

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية

الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de Technologie



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MASTER**

En : **Génie Mécanique**

Spécialité : **Énergétique**

Intitulé :

**Conception optimale d'un système de refroidissement
en fonderie pour un moule non permanent**

Présenté par :

Mlle. SAID MEDJAHED Rahima

Soutenu publiquement le 07/07/2021 devant le Jury :

Mr Benramdane M.	Président	MCA	UABB Tlemcen
Mr Ghernaout MEA.	Encadreur	Pr	UABB Tlemcen
Mr Kara Ali D.	Encadreur	MCB	UABB Tlemcen
Mr Korti AN.	Examineur	Pr	UABB Tlemcen

Année Universitaire 2020 / 2021

Remerciements

Je tiens à remercier dieu le tout puissant qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à remercier vivement mes promoteurs Mr. Ghernaout Mohammed El Amine et Mr. Kara Ali Djamel Abdel Illah pour leur conseils précieux et pour leur disponibilité, leur patience et surtout toutes les connaissances qui m'ont apportées durant l'étude de ce projet.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury.

Mr. Benramdane Mohammed et Mr. Korti Abdel Illah Nabil pour l'intérêt qu'ils ont portés à mon travail en acceptant de l'examiner.

Enfin je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail avant tout

À mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de m'encourager et me soutenir et j'espère que j'aurais un jour l'occasion de les remercier davantage.

À mes chers frères et sœurs, et à toute ma famille, à l'équipe de l'entreprise de fonderie (ALFON, Oran) qui m'a accueilli et m'a aidé.

A tous mes amis pour leurs encouragements

A tous mes enseignants, du primaire jusqu'à l'université, qui m'ont permis d'arriver à ce jour.

المخلص

يعرض العمل عمليات التصنيع الميكانيكية مع تفسيرات لتقنيات الحصول على الأجزاء.

الصب بالرمال هي تقنية تتضمن صب المعدن المنصهر في بصمة قالب رملي، مصنوع من نمط على شكل الجزء المراد الحصول عليه.

تدرس الأطروحة تطور تصميم تقني لجزء عن طريق صب الرمل والتبريد، ثم محاكاة يتم إجراؤها بواسطة برنامج (SolidWorks) برنامج محاكاة لعملية التشكيل.

الكلمات المفتاحية: صب الرمل، التبريد، المحاكاة.

Résumé

Le travail présente les procédés de fabrication mécanique avec les explications des techniques d'obtention des pièces.

Le moulage en sable est une technique qui consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte d'un moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir.

Le mémoire étudie et élabore une conception technique pour une pièce par le moulage en sable et son refroidissement, puis une simulation réalisée par le logiciel SolidWorks (logiciel de simulation de processus de moulage)

Mots clés : moulage en sable, refroidissement, simulation.

Abstrat

The work presents the mechanical manufacturing processes with explanations of the techniques for obtaining parts.

Sand casting is a technique that involves pouring molten metal into the imprint of a sand mold, made from a pattern in the shape of the part to be obtained.

The thesis studies and develops a technical design for a part by sand casting and cooling, then a simulation performed by the software SolidWorks (simulation software of the molding process)

Keywords: sand casting, cooling, simulation.

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux	III
Nomenclature.....	IV
Introduction générale.....	2
<i>Chapitre I : Généralités sur la fonderie</i>	3
Introduction	4
1.1 Fonderie.....	4
1.1.1 Définition	4
1.1.2 Sidérurgie.....	4
1.2 Fonte	5
1.2.1 Définition	5
1.2.2 Production de la fonte	6
1.2.3 Types de fonte	7
1.3 Acier.....	7
1.3.1 Définition	7
1.3.2 Production de l'acier	8
1.3.3 Les type d'aciers.....	10
1.3.4 Les type de fonderies	10
1.4 Généralités sur le moulage.....	10
1.4.1 Définition	10
1.4.2 Moule	11
1.4.3 Types de moule.....	11
Conclusion.....	11
<i>Chapitre II : Moulage</i>	12
Introduction	13
2.1Moulage non permanent	13
2.1.1 Définition	13
2.1.2 Moules non permanents avec un modèle non permanent.....	13
2.1.2.1 Moulage à la cire perdue.....	13
2.1.2.2 Moulage en polystyrène	14
2.1.3 Moule non permanent avec un modèle permanent	15
2.1.3.1 Moulage en motte	15
2.1.3.2 Moulage en carapace	16

