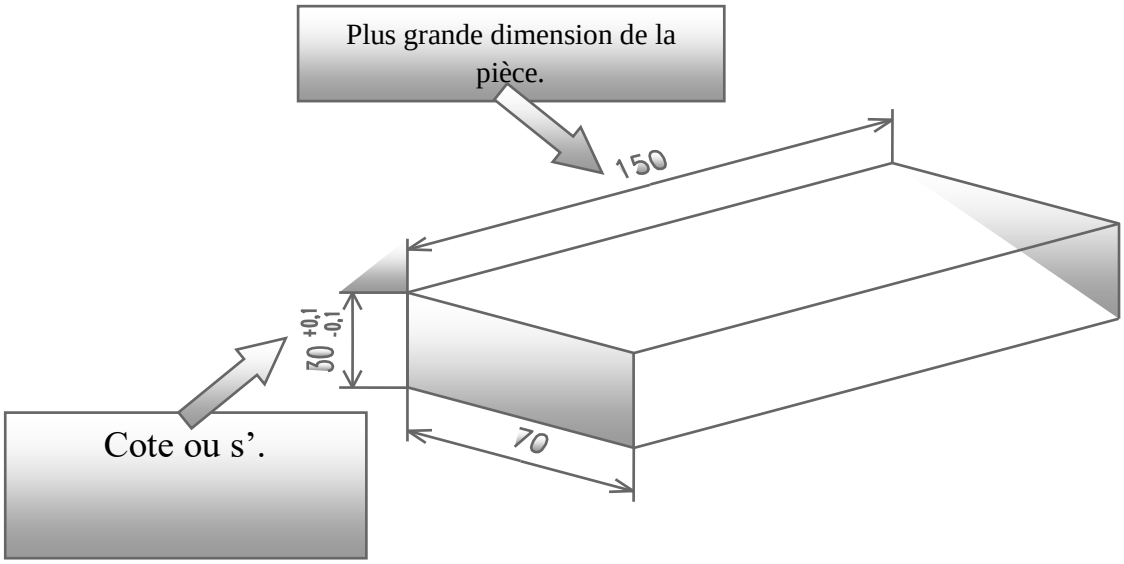


Figure II.3 : Dessin de la dimension de la pièce cotée. [13]

2) 2ème Partie :

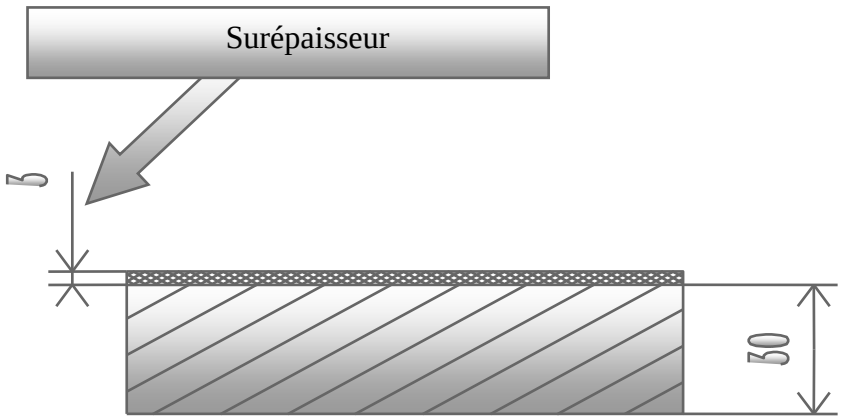


Figure II.4 : Dessin de la dimension de pièce cotée hauteur. [13]

II.1.3.1 Classes et valeurs de surèpaisseurs d'usinage spécifiées pour pièces moulées burts de fondrie :

Tableau II.7 : Classes typiques de surépaisseurs d'usinage spécifiées pour pièce moulée brutes.

Méthode	**Classe de sur épaisseur d'usinage spécifiée, RMAG** **Métaux et aillages coulés.**								
Moulage en sable. moulage main	**Acier**	**Fonte grise**	**Fonte à graphite sphéroïdal**	**Fonte malléable**	**Alliages de cuivre**	**Alliages de zinc**	**Alliages de métaux légers**	**Alliages à basse de nickal**	**Alliages à basse de cobalt**
Moulage en sable. moulage machine et moulage en carapace	G à k	F à H	F à H	F à H	F à H	F à H	F à H	G à k	G à k
Moule métallique permanent (à l'exception de la coulée sous pression)	F à H	E à G	D à G	E à G	E à G	E à G	E à G	F à H	F à H
coulée sous pression					B à D	A à D	B à D		
Moulage de pression (cire perdue)	E	E	E		E		E	E	E
Pour des pièces moulées avec une plus grande dimension hors toute supérieure à 6 300 mm, on applique F à K.									

Tableau II.8 : Surèpaisseurs d'usinage spécifiées.

Plus grande dimension hors tout		Surépaisseur d'usinage Pour la classe de surépaisseur d'usinage spécifiée (RMAG)									
		RMAG A	RMAG B	RMAG C	RMAG D	RMAG E	RMAG F	RMAG G	RMAG H	RMAG J	RMAG K
--	≤ 40	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.7	1	2
>40	≤ 63	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	1	1.4	3
>63	≤ 100	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1	1.4	2	2.8	4
<100	≤ 160	0.3	0.4	0.5	0.8	1.1	1.5	2.2	3	5.5	6
<160	≤ 250	0.5	0.5	0.6	1	1.4	2	2.8	4	7	8
<50	≤ 400	0.4	0.7	0.7	1.3	1.8	2.5	3.5	5	9	10
<400	≤ 630	0.5	0.8	0.9	1.5	2.2	3	4	6	10	12
<630	≤ 1000	0.6	0.9	1.1	1.8	2.5	3.5	5	7	11	14
>1000	≤ 1600	0.7	1	1.2	2	2.8	4	5.5	8	13	16
>1600	≤ 2500	0.8	1.1	1.4	2.2	3.2	4.5	6	9	14	18
>2500	≤ 4000	0.9	1.3	1.6	2.5	3.5	5	7	10	16	20
>4000	≤6300	1	1.4	2	2.8	4	5.5	8	**11**	**17**	22
>6300	≤10000	1.1	1.5	2.2	3	4.5	6	9	**12**	**17**	24

Dimension en mm.

II.1.4 Examen des formes réalisables par coulée :

- Certaines formes sont impossibles ou difficiles à réaliser par moulage :

A. Que faire alors ?

Les ignorer, ensuite les faire par usinage.

B. Quelles sont les formes impossibles ?

Les gorges / filetage / taraudage /……

C. Quelles sont les formes difficiles ?

Les petits trous / les détails fins /…… [12]

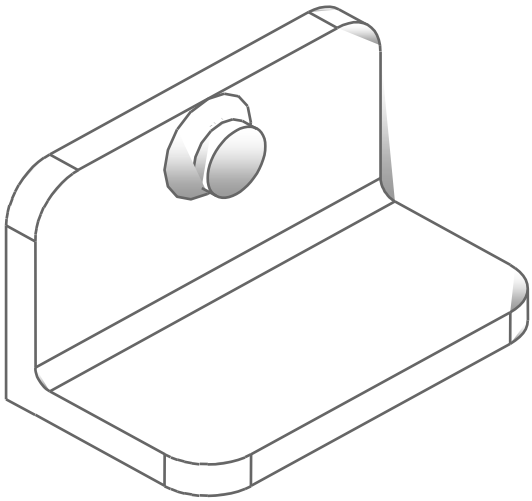
II.1.5 Choix du sens de moulage et du plan de joint :

- Les moules doivent pouvoir être séparés en deux moitiés pour permettre l'extraction du modèle.
- Le plan de séparation des deux parties du moule est appelé plan de joint **(P_d J).**
- En générale, le démoulage s'effectue perpendiculairement au plan de joint (**P_d J)**. [9]

II.1.5.1 Les critères principaux pour le choix du plan de joint ($P_d J$) :

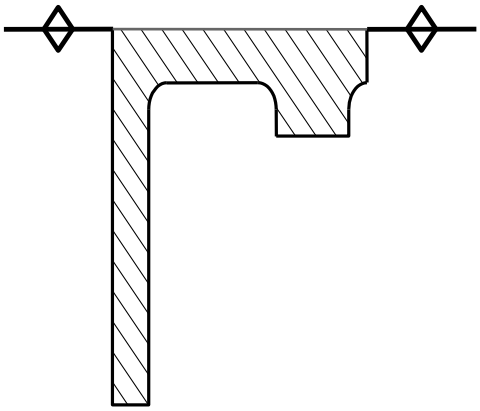
A. Eviter les contre-dépouilles :

- (Permettre le démoulage du modèle possible)→ Passage du **($P_d J$)** par la plus grande section.



▪ ***OUI :***

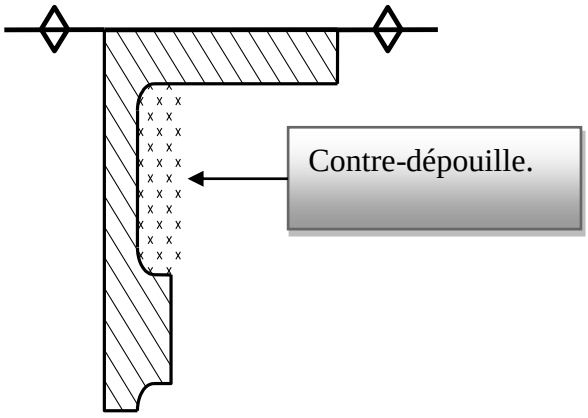
Le travail du modeleur et du fondeur est le plus simple possible.



▪ ***NON :***

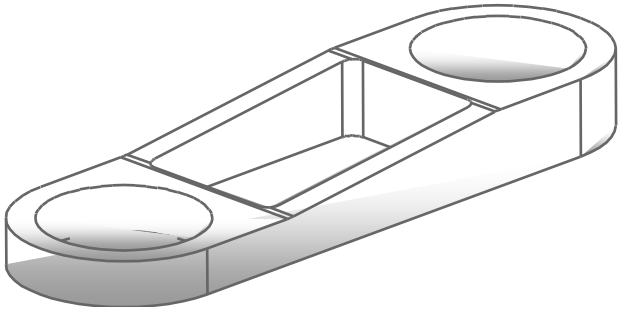
Le travail du modeleur et du fondeur est plus complexe car pour mouler la pièce, il faut soit :

- ✓ Prévoir un noyau.
- ✓ Prévoir un plan de joint supplémentaire.



B. Un (P_d J) transversale autant que possible :

- C'est un facilite l'usinage des surfaces cylindriques.



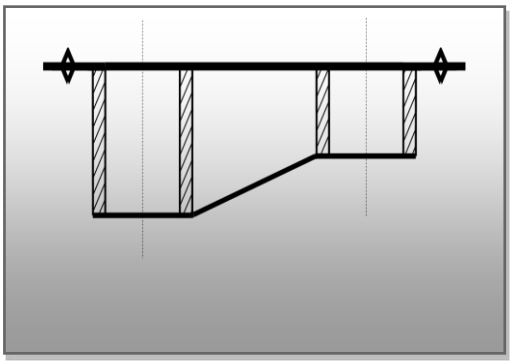
▪ **OUI :**

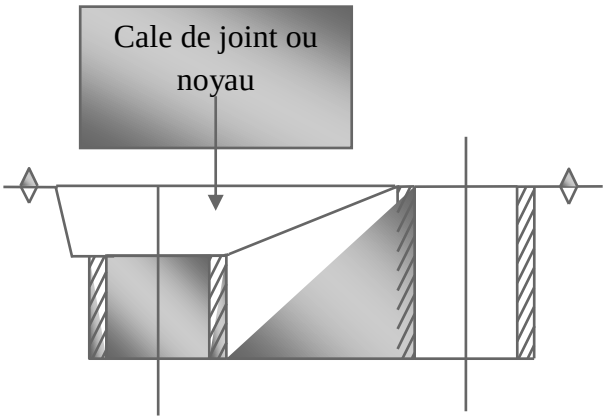
Le travail du modeleur et du fondeur est le plus simple possible.

▪ **NON :**

Le plan de joint est décroché, le travail du modeleur et du fondeur est plus complexe.

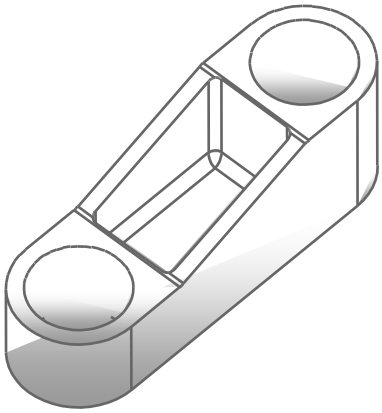
- Il faut soit :
  - ✓ prévoir une cale de joint (moulage en unitaire).
  - ✓ prévoir un noyau (moulage en série).





C. Solution avec les noyaux les plus simples :

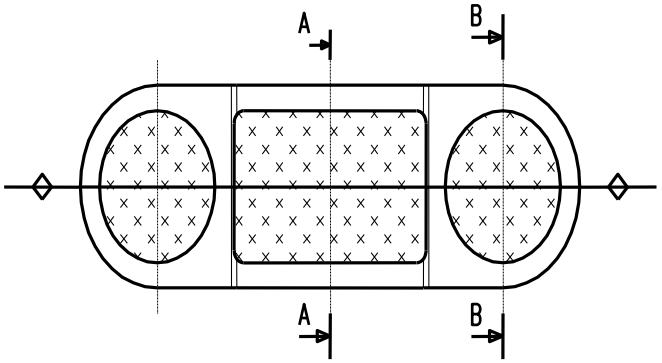
- C'est à dire (forme et /au nombre) ou solution sans noyau.



▪ **NON :**

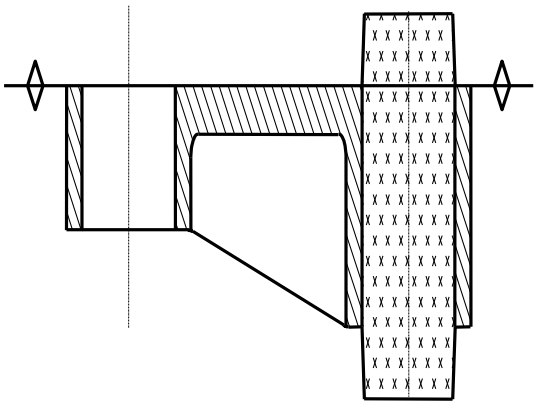
Le travail du modeleur et du fondeur est rendu plus Complexe par :

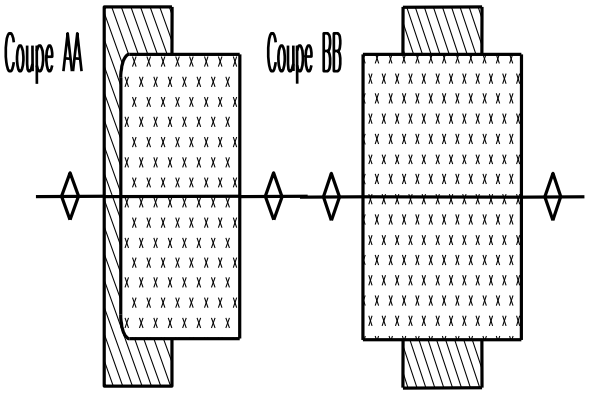
- ✓ Des noyaux aux formes tourmentées.
- ✓ Un nombre de noyaux plus élevé.
- ✓ Une mauvaise stabilité des noyaux dans le moule.