2.1.3.3 Moulage V-Process	17
2.1.3.4 Moulage en sable.....	18
Conclusion.....	25
<i>Chapitre III : Conception des pièces moulées</i>	26
Introduction	27
3.1 Etapes d'élaboration de moule	27
3.1.1 Lecture du cahier de charge	27
3.1.2 Lecture du dessin de définition :.....	27
3.1.3 Choix du procédé de moulage.....	28
3.1.4 Choix du plan de joint	29
3.1.5 Retrait.....	29
3.1.6 Dépouille	30
3.1.7 Surépaisseur d'usinage.....	30
3.1.8 Boite à noyau et noyau	31
3.1.9 Dimensionnement du châssis	33
3.1.10 Choix du type et dimensionnement de la masselotte	33
3.1.11 Système de coulée	35
Conclusion.....	40
<i>Chapitre IV : Etude de cas</i>	41
Introduction	42
4.1 Plan de joint	44
4.2 Valeur du retrait du matériau	45
4.3 Surépaisseurs d'usinage spécifié	46
4.4 Classe de tolérance selon la norme 8062	46
4.5 Cotes moyennes du brut sont	46
4.6 Châssis	46
4.7 Dimensionnement du noyau	47
4.8 Calcul du module de refroidissement MR	48
4.9 Masselotte	53
4.10 Système de coulée	53
4.10.1 Choix du type de système de coulée	53
4.10.2 Temps de coulée	53
4.10.3 Bassin de coulée.....	54
4.10.4 Descente de coulée	54
4.10.5 Chenal à coulée.....	55

4.10.6 Attaques de coulée	55
4.10.7 Events.....	56
Conclusion.....	56
<i>Chapitre V : Etude de refroidissement</i>	57
Introduction	58
5.1 Transfert thermique.....	58
5.1.1 Transfert de chaleur par conduction	58
5.1.2 Transfert thermique par convection.....	58
5.1.3 Rayonnement	59
5.2 Etude thermique	59
5.3 Résolution de l'équation de la chaleur	60
5.4 Bilan de chaleur	60
5.5 Loi de Chvorinov	61
Conclusion	63
<i>Chapitre VI : Simulation du moulage</i>	64
Introduction	65
6.1 Module moulage	65
6.2 Simulations et résultats	69
6.2.1 Distribution de la température sur la face de coulée du moule	70
6.2.2 Distribution de la température sur la face latérale du moule.....	71
6.2.3 Distribution de la température sur la face de coulée et latérale du moule	72
6.3 Animation de solidification.....	73
Conclusion.....	73
<i>Conclusion et perspectives</i>	75
<i>Références bibliographiques</i>	77

Liste des figures

Figure 1.1 : Principales opérations industrielles de la sidérurgie.....	4
Figure 1.2 : Schéma d'un haut fourneau moderne	5
Figure 1.3 : Production de la fonte de première fusion	5
Figure 1.4 : Haut fourneau et ses annexes	6
Figure 1.5 : Diagramme de Fer Carbone	7
Figure 1.6 : Schéma d'un convertisseur Bessemer	8
Figure 1.7 : Schéma d'élaboration de l'acier suivant la filière fonte.....	8
Figure 1.8 : Principales réactions de réduction.	9
Figure 2.1 : Etapes du moulage à la cire perdue	14
Figure 2.2 : Etapes du moulage en polystyrène.....	15
Figure 2.3 : Principe du moulage en mottes	16
Figure 2.4 : Etapes pour le Moulage en carapace	17
Figure 2.5 : Moulage V-Process	18
Figure 2.6 : Noyau et boîte à noyau	20
Figure 2.7 : Obtention du moule	22
Figure 2.8 : Coulée du métal	22
Figure 2.9 : Coulée du métal et échappement des gaz	23
Figure 2.10 : Refroidissement de la pièce.....	23
Figure 2.11 : Défauts possibles	24
Figure 2.12 : Position de la masselotte.....	24
Figure 3.1 : Noyau	32
Figure 3.2 : Jeu pour le montage du noyau	32
Figure 3.3 : Col de la masselotte	34
Figure 3.4 : Chenal-attaque	35
Figure 3.5 : Descente de coulée-chenal	35
Figure 3.6 : Temps de remplissage en fonction de masse des pièces	36
Figure 3.7 : Etranglement dans la chenal-attaque et la descente-chenal	36
Figure 3.8 : Bassin, descente et pied de coulée	37
Figure 3.9 : Trou de coulée	38
Figure 3.10 : Chenal et attaques	40
Figure 3.11 : Event du moulage	40
Figure 4.1 : Dessin 3D de la pièce	42

Figure 4.2 : Dessin simplifié de la pièce.....	42
Figure 4.3 : Dessin de définition de la pièce.....	43
Figure 4.4 : 1^{ère} solution de plan de joint.....	44
Figure 4.5 : 2^{ième} solution de plan de joint.....	44
Figure 4.6 : 3^{ième} solution de plan de joint.....	45
Figure 4.7 : Dimensionnement du noyau	47
Figure 4.8 : Décomposition de la pièce	48
Figure 4.9 : Chenal et les 4 attaques	55
Figure 4.10 : Moule obtenu.....	56
Figure 5.1 : Diagramme de température dans le métal et le moule	59
Figure 5.2 : Diagramme de solidification de l'alliage Al-Cu	62
Figure 5.3 : Diagramme explique T_c, T_p et ΔT_p.....	62
Figure 6.1 : Pièce pour moulage.....	65
Figure 6.2 : Dessin d'un rectangle sur le plan choisi.....	66
Figure 6.3 : Application de la fonction « extruder »	66
Figure 6.4 : Application de la fonction « empreinte ».....	67
Figure 6.5 : Partie inférieure du moule	67
Figure 6.6 : Création de la surface de joint.....	68
Figure 6.7 : Caisse supérieur	68
Figure 6.8 : Création de moule.....	69
Figure 6.9 : Distribution de la température à l'intérieur du moule	69
Figure 6.10 : Distribution de la température sur la face de coulée du moule.....	70
Figure 6.11 : Courbe de température sur la face de coulée du moule.....	70
Figure 6.12 : Distribution de la température sur la face latérale du moule.....	71
Figure 6.13 : Courbe de température sur la face latérale du moule.....	71
Figure 6.14 : Distribution de la température sur la face de coulée et latérale du moule .	72
Figure 6.15 : Courbe de température sur le moule	72
Figure 6.16 : Etapes de remplissage et solidification de la pièce.....	73

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Température de fusion et la masse volumique des métaux.....	27
Tableau 3.2 : Poids de la pièce (Kg).....	28
Tableau 3.3 : Epaisseur de la pièce (mm).....	28
Tableau 3.4 : Rugosité (μm) et l'intervalle de tolérance (mm).....	29
Tableau 3.5 : Retrait	29
Tableau 3.6 : Dépouille	30
Tableau 3.7 : Classe de la surépaisseur d'usinage.....	30
Tableau 3.8 : Surépaisseurs.....	31
Tableau 3.9 : Choix de boîte à noyau	31
Tableau 3.10 : Dépouille remoulage et coiffage.....	32
Tableau 3.11 : Dimensionnement du châssis	33
Tableau 3.12 : Retrait de la formule du volume de la masselotte	34
Tableau 3.13 : Pertes de charges.....	37
Tableau 3.14 : Section S'_a et S_d.....	39
Tableau 4.1 : Surfaces de la partie 1.....	49
Tableau 4.2 : Surfaces de la partie 2.....	51

Nomenclature

- **Symboles :**

Symbole	Signification	Unité
MR	Module de refroidissement	m
V	Volume	m ³
S	Surface	m ²
g	Pesanteur	m/s ²
h	Hauteur	m
t	Temps	s
y	Longueur	m
r	Rayon	m
η	Rendement de la masselotte	/
m	Masse	Kg
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
a	Longueur	m
b	Longueur	m
y	Longueur	m
A _c	Surface de coulée	m ²
T	Température	°C
a _M	Diffusivité thermique	m ² /s
K _M	Coefficient de conductivité thermique	W/m. °C
c _p	Chaleur massique	J/Kg. °C
x	Distance	m
Q	Chaleur	J
erf	Fonction d'erreur	/
L	Chaleur latente	J/Kg
λ	Conductivité thermique	W/m. K

- **Abréviations :**

<i>Acronyme</i>	<i>Signification</i>
SW	SolidWorks
3D	Trois dimensions
Al	Aluminium
AU8S	Alliage d'aluminium à 8% de cuivre
Cu	Cuivre

Introduction

générale

Introduction générale

La fonderie est l'une des procédés de formage des métaux qui consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (forme intérieur et extérieure) en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition.