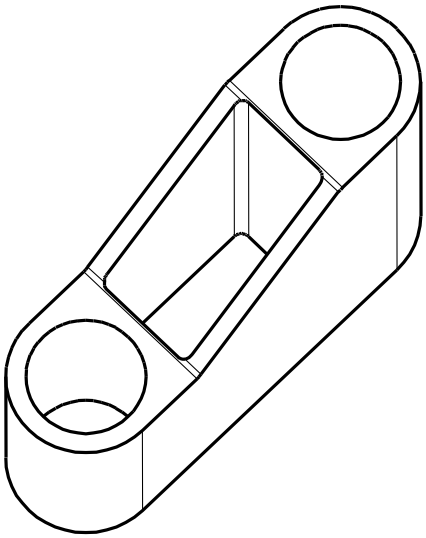
▪ **OUI :**

Le travail du modeleur et du fondeur est le plus simple possible.





D. Les parties usinées sont en majorité verticales ou situées dans le bas de l'empreinte :

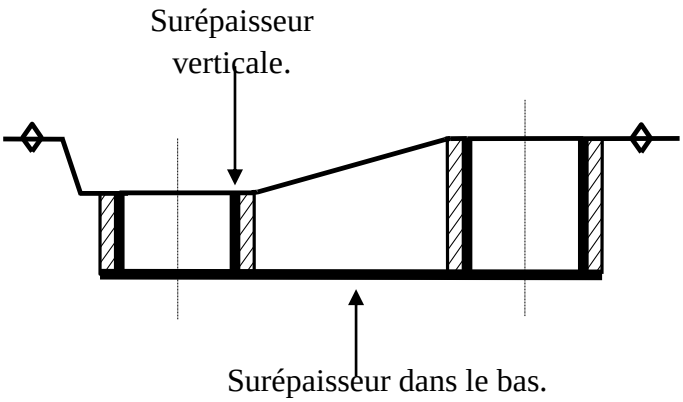


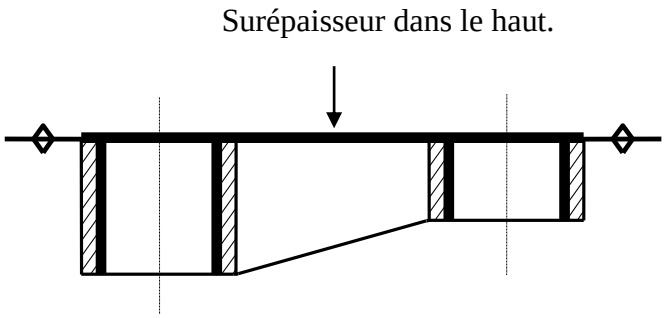
- **OUI :**

En flottant à la surface du métal liquide, les impuretés se retrouvent dans le haut du moule. Pour obtenir des surfaces usinées saines, on à intérêt à les placer dans le bas de l'empreinte.

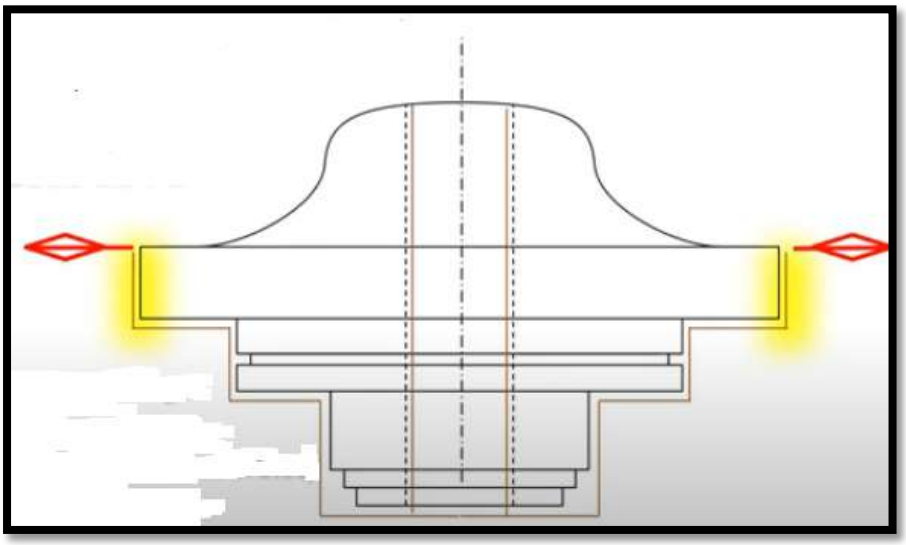
- **NON :**

Les parties usinées situées dans le haut de l'empreinte risquent d'être défectueuses par la présence d'impuretés contenues dans le métal.

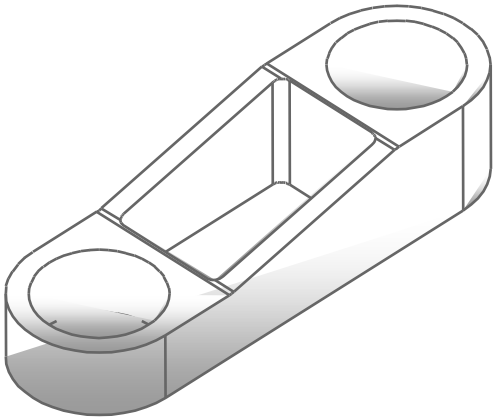




E. Maximiser le volume en dessous du plan de joint(P_dJ) :



F.Les formes cylindriques creuses sont en majorité en position verticale :

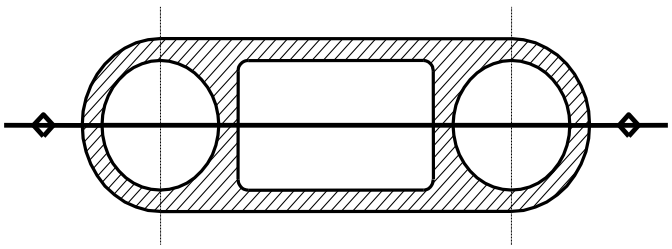


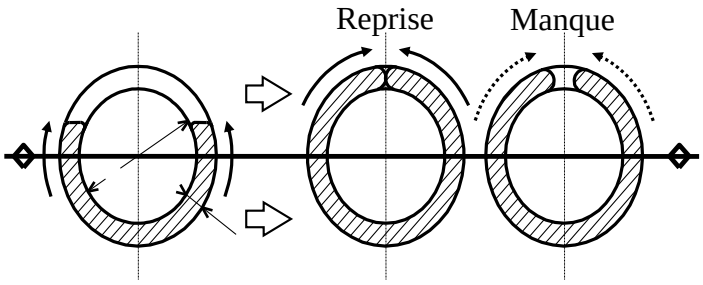
▪ ***NON :***

La pièce peut être défectueuse ou incomplète car pendant le remplissage du moule, le métal se refroidit :

- ✓ risque de non soudure des deux veines : **Reprise.**
- ✓ risque de manque de métal : **Manque.**

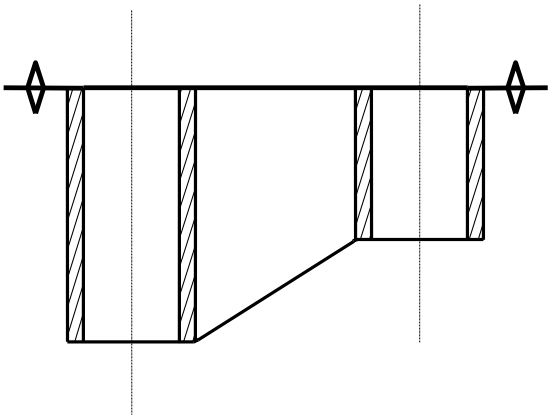
- Ces risques sont importants quand : Ø >> Ep.



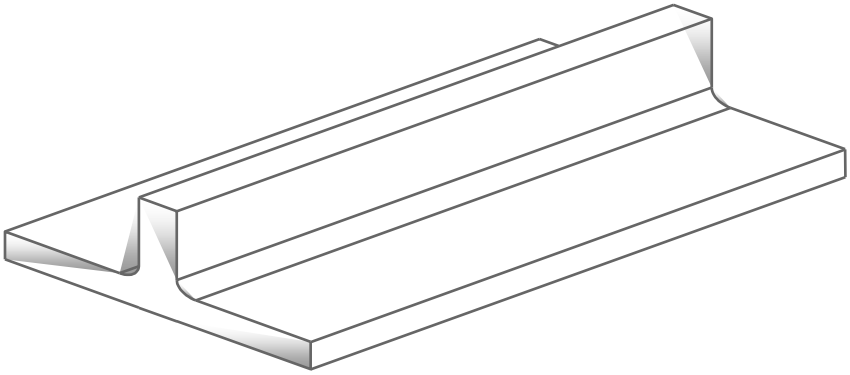


▪ ***OUI :***

Le remplissage du moule ne pose pas de problème particulier.



G. Le plan de joint passe par une face plane de la pièce :

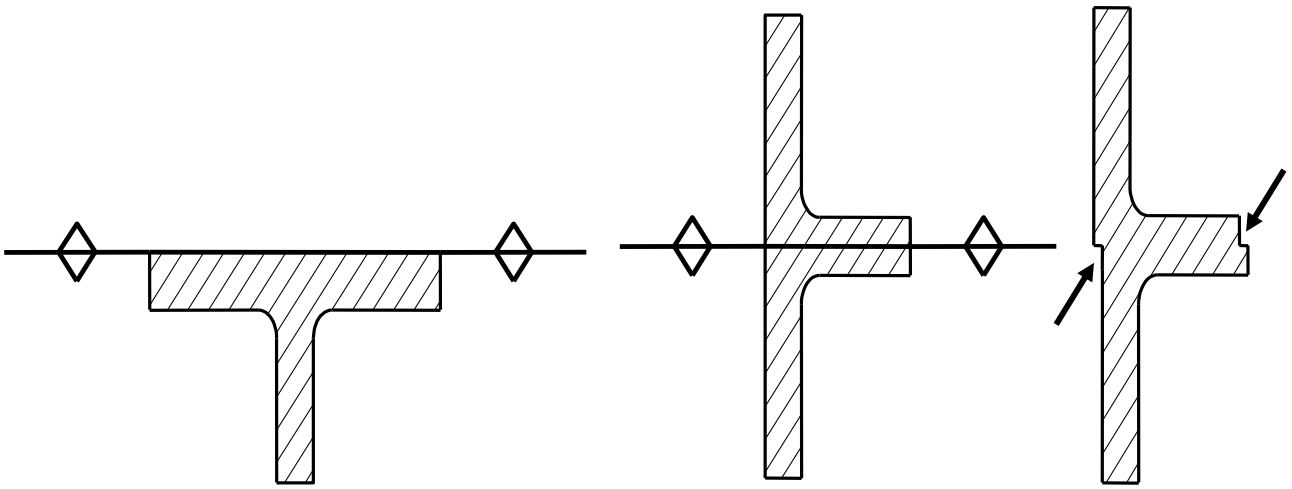


▪ **OUI :**

- Le travail du modeleur et du fondeur est le plus simple possible.
- La précision de la pièce sera maximum.

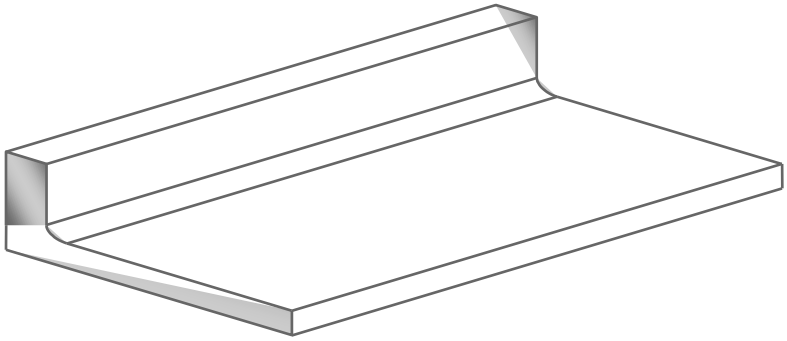
▪ **NON :**

- Le modèle doit être en deux parties, le travail du modeleur est donc plus complexe.
- La pièce risque de présenter des variations dues au jeu des châssis.



H. La déformation due à la dépouille est la plus faible :

- C'est une hauteur de démoulage la plus faible.

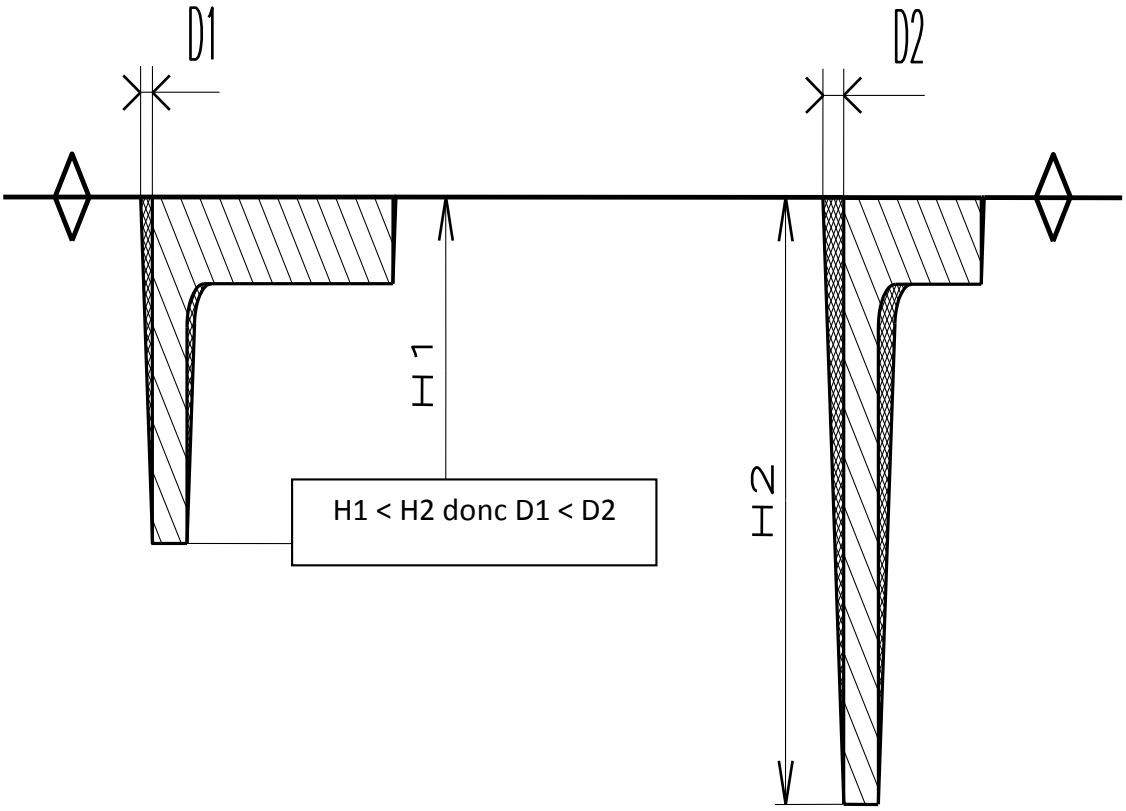


▪ ***OUI :***

La déformation due à la dépouille est la plus faible.