Le moulage en sable peut être utilisé pour fabriquer des pièces dans presque tous les matériaux métalliques, y compris ceux à point de fusion élevé, facile à mettre à l'échelle, géométries complexes avec sections à parois minces, pièces moulées de toutes tailles et poids et faible coût de production.

Ce travail a pour but d'étudier la conception d'une pièce en utilisant le moulage en sable et son refroidissement.

Ce mémoire comporte six chapitres :

- Le premier chapitre présente la fonderie et la production de la fonte et de l'acier.
- Le deuxième est dédié aux différents types de moulage.
- Le troisième décrit les différentes étapes de la conception d'une pièce par le moulage en sable.
- Le quatrième présente une étude de cas d'une pièce en alliage d'aluminium.
- Le cinquième chapitre traite le refroidissement de la pièce et son temps.
- Le dernier chapitre présente une simulation de moulage de la pièce.
- Une conclusion générale et perspective parachève ce mémoire

Chapitre I

Généralités sur la fonderie

Introduction

Les métaux sont des matériaux extraits du minerai. Avant d'être transformés en produits, ils sont préparés selon diverses techniques (fonderie, laminage...). Ils obtiennent ainsi leurs formes brutes (brames, billettes, lingots...) et sont prêts pour la transformation finale. Les procédés de formage que nous allons voir permettent de façonner les métaux et alliages métalliques pour en faire des produits semi-finis et finis.

1.1 Fonderie

1.1.1 Définition

La fonderie est l'un des procédés de mise en forme des métaux, notamment la coulée de métal ou d'alliage liquide dans un moule pour reproduire une pièce donnée après refroidissement, tout en limitant au maximum les travaux de finition ultérieurs. La technologie utilisée dépend de l'alliage fondu, de la taille, des caractéristiques et de la quantité des pièces à produire. Il s'agit le plus souvent d'une industrie de sous-traitance qui s'appuie fortement sur les services achats : automobile, sidérurgie, matériel de manutention, matériel industriel, matériel électrique, aviation, armement, etc. [1]

1.1.2 Sidérurgie

L'industrie sidérurgique est un groupe de techniques et d'industries qui assurent la production de fer et de ses alliages (appelés ferro-alliages). C'est un sous-domaine important de la métallurgie, qui étudie généralement le traitement des métaux. [2]

Ces alliages se réfèrent spécifiquement à la fonte et à l'acier, tous deux constitués de fer et de carbone. Par conséquent, la fonte à plus haute teneur en carbone est plus fragile que l'acier.

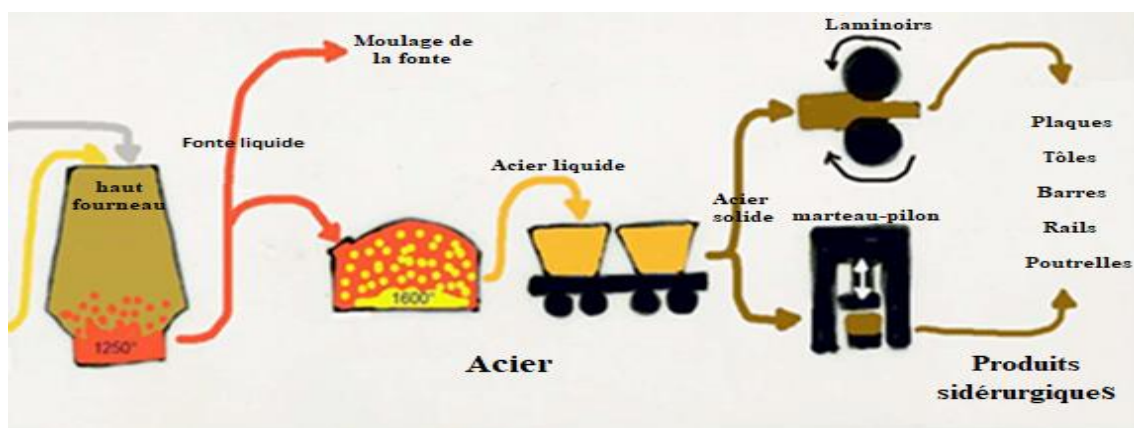


Figure 1.1 : Principales opérations industrielles de la sidérurgie [2]

1.2 Fonte

1.2.1 Définition

La fonte est un alliage de fer et de carbone (elle comprend entre 2,1 et 6,67 % du carbone), obtenu par traitement du minerai de fer avec du coke métallurgique. Il s'agit d'une opération de fusion réductrice. La fabrication de la fonte se fait dans un haut fourneau (figure 1.2), qui fait partie de l'industrie sidérurgique. La fonte a une très grande fluidité (grande capacité à remplir les moules). Son point de fusion est compris entre 1135 °C et 1350 °C, selon la quantité de carbone et de silicium qu'il contient. [3]

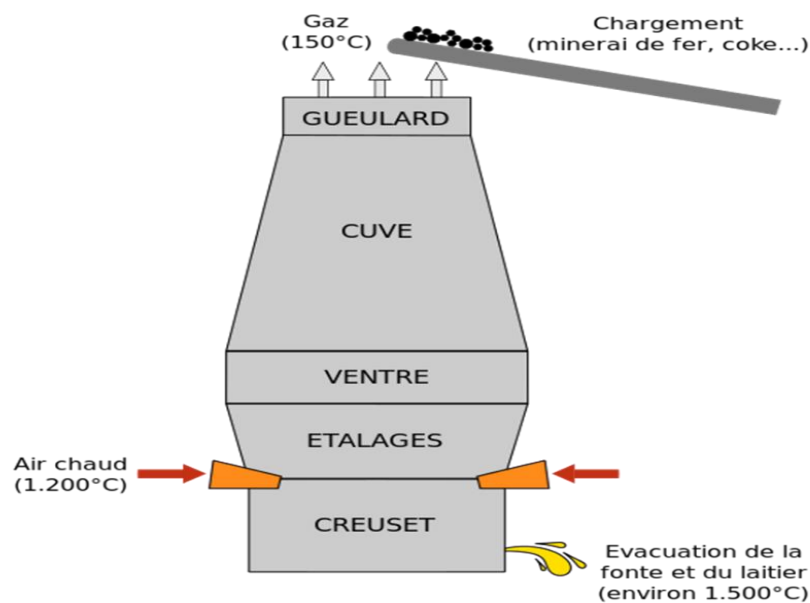


Figure 1.2 : Schéma d'un haut fourneau moderne [2]

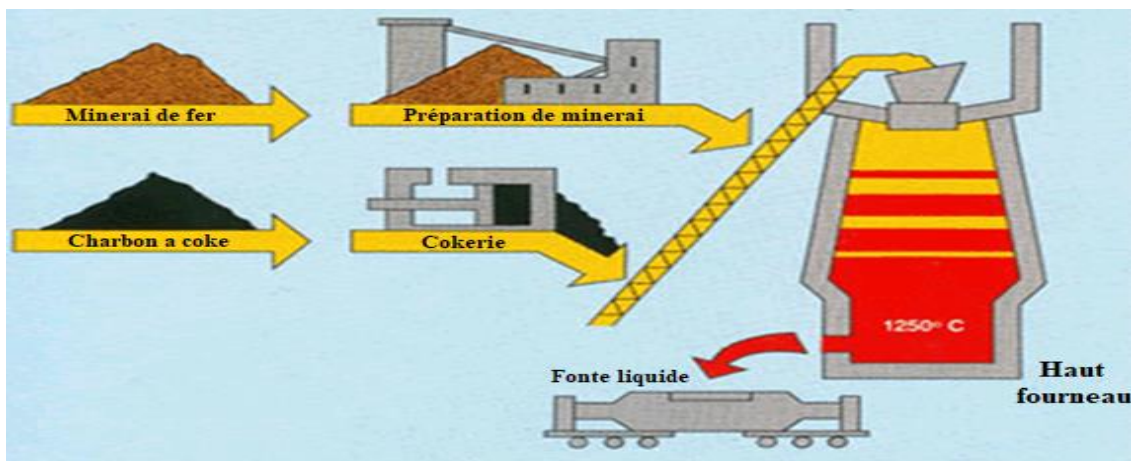


Figure 1.3 : Production de la fonte de première fusion [4]

1.2.2 Production de la fonte

La majeure partie du fer provient du haut fourneau. Dans ces dispositifs, un mélange de minerai de fer et de coke (charbon purifié de son gaz après distillation) est introduit dans la cokerie. Le minerai fond lorsque le coke brûle. Cette combustion est favorisée par l'injection d'air très chaud (air réchauffé par les gaz récupérés de la combustion du coke dans le haut fourneau et le plus souvent réchauffé par les gaz dégagés lors de la production de coke par distillation (figure 1.4). Cet air est délivré sous pression. Ensuite une réaction chimique a lieu : des atomes de fer se combinent avec des atomes de carbone, puis la fonte de première fusion est obtenue (figure 1.8).