▪ ***NON :***

La déformation due à la dépouille est la plus importante.



I. Les bavures de la pièce seront faciles à éliminer :

Le métal s'infiltre presque toujours entre le dessous formant ainsi des toiles. Ces bavures doivent être éliminées au parachèvement. Plus le contour de la pièce au niveau du plan de joint est simple, plus le parachèvement est facile et rapide (ces bavures retrouvent aussi autour des portées).

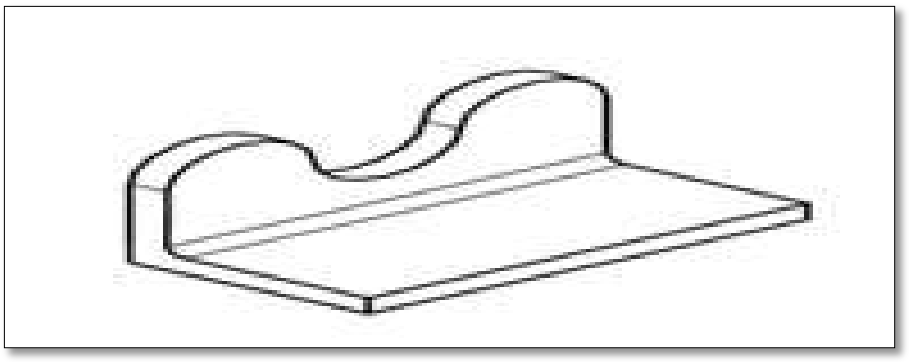


Figure II.5 : Dessin de pièce au niveau du plan.

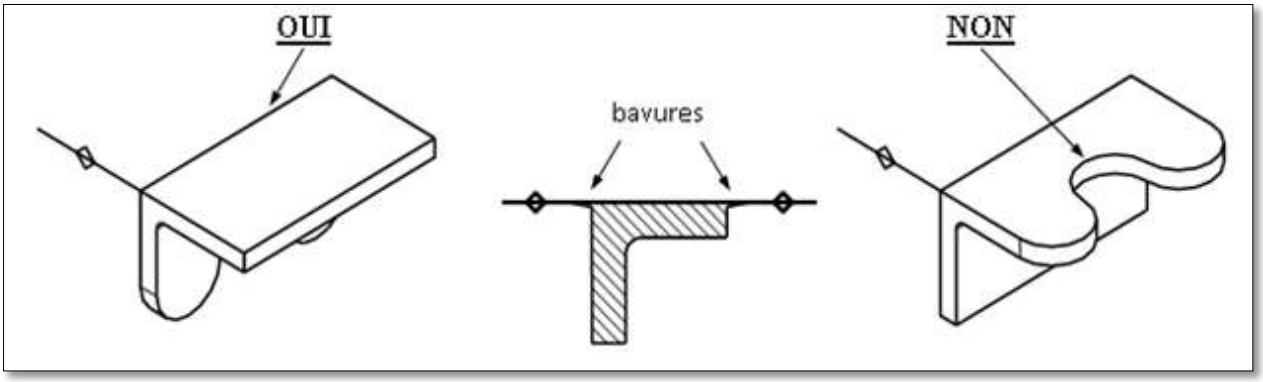
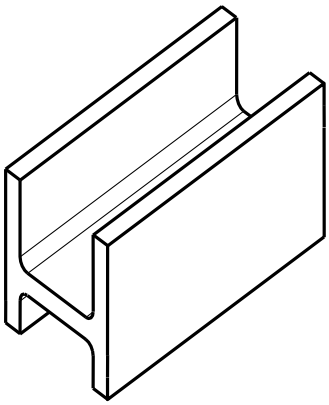


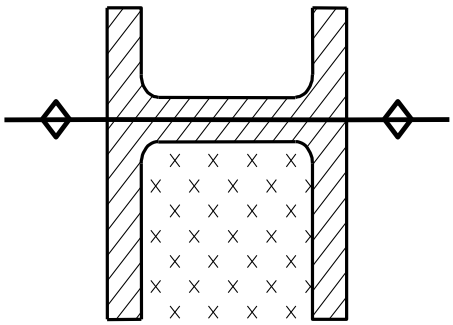
Figure II.6 : Choix du plan de joint évitant la bavure.

J. Les parties de moule fragiles sont en majorité dans le dessous :



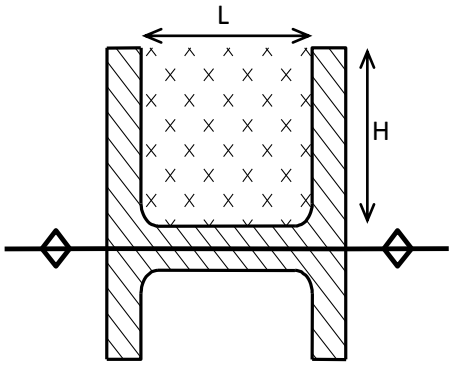
▪ ***OUI :***

La partie fragile est stable, "posée" dans le dessous.



▪ ***NON :***

La partie fragile (H ≥ L) risque de tomber dans l'empreinte.



K. Solution compatible avec les châssis disponibles :

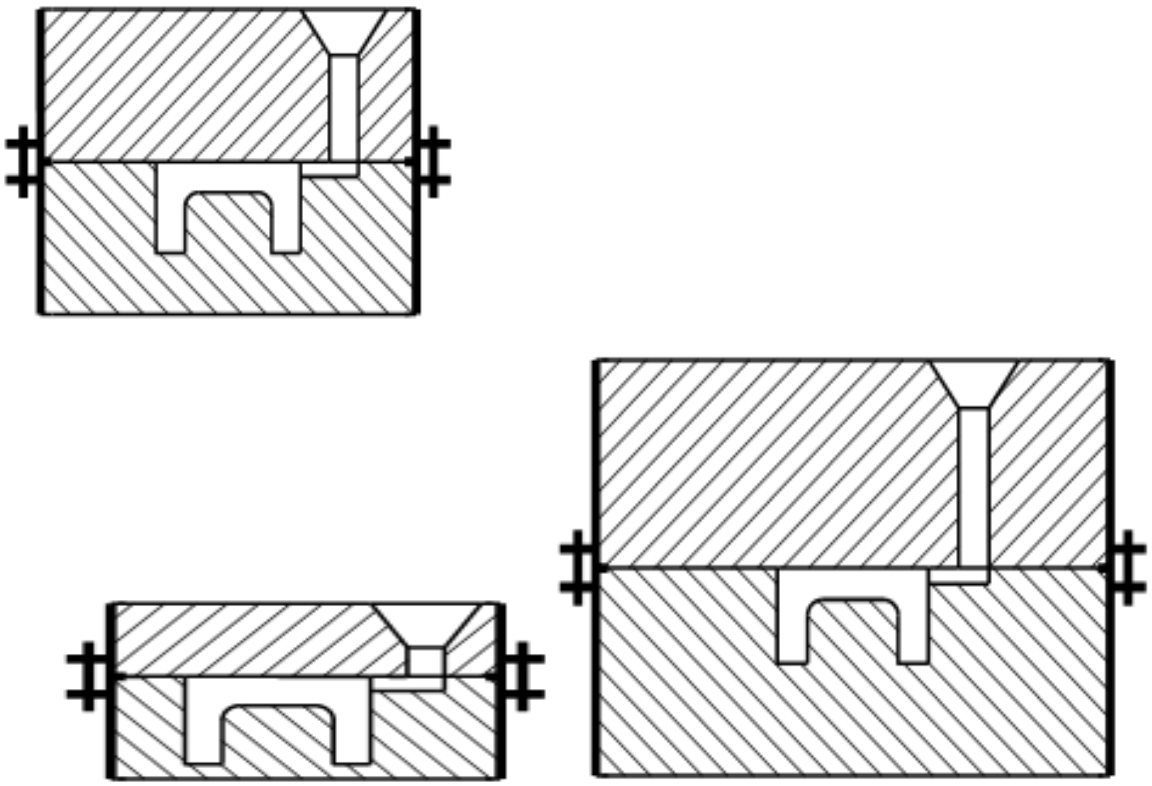
Les caractéristiques de la pièce suivant :

- Le type.
- L'hauteur.
- La largeur.
- La longueur.

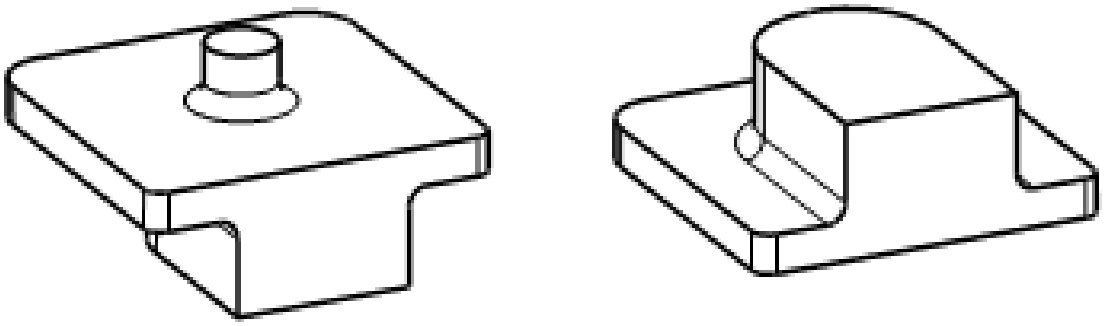
▪ **NON :**

Les problèmes suivants peuvent apparaître :

1) Moule trop fragile.
2) Hauteur de la descente insuffisante.
3) Hauteur de la descente excessive.
4) Consommation de sable excessive.

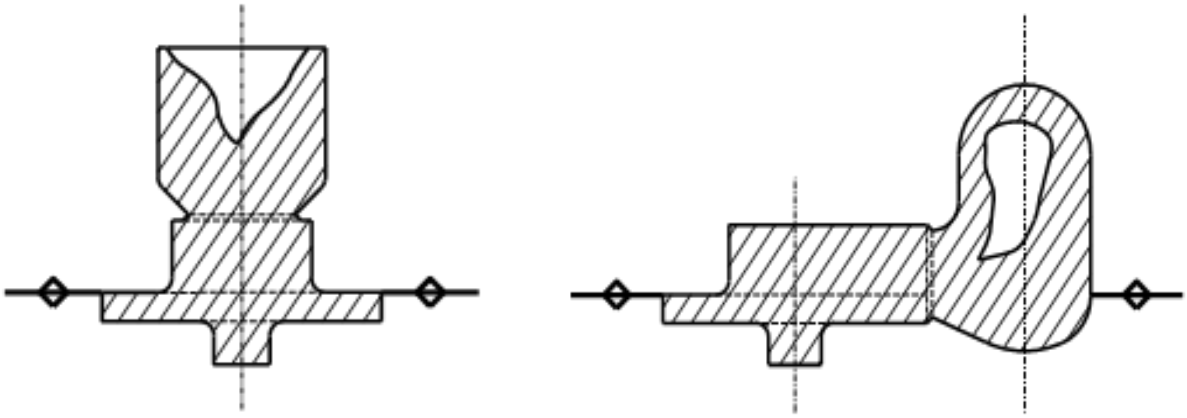


L. Les parties de pièce massives sont faciles à masselotteur :



- **OUI :**

La partie massive de la pièce est alimentée par la masselotte qui compense le retrait de cette partie.
La retassure est déplacée dans la masselotte.
Masselotte directe et débouchant Masselotte à Talon et borgne en moulage machine en moulage main.



- **NON :**
- La partie massive de la pièce (le plus souvent dans le dessous) n'est pas ou mal alimentée par la masselotte. Le retrait de cette partie provoque une retassure dans la pièce.

II.1.6 Ajout de la dépouille :

Pour faciliter l'extraction du modèle du sable serré autour de lui et éviter l'arrachement du sable, il est utile de construire le modèle en dépouille, c'est-à-dire donner aux surfaces d'un modèle une légère pente qui varie de (0,5 à 4) %.

La dépouille est l'inclinaison qui est donnée aux parois verticales d'un modèle prises dans la position de moulage, et suivant le sens de démoulage pour faciliter le décollement des parois du modèle avec celle correspondantes de l'empreinte. [9]

Si les parois verticales s'opposent au démoulage, ces parois seront dites en contre dépouille.

Lors du démoulage à la main on fait obligatoirement un ébranlagé, cette opération consiste à donner un léger jeu entre les parois verticales du moule et celles du modèle. La valeur de la dépouille dépend de la hauteur de la pièce, de la matière du modèle, du vernissage du modèle etc…. [10]

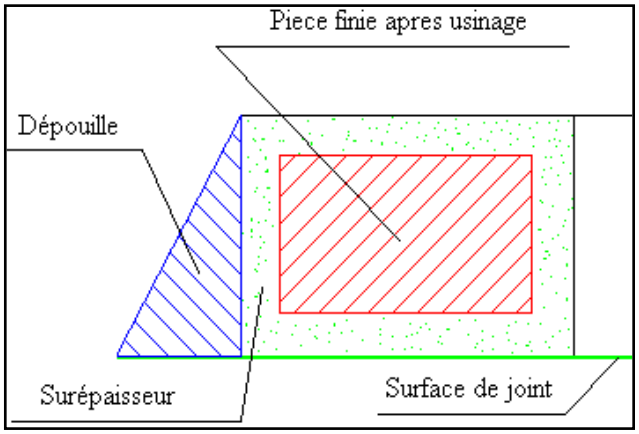


Figure II.7 : Pièce brute. [10]

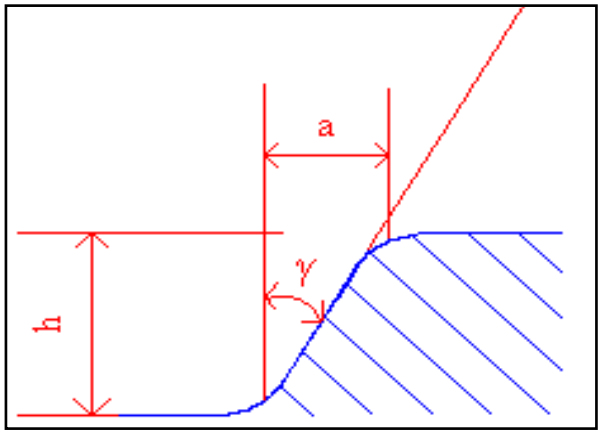


Figure II.8 : La dépouille. [10]

Tableau II.9 : Valeurs de dépouille. [10]

Hauteur du modèle ou boite à noyau H (mm)	Dépouille			
	modèle ou boite à noyau en bois		modèle ou boite à noyau métallique	
	a (mm)	ϒ (degré)	a (mm)	ϒ (degré)
Jusqu'à 20	< 1	< 3°	0,5 à 1	1°30' à 3°
20 à 50	1,0 à 2	1°30' à 2°30'	0,8 à 1,2	1° à 2°
50 à 100	1,5 à 2,5	1° à 1°30'	1,0 à 1,5	0°45' à 1°
100 à 200	2 à 3	0°45' à 1°	1,5 à 2	0°30' à 0°45'
200 à 300	2,5 à 4	0°30' à 0°45'	2 à 3	0°30' à 0°45'
300 à 500	4 à 5	0°30' à 0°45'	2,5 à 4	0°20' à 0°30'
500 à 800	5 à 6	< 0°30'	3,5 à 6	0°20' à 0°30'
800 à 1800	6	< 0°20'	< 4	< 0°15'
Plus 2000	< 10	< 0°15'	-	-

II.1.7 Le Retrait :

II.1.7.1 Définition :

On sait que tous les matériaux métalliques s'allongent sous l'effet de l'élévation de la température et rétrécissent sous la diminution de cette dernière, donc le retrait se traduit par une diminution des dimensions au cours de refroidissement.

Le retrait varie avec la nature du métal, les valeurs moyennes du retrait des métaux et alliages sont les suivantes :

- 10 millimètres par mètre (soit 1%) pour les fontes.
- 12 millimètres par mètre (soit 1,2%) pour l'aluminium et ses alliages.
- 15 millimètres par mètre (soit 1,5%) pour le cuivre et ses alliages.
- 20 millimètres par mètre (soit 2%) pour les aciers. [9]

II.1.7.2 Instruments d'exécution :

Pour pallier à ce problème, et afin de ne pas commettre d'erreurs, les spécialistes de fonderie ont mis à la disposition des modeleurs des instruments de mesure tel que :

- le mètre à retrait, au lieu d'un mètre ordinaire.
- le pied à coulisse à retrait, au lieu le pied à coulisse ordinaire.
- Pour la fonte, le mètre à retrait à une longueur de 1000 + 10 = 1010 mm, c'est-à-dire 1010 divisés en 1000 parties égales, vaut que chaque division est égale à 1,01 mm.
- Pour le bronze, un règle à retrait de 500 mm à une longueur de 500 + 7,5 = 507,5 mm, c'est-à-dire 507 divisés en 500 parties égales, vaut que chaque division est égale à 1,015 mm.
- Pour l'acier, un pied à coulisse de 350 mm à une longueur de 350 + 7 = 357 mm divisés en 350 parties égales, c'est-à-dire que chaque division vaut 1,02 mm.

II.1.7.3 Solutions pour applications :

En conséquence, il est nécessaire de calculer les cotes. Le problème se présente sous deux aspects :

a) quelle est la cote à laquelle il convient d'établir le modèle pour obtenir une pièce de dimension donnée ? Ce problème se pose au cours de la construction.

b) on mesure une dimension sur un modèle, quelle sera la dimension correspondante de la pièce moulée.

c) C'est le problème qui se pose au cours de la vérification des modèles terminés.

- ✓ Soit :

M : la cote du modèle en mm.

C : la cote correspondante de la pièce en mm.

R : le retrait du métal de la pièce en %.

$$M = C + R \times C \quad (1)$$

$$C = M / 1 + R \quad (2)$$

- ❖ **Application N°1 :**

- A quelle dimension faut-il tourner le diamètre du modèle d'une pièce en acier cotée 155 mm sur le dessin ?
- A quelle dimension faut-il tourner le diamètre du modèle d'une pièce de fonte cotée 60 mm sur le dessin ?
- quelle est la dimension à donner au modèle pour obtenir sur une pièce en aluminium une cote de 107,5 ?

- ❖ **Application N°2 :**

- Sur un modèle établi pour être coulé en acier, on a relevé la cote 158 mm, mesurer la dimension correspondante de la pièce ?

- Sur un modèle établi pour être coulé en fonte, on a relevé la cote 71,7 mm, mesurer la dimension correspondante de la pièce ?

II.1.7.4 Défauts engendrés par le retrait :

1) Retassure :

A. Mécanisme de formation des retassures :

Cas de moule en forme de cylindre droit coulés à découvert. L'alliage se refroidit par conduction à travers les matériaux constituant le moule et par rayonnement au niveau de la surface libre.

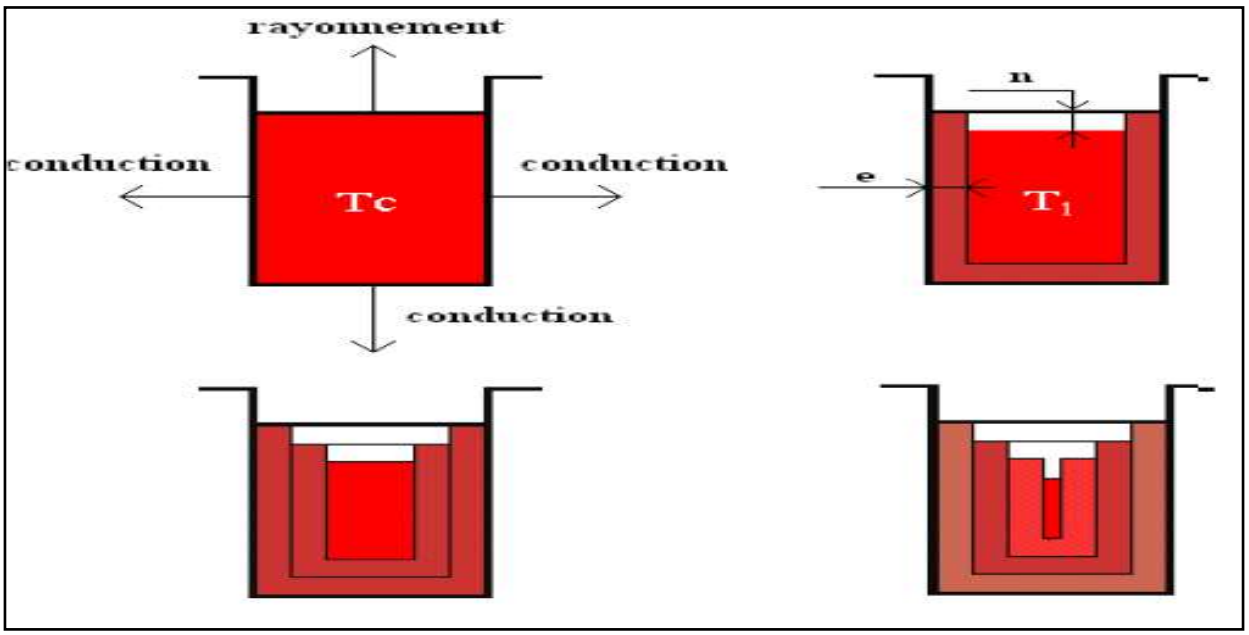


Figure II.9 : Mécanisme de formation de retassure. [10]

Après un temps **(t),** après la coulée, il s'est formé une carapace solide d'épaisseur **(e)** au niveau des surfaces d'échange. Dans le même temps l'alliage subit une dénivellation **(n)** du fait :

- De la contraction ($V_0 - V_1$) de l'alliage formant la carapace.
- Du début de contraction à l'état liquide dont la température ($T_1 < T_0$).

Le même raisonnement peut être tenu à des temps différents : **t →(e, n).** Il y a de plus en plus de solide, le liquide descend à la cour de la pièce. Après disparition de la dernière goutte d'alliage liquide, la pièce se présente comme la figure ci-dessus.

- ✓ **Remarque :** la croute se formant en surface, soumise à son poids et à la pression atmosphérique peut résister après un certain temps de solidification, on trouve alors une retassure interne (voir figure 9).

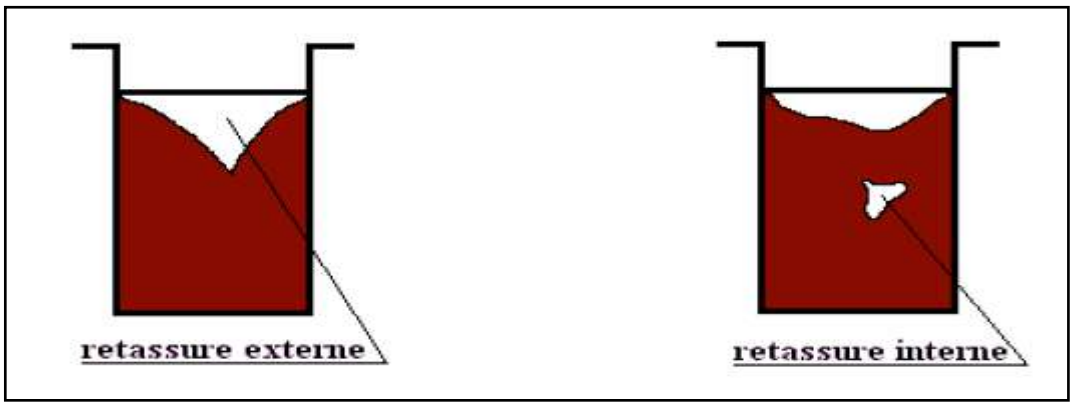


Figure II.10 : Les différents types de retassures. [10]

Cas de moule fermé en forme de cylindre droit.

Le liquide est uniformément entouré par les matériaux constituant le moule. Après un certain temps **t**, une carapace **e** s'est formée. Le niveau de liquide a tendance à baisser à l'intérieure de la carapace. La croute supérieure correspondant à la face AD conserve longtemps une consistance insuffisante pour résister à son poids et à l'action de la pression atmosphérique.

Elle se creuse donc au fur et à mesure de la contraction liquide de l'alliage emprisonné à l'intérieur de la carapace solide (voir figure 10).

Il arrive un moment où la croute AD ne se déforme plus, elle résiste à l'action P_a. Un vide partiel se forme dans l'enceinte solide. Il apparait ainsi une retassure interne. [10]

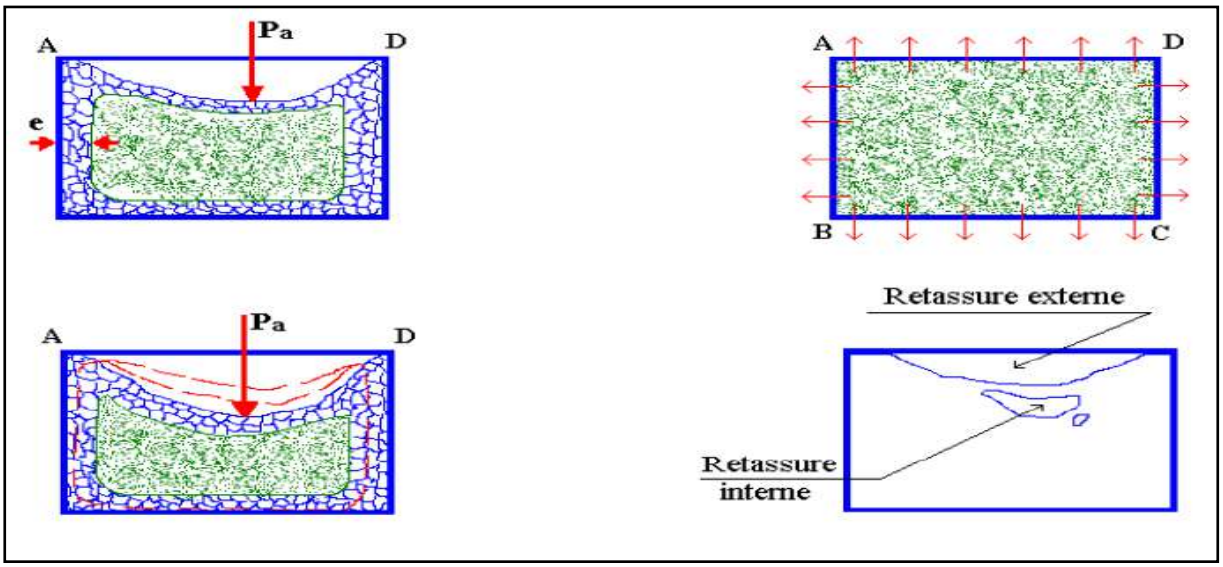


Figure II.11 : Mécanisme de formation de retassure en moule fermé. [10]

B. Comment éviter la retassure :

- **Refroidisseur :**

Le principe consiste à accélérer la solidification de la partie massive pour éviter la formation de retassures. La solidification peut être accélérée par un élément externe dont la conductibilité thermique est beaucoup plus importante que celle du moule. Ou par un élément interne métallique solide de même nuance que l'alliage coulé et noyé dans la pièce.

- **Refroidisseur externe (de surface) :**

Masse (fonte, cupro-aluminium, graphite) de dimension réduite, emballée dans le sable de moulage. Dont une surface sert de surface moulante dans l'empreinte.

Leur rôle est de créer localement des vitesses de refroidissement supérieures à celles du sable de moulage. Soit pour orienter la solidification de la pièce, soit pour donner une structure particulière à l'alliage (voir figure 11).

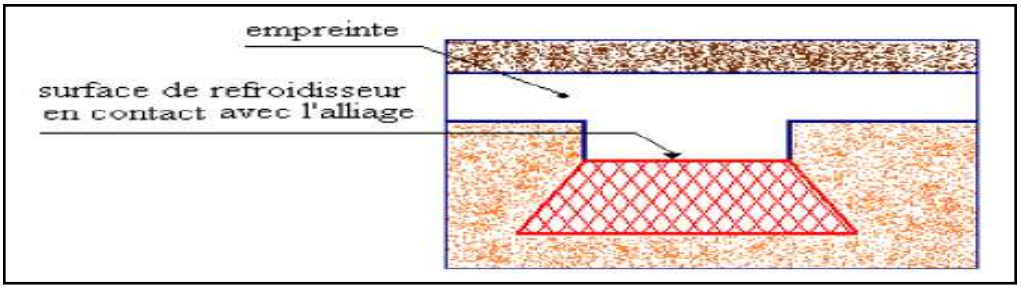


Figure II.12 : Refroidisseur externe.