Après remplissage du haut fourneau, la transition dure environ 6 heures. Une fois la fusion obtenue, le haut fourneau est vidé par le bas : c'est la coulée. Une partie de cette coulée est dirigée vers la fonderie pour la fabrication des articles en fonte (roues...). [2]

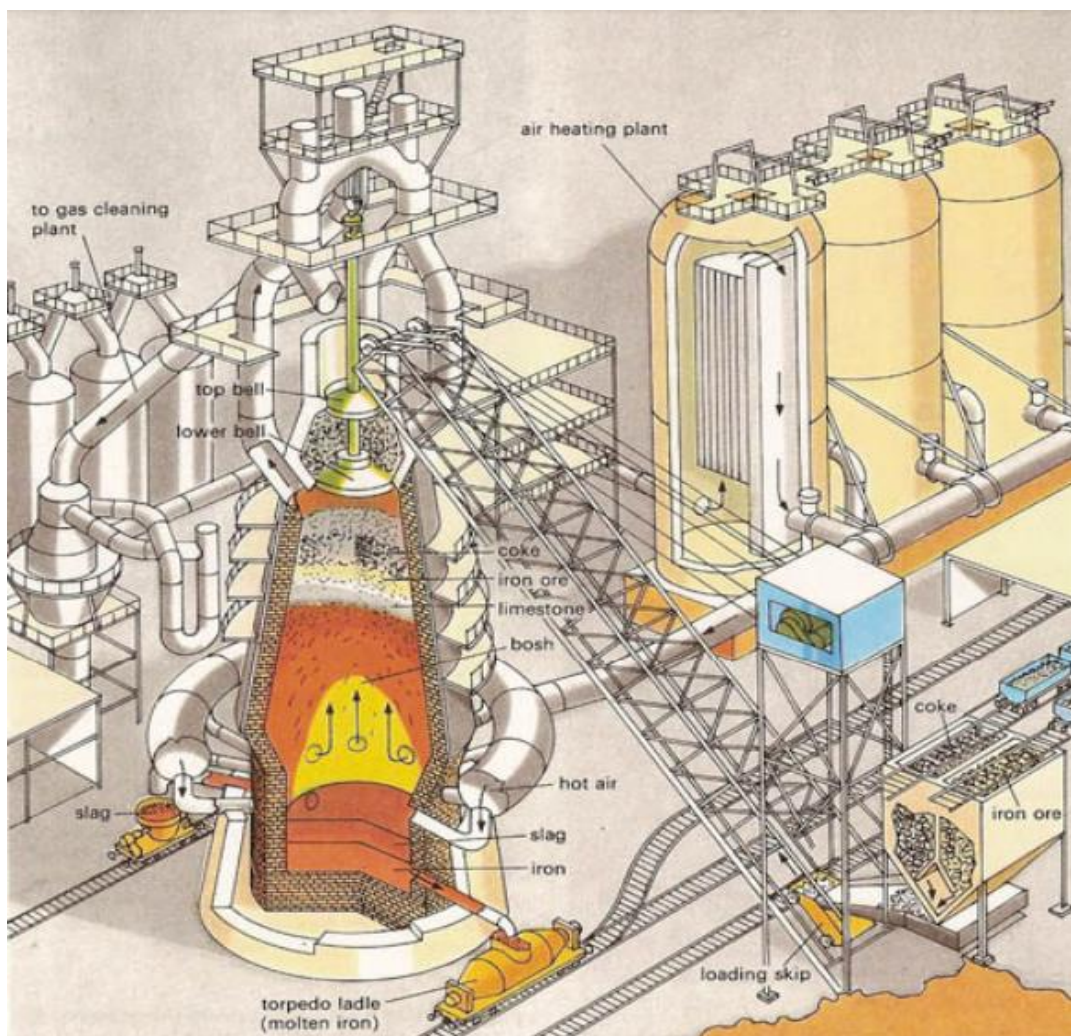


Figure 1.4 : Haut fourneau et ses annexes [5]

1.2.3 Types de fonte

On distingue les différentes fontes par leur pourcentage de carbone (figure 1.5). Dans le cas des alliages fer pur et carbone (cas théorique car la fonte contient toujours une grande quantité du silicium et du manganèse), on relève les types suivants :