➢ **Refroidisseur interne :**

Masse métallique disposée dans l'empreinte afin d'être noyée dans l'alliage après la coulée. Il est employé lorsque les solutions utilisant des masselottes ou de refroidisseurs externes ne peuvent être retenus.

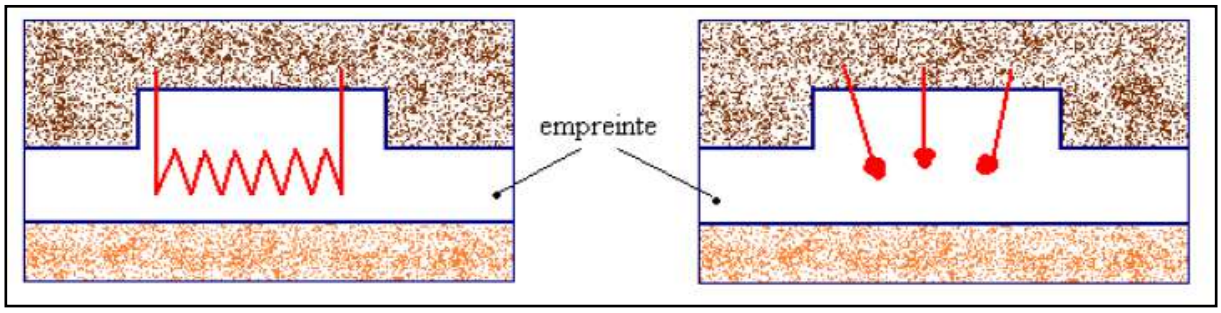


Figure II.13 : Refroidisseur interne.

➢ **Masselotte :**

La masselotte est un réservoir d'alliage placé en charge sur la pièce de façon à compenser à chaque instant les variations de volume à l'intérieur de la pièce et se solidifier la dernière.

La retassure se formera dans cette masselotte sera ainsi déplacée.

- Pour avoir cette solidification dirigée, le temps de la solidification de la masselotte doit être supérieur au temps de solidification de la partie de pièce. [10]

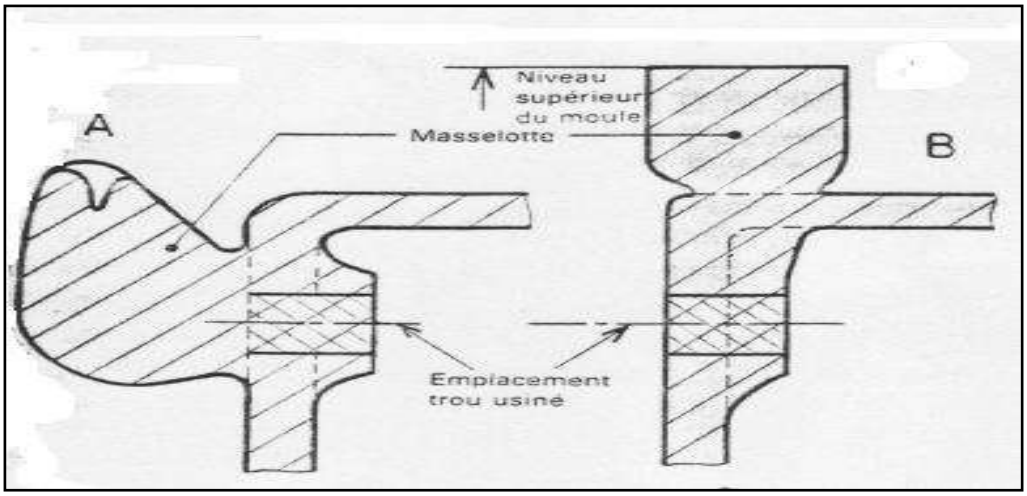


Figure II.14 : Dessin de Figure Masselotte. [10]

II.1.8 Stabilité des Noyaux Remoulés (LES PORTEES) :

Les noyaux reposent dans les moules par l'intermédiaire de portées dont le rôle est considérable, tout pour l'exactitude de la pièce que pour la bonne ventilation du moule et la stabilité des noyaux.

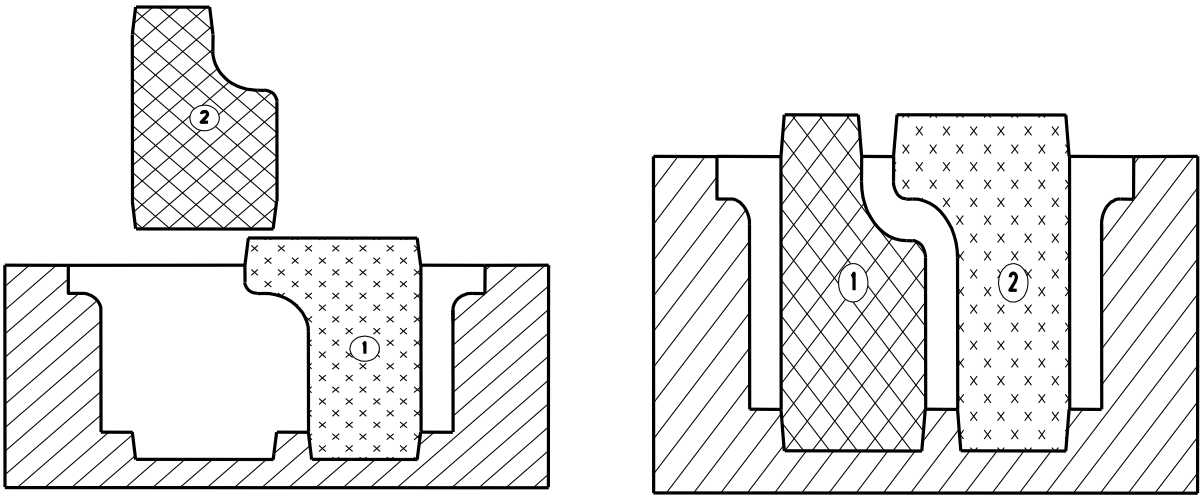
- La dimension des portées est fonction :
  - du poids du noyau.
  - des possibilités de fixation du noyau dans le moule.
  - des possibilités de calage du noyau.
  - des réactions s'exerçant sur le noyau, soit au cours des manutentions, soit au remoulage, soit lors de la coulée.

Lors du remoulage du noyau dans sa portée, il se produit généralement une bavure celle-ci. L'importance de cette bavure est fonction de la précision des côtes du noyau et du moule.

Des portées parfaitement étudiées, exécutées dans des boites de dimensions très précises et peu ébranlées, assurent le minimum de bavure, réduisant ainsi le travail d'ébarbage.

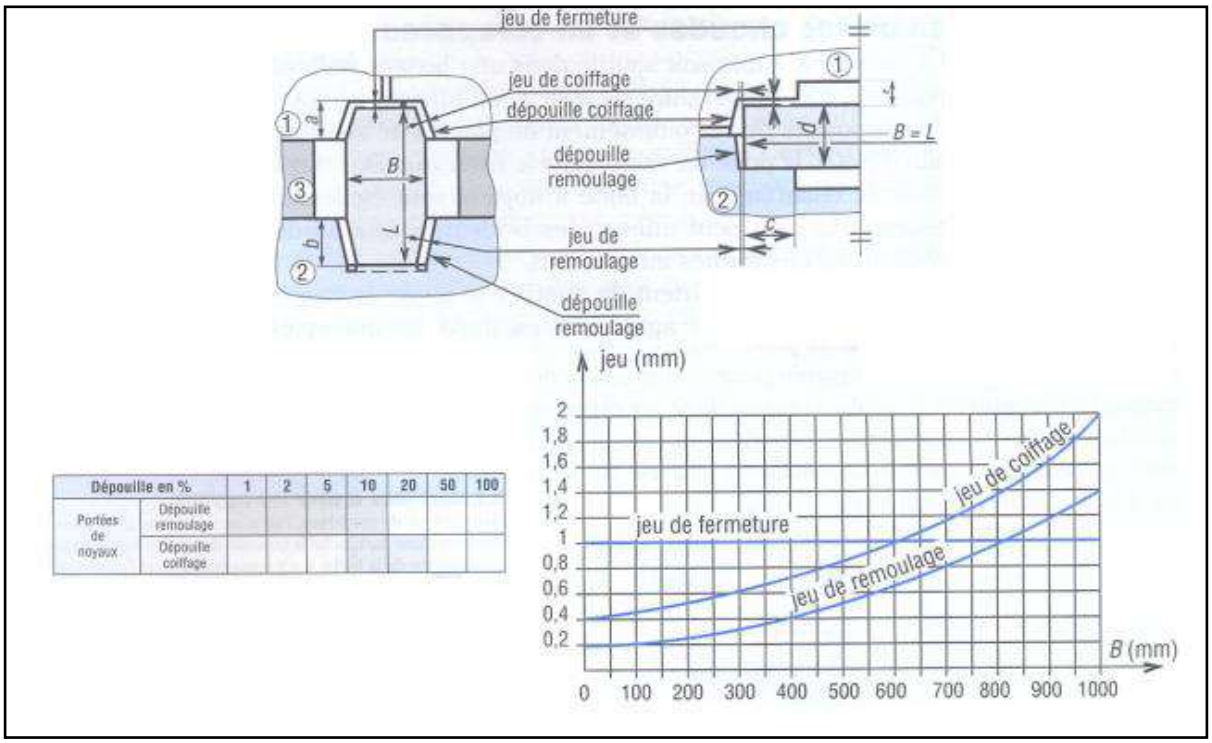
Le repérage des portées est très important. En effet, lui seul permet de fixer le sens de remmoulage.

Les portées remoulant dans le fond seront munies d'un cordon d'usure dans lequel s'amasseront les quelques grains de sable risquant de se détacher lors du remmoulage. [11]



NON : **OUI :**

Le noyau de gauche ne peut pas être remmoulé après celui de droite, on doit donc le remmouler en premier. **[11]**



Dépouille en %		1	2	5	10	20	50	100
Portées de noyaux	Dépouille remoulage							
	Dépouille coiffage							

Figure II.15 : Dimensionnement de la portée du noyau. [8]

II.1.9. Châssis :

Un châssis est un cadre rigide devant contenir et maintenir le sable qui constitue le moule. Les matériaux constitutifs sont l'acier moulé, la fonte, l'acier profilé ou soudé ou l'alliage d'aluminium. Un châssis peut être carrée, rectangulaire, rond, polygonale ou de forme quelconque. [11]

Tableau II.10 : Différents types de châssis. [11]

l	**Largeur "*l*" des châssis rectangulaires, côté des châssis carrés ou diamètre des châssis ronds (mm)**												
	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
	Hauteur "H" en mm												
315	100												
400	125	125											
500	125	125	125										
630	125	160	160	160									
800	160	160	160	160									
1000	160	160	160	200	200	200							
1250	160	200	200	200	200	200	200						
1600	200	200	200	200	200	250	250	250					
2000	200	200	200	250	250	250	250	250	250				
2500		250	250	250	250	250		315	315	315			
3150			250	250	250	315	315	315	315	315	315		
4000			315	315		315	315	315	315	400	400	400	
5000				315	315	315	315	400	400	400	400	400	400

Chapitre III :

Le Procédé de Fonderie Cire Perdu

III.1 Définition:

La fonderie cire perdue est un procédé de mise en forme des métaux qui consiste à fabriquer, couche par couche, un moule en céramique autour d'un modèle en cire qui sera ensuite éliminé. Ce moule est ensuite fritté et porté à haute température avant la coulée du métal.

Ce procédé permet d'obtenir un état de surface optimal, des précisions dimensionnelles maximales – ce qui lui confère l'appellation de « fonderie de précision » – alliés à une très bonne santé interne et la possibilité de réaliser des zones minces. Ainsi, le procédé cire perdue est adapté à la coulée d'alliages à très haut point de fusion tels que les superalliages et les aciers. Il convient parfaitement à la mise en forme de pièces dont la métallurgie nécessite un séjour prolongé du moule à haute température du fait de la bonne réfractarité et de la stabilité chimique des céramiques. Par ailleurs, ce procédé peut être appliqué à tous les types d'alliage (aluminium, Inconel, cuivreux, acier, titane) et à une large gamme de taille de pièces, de quelques grammes à une centaine de kilogrammes. [14]

III.2 Un peu d'histoire:

Dans les années 40, la transposition de ce procédé au milieu industriel a été réalisée par les Américains et les Anglais pour fabriquer des pièces complexes avec une grande précision dimensionnelle. Un peu plus tard, en France, entre 1960 et 1970, les premières entreprises se lancent dans l'aventure de la cire perdue. De nos jours, le procédé cire perdue est utilisé pour des applications dans tous les domaines de l'industrie : aussi bien dans le médical avec la fabrication de prothèses chirurgicales que dans l'aéronautique avec les aubes de turboréacteur, l'énergie, l'armement, le transport terrestre, la joaillerie ou l'art. [14]

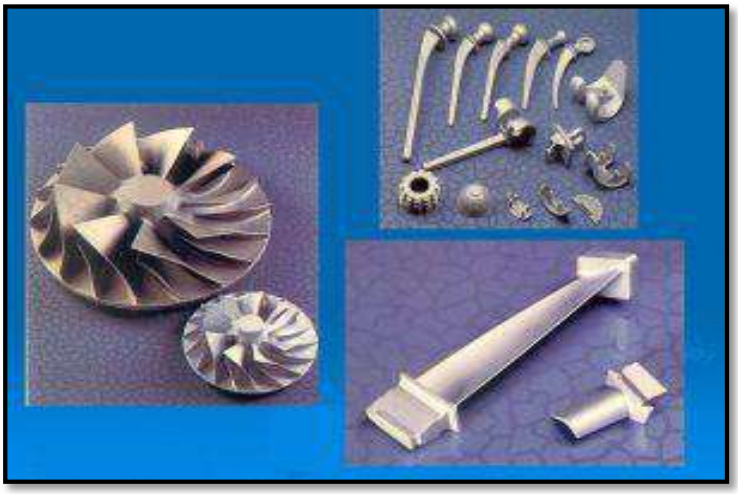


Figure III.1 : Exemples de pièces de fonderie cire perdue. [14]

III.3 Les différentes étapes du procès de fabrication en fonderie cire perdue:

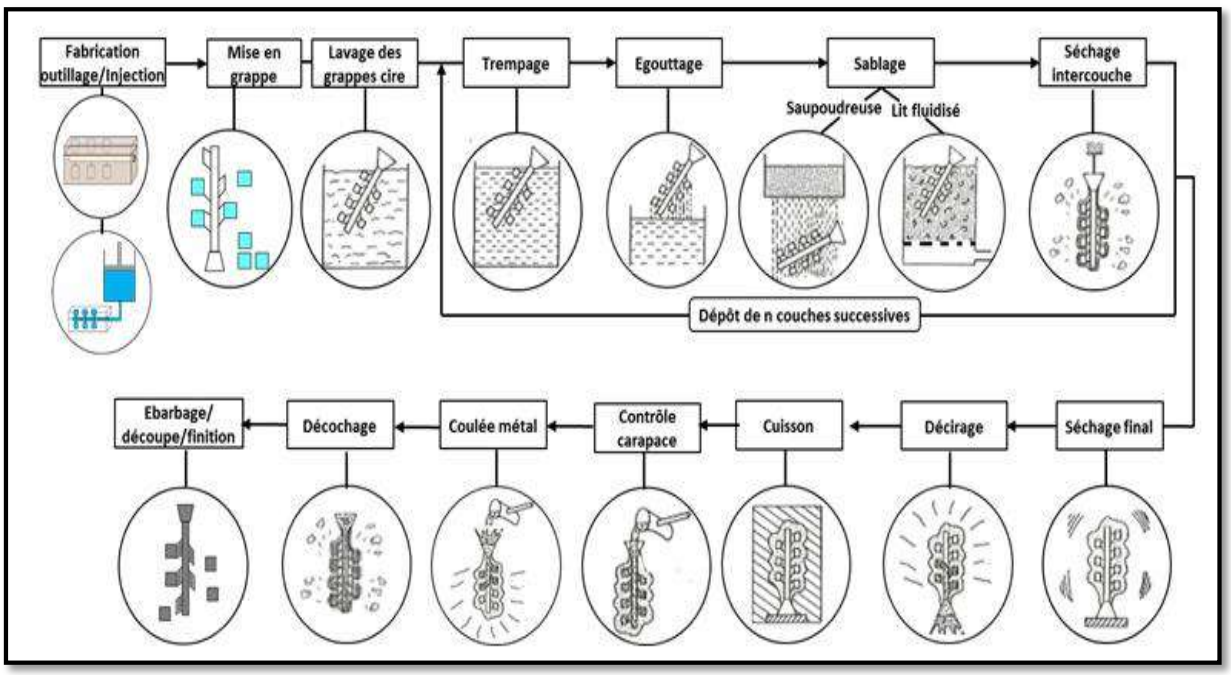


Figure III.2 : Etapes du procès de fabrication de pièces de fonderie cire perdue. **[14]**

Le procédé de moulage à la cire perdue est un procédé à moule et modèle non-permanents. Il est composé de plusieurs étapes : la fabrication du modèle en cire, la mise en grappe, la réalisation de la carapace, le décirage, le frittage et enfin la coulée de la pièce. **[14]**

III.3.1 La fabrication du modèle en cire : fabrication additive ou injection en moule métallique:

Première étape du procédé, la fabrication du modèle en cire consiste en la reproduction en cire de la pièce métallique à fabriquer. Les parties évidées et les zones renfermées – difficiles d'accès et difficiles à sécher – tels que les trous de petite taille ou les trous borgnes de diamètre très inférieur à leur profondeur, sont obtenus avec des noyaux soit en cire soluble soit en céramique. Différents procédés sont utilisés pour la fabrication des modèles en cire : le moulage en élastomère, la fabrication additive et l'injection en moule métallique. Le moulage de la cire dans un moule en élastomère est utilisé pour de petites pièces unitaires ou pour de très petites séries dans la joaillerie et le dentaire. Cette technologie a de plus en plus tendance à être remplacée par la fabrication additive où les modèles en cire sont réalisés à partir d'un fichier numérique et d'une machine d'impression 3D cire. Cette technique, plus onéreuse, permet un gain de temps et est utilisée généralement pour la mise au point de nouvelles pièces. Les fonderies s'équipent en machine d'impression 3D de cire pour la réalisation de prototypes et de modèles pour petites et moyennes séries.



Figure III.3 : Fabrication additive de modèles en cire pour la fonderie de précision (machine 3D). [17]

Enfin, pour la production en série, on réalise la fabrication des modèles avec une presse, par injection sous pression de la cire liquide dans des moules métalliques. C'est le

principe le plus utilisé en fabrication. Il est automatisable et destiné aux moyennes et grandes séries. Pour une fabrication optimale des modèles, certains paramètres doivent être sous contrôle : la température de la cire dans la cuve, la température dans l'unité d'injection, la température de la buse d'injection, la température du moule ou de la table et du plateau de serrage, la pression de serrage du moule, la pression d'injection de la cire, le débit d'injection et enfin le temps de cycle (temps d'injection de la cire plus temps de maintien après injection). [17]

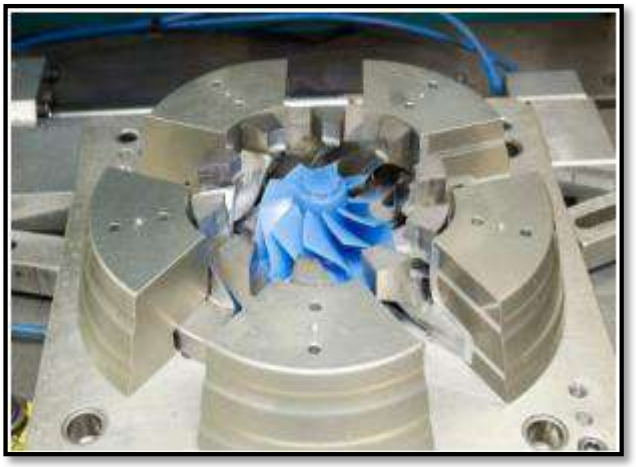


Figure III.4 : Réalisation d'un modèle en cire par injection dans un moule métallique. [16]

III.3.2 La mise en grappe:

La mise en grappe consiste à assembler en une seule structure en cire (surmontée d'un entonnoir de coulée) les modèles des pièces, les attaques, barreaux, pavés, jets de coulée et autres accessoires tels que inserts métalliques, filtres, bouchons, évents de décirage, pions de spectrographie et éprouvettes d'essais mécaniques. D'une façon générale, les cires accessoires servent à élaborer les jets diffèrent des cires à modèles par une bonne résistance mécanique, un bas point de fusion et une viscosité plus faible. Ainsi, lors du décirage, ces cires s'éliminent rapidement pour créer un passage à la cire des modèles et éviter tout risque de bouchon pouvant provoquer un endommagement de la carapaceet les systèmes d'alimentation de coulée. Ces cires peuvent être vierges ou recyclées mais. [15]

- Une grappe comprendra en général :
  - Un entonnoir de coulée ;
  - Des canaux de coulée horizontaux et verticaux ;
  - Les modèles en cire fixés sur les canaux de coulée ;

• Des accessoires de manutentions. [15]

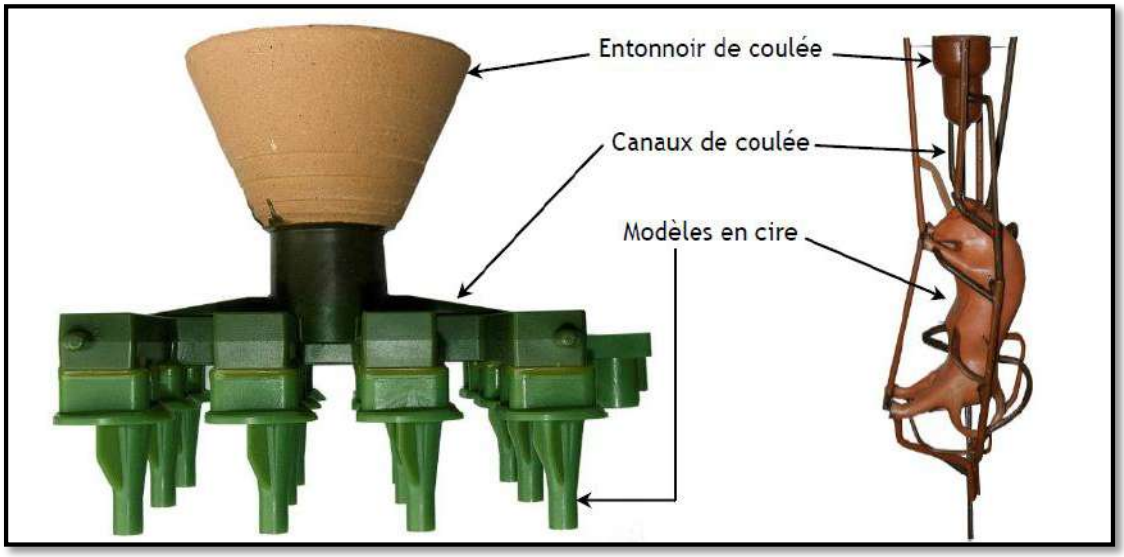


Figure III.5 : (a) Modèle en grappe ;(b) Exemple d'un modèle pièce unique. [15]



Figure III.6 : Grappe multi-empreintes en cire fonderie cire perdue. [14]

III.3.3 Le dégraissage ou le lavage de la grappe:

Le dégraissage est l'opération de nettoyage de la grappe avec une solution acide afin d'éliminer les agents démoulant et autres graisses dues aux manipulations lors des opérations de mise en grappe.

Cette étape est nécessaire pour une meilleure adhérence de la première couche de revêtement sur la grappe. [14]



Figure III.7 : Opération de dégraissage de la grappe en moulage cire perdue. [14]

III.3.4 La réalisation de la carapace:

Ensuite, il s'agit de réaliser la carapace à partir de la grappe en cire préalablement dégraissée. Les couches sont obtenues par trempages successifs du modèle dans des barbotines (mélange d'eau, de liant, de farines de céramiques et d'adjuvants organiques) suivis d'un saupoudrage de sable (zircon, molochite, corindon, …) appelé « stucco ». Chaque séquence de trempage et de stuccage est suivie d'un temps de séchage. La première couche ou couche de contact est primordiale pour obtenir le très bon état de surface de la pièce finale.

Elle doit être en particulier exempte de défauts, avoir un très bon état de surface et être capable de supporter la température de coulée. La farine pour la barbotine et le stucco du sablage sont très fins, et permettent d'épouser au mieux les détails du modèle.

Les couches suivantes sont dites «couches de renfort» avec une granulométrie plus grossière. Ces couches extérieures confèrent à la carapace les propriétés mécaniques suffisantes pour supporter la pression métallo-statique lors de la coulée.

Un certain nombre de couches successives sont appliquées sur la grappe en cire pour obtenir une épaisseur généralement comprise entre 7 et 15 mm. Au total, près d'une dizaine de couches successives sont nécessaires.

Une attention toute particulière doit être portée sur la création de la première couche qui est la seule en contact avec le modèle puis avec le métal liquide. Elle doit donc assurer la reproduction des moindres détails du modèle ainsi que l'état de surface attendu.

L'avantage est que la carapace d'épaisseur quasi constante autour de la cavité permet un refroidissement homogène du métal une fois coulé donc une bonne qualité métallurgique. Par contre le cycle d'enrobage pour fabriquer la carapace peut durer plusieurs jours. De plus, dans les cas des résines, leur coefficient de dilatation supérieur à celui de la céramique peut provoquer des fissures de la carapace, il faut donc en tenir compte lors de la conception du modèle. [17]



Figure III.8 : a) Ligne de trempage automatique ; b) Trempage manuel. [18]

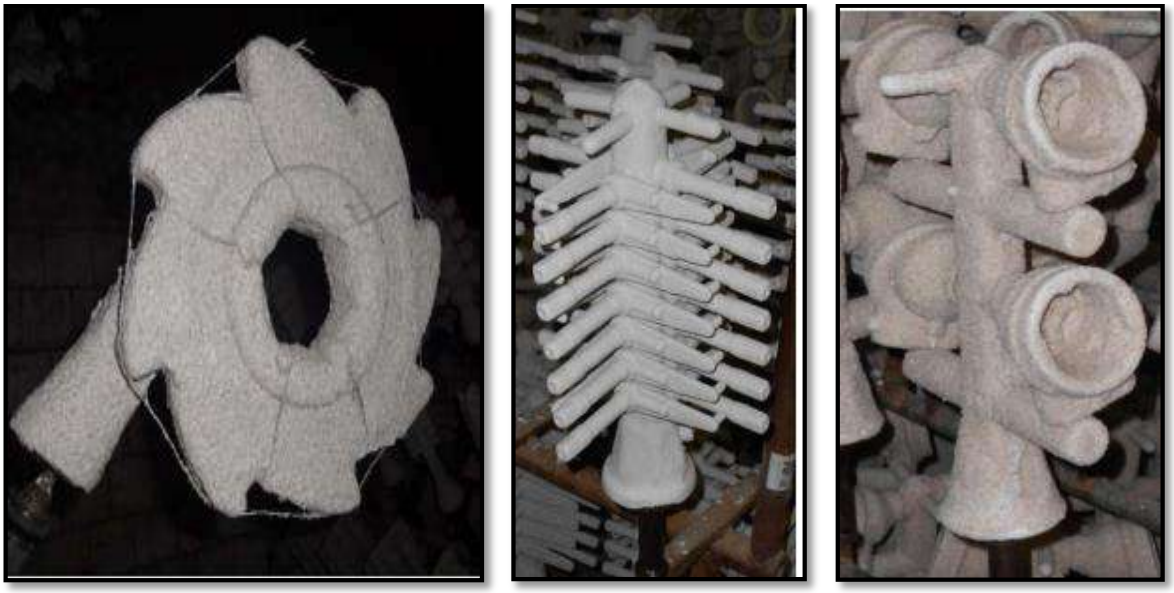


Figure III.9 : Carapaces en céramique formées : a) Grande pièces ; b) De petites pièces ; c) Moyennes pièces. [18]

III.3.5 Le décirage:

Le décirage est l'élimination du modèle en cire de la carapace après un séchage final pour laisser place à l'empreinte vide. Cette opération se fait soit en autoclave soit au four flash.