- Fonte hypo-eutectique : de 2,11 à 4,3 % de carbone ;
- Fonte eutectique : 4,3 % de carbone ; cette fonte a la température de fusion la plus basse à 1148 °C ;
- Fonte hyper-eutectique : de 4,3 à 6,67 % de carbone. [6]

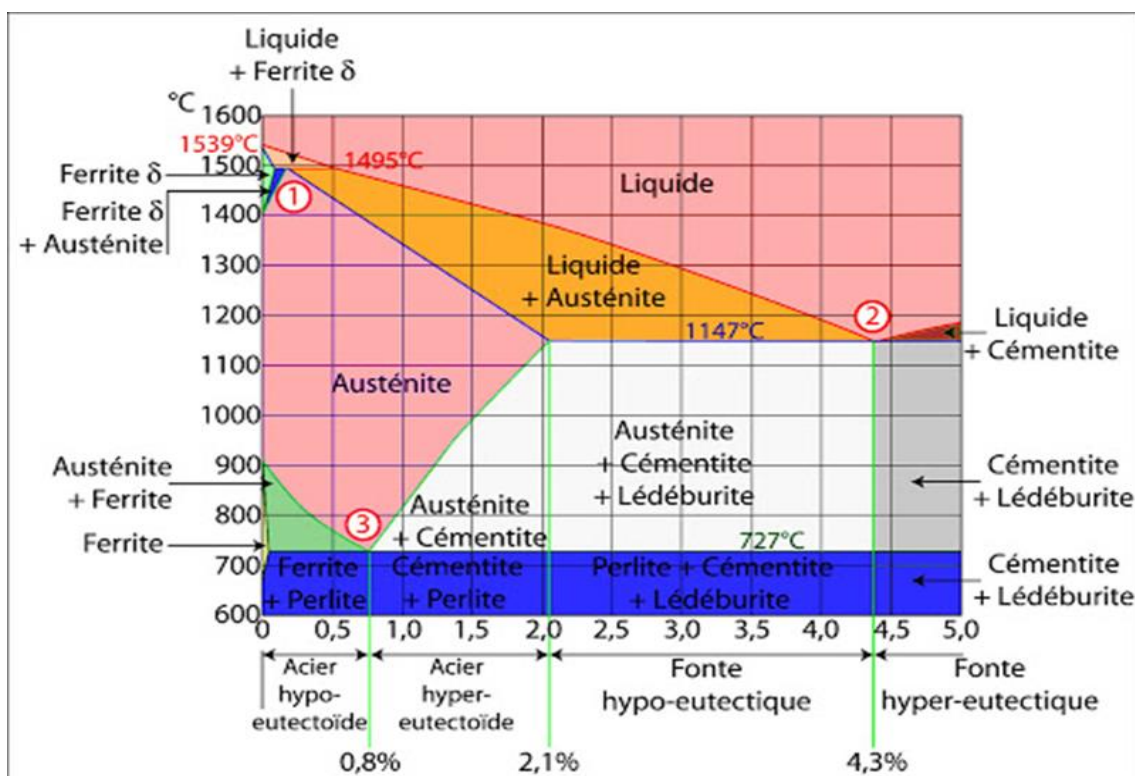


Figure 1.5 : Diagramme de Fer Carbone [7]

1.3 Acier

1.3.1 Définition

L'acier est un alliage métallique principalement composé de fer et de carbone (la proportion de carbone est comprise entre 0,02 % et 2 %). C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère les propriétés de l'acier allié. [8]

1.3.2 Production de l'acier

Il existe deux filières de production d'acier :

- La première est la fonte brute de première fusion obtenue du haut fourneau et envoyée aux convertisseurs (figure 1.6) (four d'affinage du métal en fusion) pour l'opération de fusion par oxydation, qui va retirer une partie du carbone (décarburation).