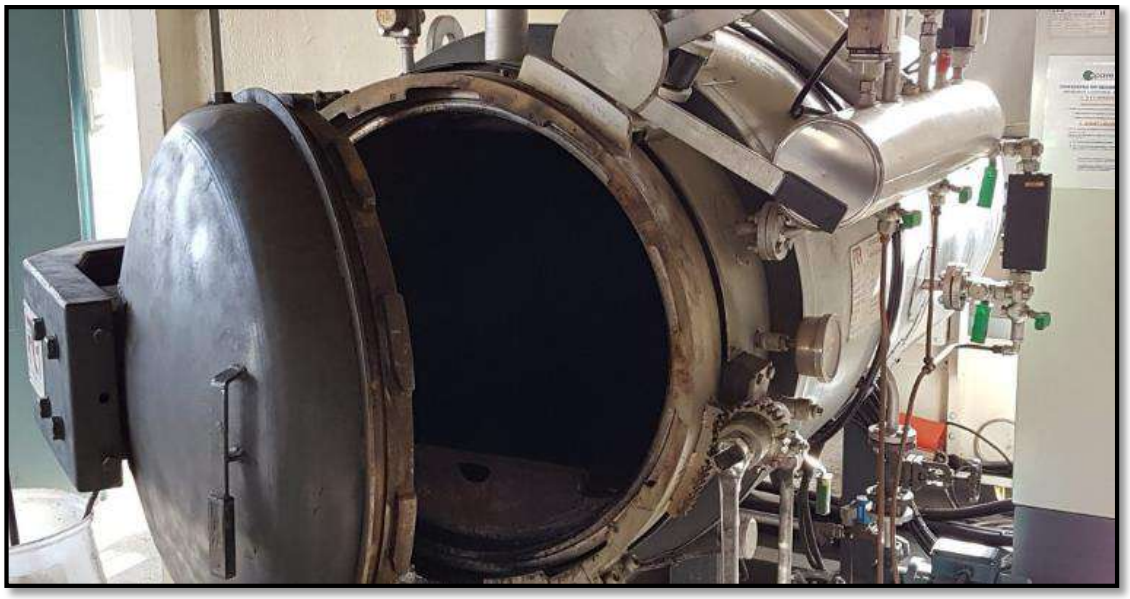


Figure III.10 : Autoclave de décirage des grappes en cire perdue. [14]

L'autoclave envoie de la vapeur d'eau chaude à 160°C sous une pression de 8 bars sur la carapace renversée (entonnoir de coulée vers le bas). Cette vapeur chaude sous pression agit de deux manières.

D'une part, la pression de la vapeur va opposer une force pour neutraliser les contraintes liées à la dilatation de la cire alors chauffée. D'autre part, la température de la vapeur va faire fondre la cire, en commençant par celle en contact avec la carapace, ce qui libère de l'espace suffisant pour résorber la dilatation du modèle sans endommager la carapace avant la fusion totale de la cire. En outre, des bouchons de décirage sont prévus sur la grappe dans les zones massives, pour permettre une évacuation plus rapide de la cire fondue au contact de la carapace et libérer cet espace au début du décirage.

L'autre technologie utilisée est le décirage en four flash dans laquelle le séchage final des moules étant terminé, ces derniers sont chargés dans le four préchauffé à une température comprise entre 850°C et 1000°C. La cire est alors brûlée instantanément ce qui réduit la poussée due à sa dilatation sur le moule. Par ailleurs, des bouchons de décirage sont placés sur les parties massives éloignées de l'entonnoir de coulée pour éviter un endommagement de la carapace. [14]

III.3.5.1 Recyclage de la cire :

La cire issue des carapaces ne peut pas être utilisée pour la réalisation de modèle. En effet les caractéristiques de retrait et d'injection de la cire doivent être parfaitement connus, d'où l'utilisation de cire neuve ayant toujours les mêmes propriétés.

En revanche, cette cire peut être utilisée pour la réalisation des arbres "porte modèles". La première opération retire l'eau mélangée à la cire liquide. Chauffée à une température supérieure à 100°C, l'eau est évacuée de la cire sous forme de vapeur.

III.3.6 Le frittage de la carapace:

Les carapaces sont ensuite placées dans le four de frittage (après un décirage en autoclave) ou restent dans le four (dans le cas du décirage flash). Elles subiront un cycle de traitement thermique entre 900°C et 1150°C. [14]

- Cette opération a trois objectifs:

• Eliminer les résidus de cire de la carapace par combustion ;

• Cuisson de la céramique (durcissement) ;

• Mise de la carapace à une température proche de celle du métal en fusion à couler, afin d'éviter des chocs thermiques. Un choc thermique crée de brusques changements de température et peut provoquer l'éclatement de la carapace durant la coulée.



Figure III.11 : Frittage de carapace.

III.3.7 La coulée du métal:

Puis, comme dans tout procédé de fonderie, on remplit la carapace préchauffée avec l'alliage fondu. En fonction de la métallurgie et des performances recherchées, la coulée peut être réalisée à l'air ou sous atmosphère contrôlée (argon, azote) ou bien encore sous vide (titane, superalliage). Elle peut être faite par gravité, par retournement ou par centrifugation. Pour obtenir certaines structures métallurgiques particulières (colonnaires, monocristallines), la coulée se fait à l'intérieur d'un four sous atmosphère et un gradient de refroidissement est imposé à la carapace. [14]

La quantité de métal à couler est fonction du volume de l'arbre modèle**.** Ce volume est calculé grâce au poids de l'arbre en cire et de la masse volumique de la cire utilisée.

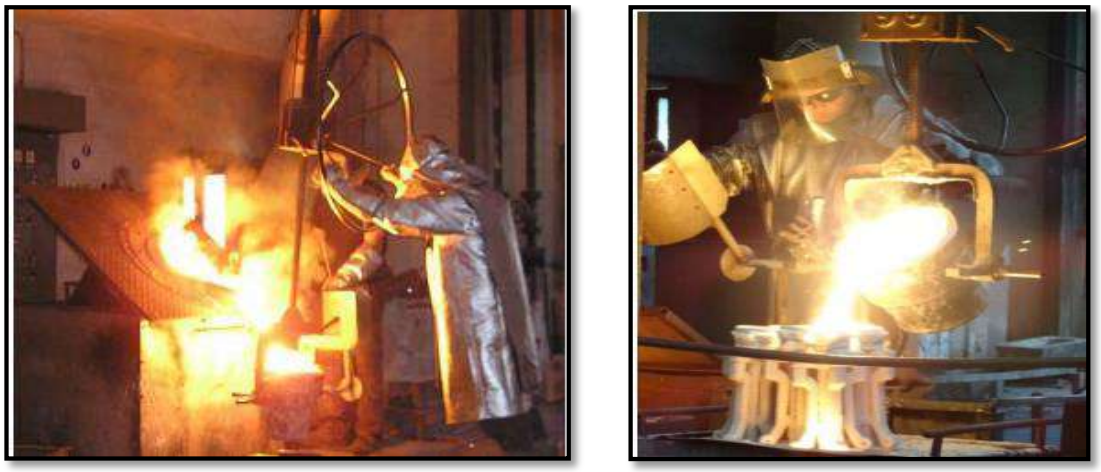


Figure III.12 : Coulée des carapaces en céramiques. [18]

III.3.8 Refroidissement:

Lors du refroidissement, le métal se solidifie. Cette phase, si elle n'est pas maîtrisée, peut provoquer des fissures ou des criques sur la pièce.

Pour éviter cela, la conception même du système d'alimentation est importante. Il faut en effet que la zone d'alimentation du métal se solidifie en dernier afin de continuer à alimenter la pièce lors du retrait. Pour faciliter cela, divers moyens peuvent être utilisés :

• Protection des zones d'alimentation à l'aide d'un isolant ;

• Limitation des échanges de chaleur en enfermant la carapace dans une enceinte afin d'homogénéiser le refroidissement.

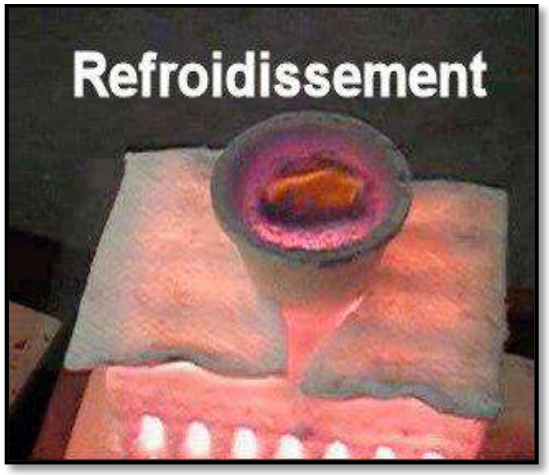


Figure III.13 : Refroidissement de la grappe.

III.3.9 Les opérations de parachèvement:

Après la solidification et le refroidissement, la carapace est détruite par une opération de décochage qui peut être réalisée par vibrations mécaniques ou par jet d'eau. Ensuite, l'étape de d'égrappage permet de détacher les pièces de la grappe. Les pièces contenant des noyaux céramiques font l'objet d'un décochage chimique pour dissoudre les noyaux dans une solution basique adaptée (KOH ou NaOH). Les finitions et les contrôles (CND, dimensionnel, …) s'ensuivent afin d'obtenir des pièces conformes au cahier des charges. [14]

III.3.9.1 Décochage et finition:

Suite à la coulée et au refroidissement, la pièce métallique existe, mais elle est encore fixée au système d'alimentation et enrobée de céramique.

❖ Pour obtenir les pièces finales, il reste donc à :

- Retirer la céramique de l'arbre métallique (décochage) ;
- Découper les pièces du système d'alimentation (découpe);
- Réaliser la finition des pièces, c'est-à-dire retirer les attaques de coulée et éventuellement supprimer les défauts d'aspects (plans de joint dus à la réalisation des modèles...) par grenaillage et retouches manuelles.

a) Décochage:

Le décochage consiste à retirer la céramique de la pièce métallique. Pour cela, diverses méthodes peuvent être utilisées:

• Décochage par vibrations :

Le décochage par vibrations (présenté sur la vidéo) est le plus utilisé, du fait de sa grande rapidité de mise en œuvre. Mais il est surtout dédié aux pièces peu fragiles.

• Décochage par jet d'eau :

Le décochage par jet d'eau est plutôt dédié au décochage de pièces fragiles (pièces fines, en aluminium...).

III.3.9.2 Découpe des pièces et grenaillage :

Le découpage des pièces de la grappe de coulée est réalisé par tronçonnage. Préalablement, l'arbre peut être grenaillé afin d'éliminer les résidus de céramique qui resteraient sur la grappe.

La découpe des pièces laisse l'amenée de coulée sur la pièce, qu'il faut donc retoucher pour l'obtention de la pièce finale.

III.3.9.3 Finitions:

Dernière étape de fabrication, la finition permet d'obtenir la pièce finie.

La suppression de l'amenée de coulée et des bavures est nécessaire.

- ✓ D'autres opérations peuvent être nécessaires pour répondre aux besoins des clients:

  • Polissage ;

  • Traitements thermiques ;

  • Contrôles dimensionnels ou métallurgiques (ressuage, ultrason...).

III.4 Types de pièces :

Ce procédé de moulage s'applique à tous les types de pièces mécaniques, des petites aux grandes dimensions, de quelques grammes à 25kg, de formes simples à des formes compliquées y compris des formes en contre dépouille.

Ces caractéristiques techniques (dimensions, état de surface) ont plus de précisions que les autres procédés de fonderie. Les tolérances obtenues varient selon l'expertise du fondeur, à savoir la maîtrise des dimensions des modèles, du retrait du moule lors du séchage et du retrait du métal après la coulée. Les intervalles de tolérances varient de la classe 14 à la classe 12, répartis uniformément de chaque coté de la cote nominale, donc JS (js) 12 à JS(js) 14. La classe de qualité 12 sera obtenue par des mises au point plus coûteuses, il est donc toujours préférable de les réserver aux surfaces prioritaires d'un point de vue fonctionnel.

L'état de surface des pièces produites varie avec un écart moyen de rugosité, Ra, compris entre 6,3 et 3,2 μm.

Le procédé de moulage à la cire perdue constitue souvent une alternative intéressante à la technique de l'usinage ou de l'assemblage par soudure et est parfois un passage obligé pour des pièces comportant des cavités internes, des voiles minces, des évidements et allègements, des renforts, ... [15]

III.5 Matériaux :

- De très nombreux matériaux se prêtent à la fonderie à la cire perdue (liste non exhaustive) :
  - Aciers de construction, de traitements thermiques ;
  - Aciers inoxydables ;
  - Superalliages à base de Cobalt ou de Nickel ;
  - Alliages de titane ;
  - Alliages d'aluminium ;
  - Alliages de cuivre (bronze, laiton) ;
  - Alliages bases cobalt ;
  - Or et Argent dans la bijouterie. [15]

III.6 Avantages :

- **Permet de réduire les couts** : Il est possible de réduire les couts de production de certaines pièces jusqu'à 50% :
  - ✓ L'outillage de la fonderie cire perdue est plus économique que le moulage en sable ;
  - ✓ La technique de la cire perdue permet d'éviter les dépouilles.

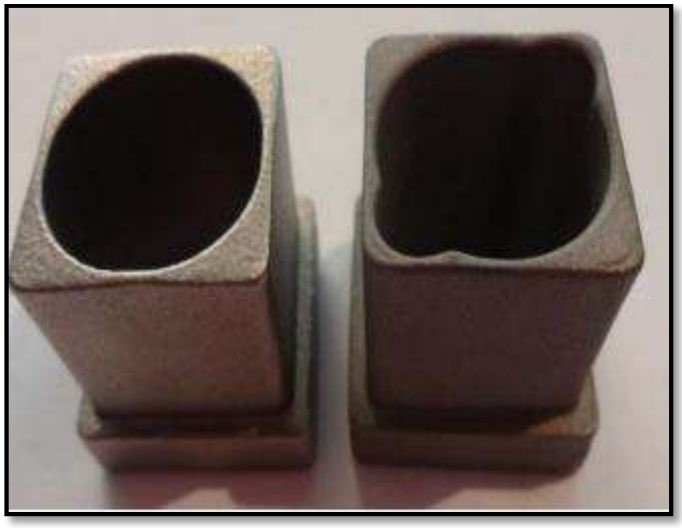


Figure III.14 : Comparaison entre pièce obtenue par moulage sable et cire perdue. [18]

- **Etat de surface :** Le Ra moyen est de 6,3, mais il est possible d'atteindre 3,2 selon le type de grenailles à utiliser.



Figure III.15 : Etat de surface d'un Couple d'arrêt e Pièce utilisée dans le médical. [18]

- **Diversité :** Taille et poids des pièces très variables.

Plus grosse pièce réalisée : 35 kilos et un volume de 3,5 dm3 ; Plus petite pièce réalisée: 4 grammes et un volume de 1,5 cm3. [18]

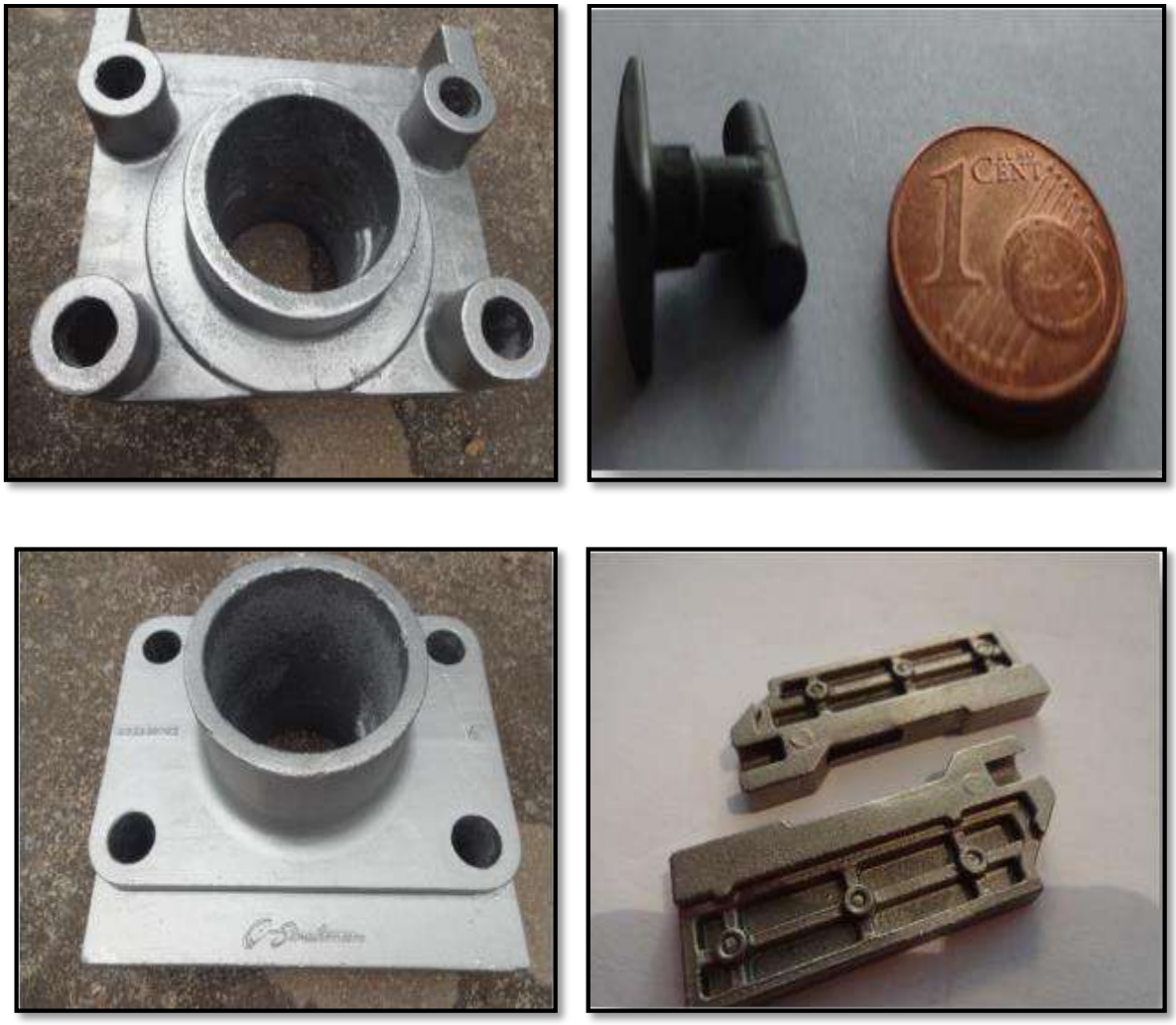


Figure III.16 : Différents types de pièces selon leurs poids obtenues par cire perdue. [18]

III.7 Cas d'utilisations les plus intéressants :

- **Remplacer les petites mécano-soudures :**

La fonderie CIRE PERDUE, permet de créer des pièces avec une géométrie complexe plus facilement.

- **Cela comporte plusieurs avantages :**
  - Réduction des couts (moins d'étapes de fabrications) ;
  - Amélioration de l'esthétique de la pièce (pas de soudure) ;
  - Renforcement de la solidité de la pièce (coulée en un seul bloc). [18]

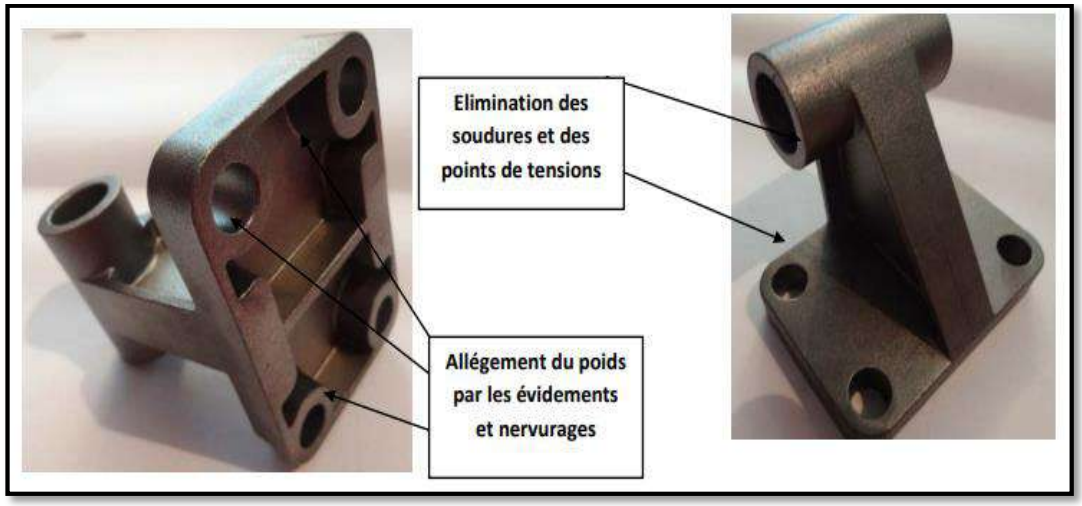


Figure III.17 : Cas d'exemple. [18]

1) **Réaliser des pièces avec caractéristiques mécaniques élevées :**

Certaines pièces, du fait de leur dureté sont difficiles et chères à usiner, la fonderie cire perdue permet de réaliser ces pièces à moindre couts. [18]



Figure III.18 : Hélice d'un concasseur, pièce d'usure, qui doit donc être très dure. [18]

2) **Réaliser des pièces avec une géométrie complexe :**

Différentes pièces avec des formes variées, que la fonderie CIRE PERDUE permet de réaliser plus facilement. [18]



Figure III.19 : Exemple de pièces complexes. [18]

3) Fabriquer sans plan :

Grâce au système de moule en silicone, la fonderie CIRE PERDUE permet de reconstituer des pièces sans aucun plan, seulement à partir de pièces existantes (Anciens plans manuels, pièces cassées après l'usure ou encore pièces de rechanges complexes). [18]

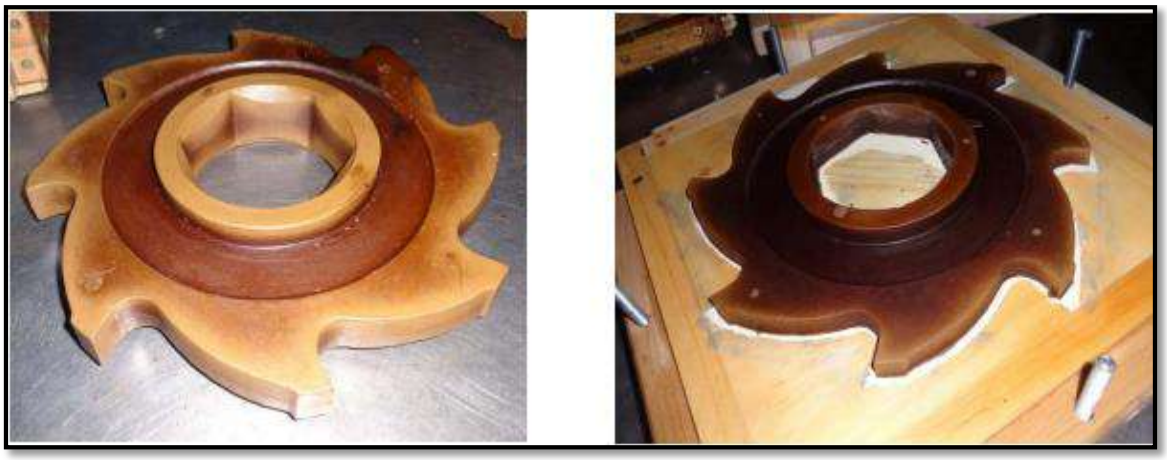


Figure III.20 : Pièce réalisée sans plan. [18]

4) Cas d'exemple :

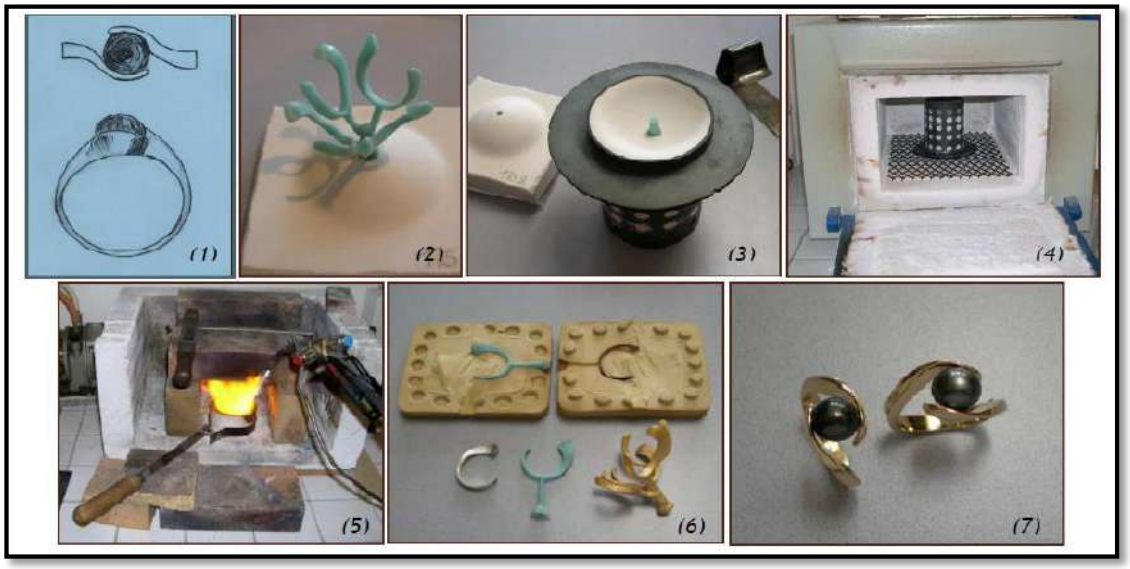


Figure III.21 : Réalisation de bague (or et perle noire) par la technique de moulage à la cire perdue : (1) Croquis, (2) grappe en cire, (3) cylindre rempli de plâtre réfractaire, (4) cuisson du plâtre et évacuation de la cire, (5) préparation de l'or pour la coulée, (6) obtention de la grappe en or réplique de la cire, (7) les bagues finies. [15].

Conclusion Générale :

La fonderie en cire perdue ou à modèle non permanent occupe une place importante dans l'industrie pour la fabrication de pièces à haute valeur ajoutée. En effet, dans certains secteurs (aéronautique, énergie, armement, médical, …), la nature des alliages demandée, la complexité de la géométrie des pièces et la sévérité des cahiers des charges (états de surface, précisions dimensions, santé interne, …) imposent cette technologie de fabrication. De plus, cette technique diminue le recours à l'usinage, et donc permet une réduction des coûts post-fonderie. Un procédé de fonderie à haute valeur ajoutée.

Le moulage à cire perdue est destiné à la réalisation de pièces unitaires comme un prototype, ou de petites séries, le moule étant détruit lors de l'extraction du moulage.

Bibliographie :

[1] : BOUGHAZI KHALED : Étude de la séparabilités par soudage des moules métalliques utilisés dans les machines de la coulée sous-pression. Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme : MASTER. 2018 / 2019

[2] : BELLILI Toufik : Etude et fabrication d'un moule métallique de fonderie d'aluminium. Mémoire de fin d'études en Génie Mécanique. 2015/2016.

[3] : Guy Morin, ing. Centre de Métallurgie du Québec. Moulage en moule permanent (ou en coquille). 17 mai 2019.

[4] : Yann QUINSAT. Le moulage en coquille : procédé de réalisation de pièces métalliques. Edité 13/09/2016.

[5] : Guy Morin, ing. David Levasseur, Ph.D. Centre de Métallurgie du Québec. Moulage sous pression (die casting). 12 juin 2019.

[6] : DJEMILI LOTFI : ETUDE DE FABRICATION D'UNE PIECE «JUMELLE »; ET MODELISATION SOUS SOLIDWORKS. MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER INTITULE. 2014/2015.

[7] : OMIRI ABDELLAH BOUAZOUNI LOUNIS : Recyclage du sable de fonderie dans les mortiers autoplaçants: Utilisation en tant que sable et ajout cimentaire ; Mémoire de fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme Master Spécialité : Génie de matériaux Université de Boumerdes . 2016 – 2017.

[8] : GARA Souhir, Procédés de mise en forme par moulage, 2017.

[9] : André Nicolet, Robert Nicolet, Georges Brodbeck. Le Modeleur – Mécanicien. Editions Eyrolles 61, Boulevard Saint- Germain 1967.

[10] : Bruce ANGLADE, Hélène HORSIN MOLINARO, Fonderie : éléments d'initiation, école normale supérieure - paris – saclay. Edité le 08/01/2018.

[11] : Bruce ANGLADE – Hélène HORSIN MOLINARO – Francis VENTURA, Fonderie en sable : du modèle à la pièce, école normale supérieure - paris – saclay. Edité le 15/01/2018.

[12] : Hédi Chtourou, Procédés d'obtention des pièces brutes, Technologie de Fabrication (S.T.I.) Tunisie. 2015.

[13] : M. Hacini. Méthodologie de conception des pièces et d'outillages de la fonderie. Université de Annaba. 2019.

[14] : By Julien Soro , Le procédé de fonderie cire perdue**.** Publié le 21 février 2022

[15] : Hélène HORSIN MOLINARO – Sylvain LAVERNHE – Pierre MELLA Christophe TOURNIER – Yann QUINSAT. Réalisation de pièces métalliques par prototypage en moulage à cire perdue. Ecole supérieure Paris. Edité le 03/11/2016.

[16] : M. Stuart Roussel , LA FONDERIE A LA CIRE PERDUE, HOMMES ET FONDERIE - Février 1989.

[17] : Bruce ANGLADE – Hélène HORSIN MOLINARO – Francis VENTURA, Moulage à cire perdue : du modèle à la pièce, ecole normale superieure-paris – saclay 12/2/2018.

[18] : Quillivic Robin de l'école Centrale de Lille et complété par Sarah El Maroudi de SLSB Lyon. Découverte de la fonderie CIRE PERDUE.