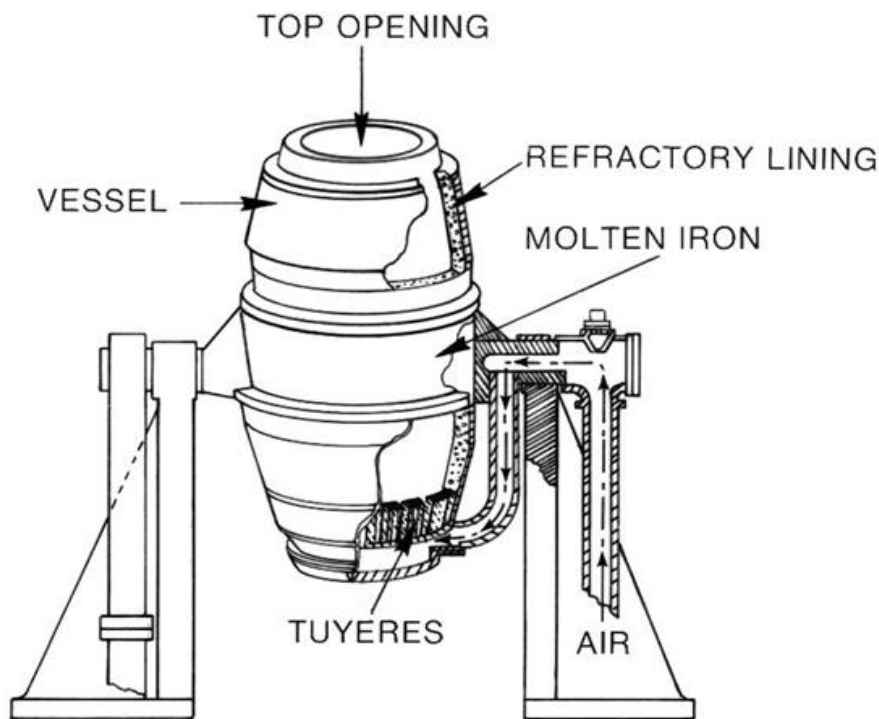


Figure 1.6 : Schéma d'un convertisseur Bessemer [2]

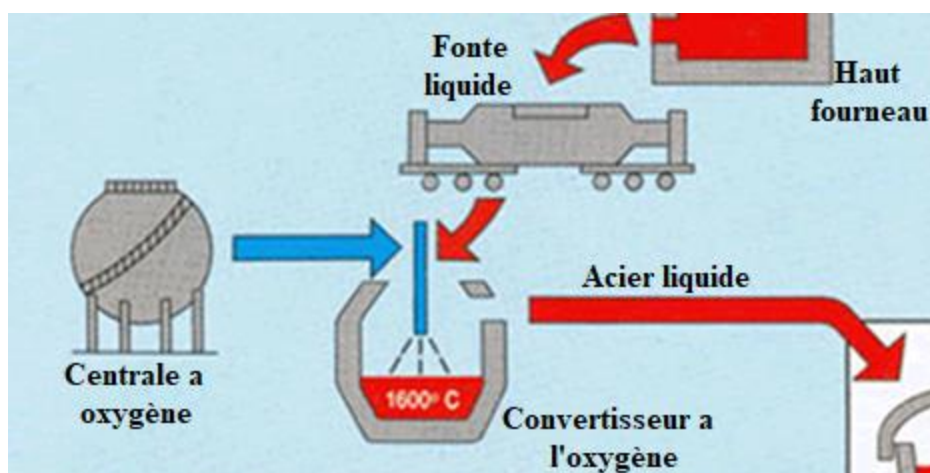
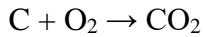


Figure 1.7 : Schéma d'élaboration de l'acier suivant la filière fonte [4]

On brûle la fonte liquide en envoyant de l’oxygène à l’intérieur du convertisseur (figure 1.7), les atomes de carbone en trop disparaissent :



Et la proportion de fer augmente dans le produit (figure 1.8) :

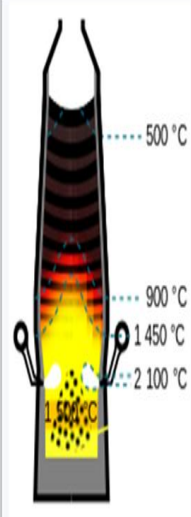


Hématite → magnétite → wustite → fer

L'hématite est une espèce minérale composée d'oxyde de fer (III) de formule Fe_2O_3 avec des traces de titane Ti, d'aluminium Al, de manganèse Mn et d'eau H_2O .

La magnétite est une espèce minérale composée d'oxyde de fer (II, III), de formule Fe_3O_4 avec des traces de magnésium Mg, de zinc Zn, de manganèse Mn, de nickel Ni, de chrome Cr, de titane Ti, de vanadium V et d'aluminium Al. La magnétite est un matériau ferrimagnétique.

La wustite est l'espèce minérale de l'oxyde de fer (II) FeO , qu'on retrouve en trace de surface sur le fer natif ou les météorites. [9]



Températures ^{note 26, M 11}	Réduction indirecte	Réduction directe	Réduction par l'hydrogène ⁸⁵
100 °C < T < 260 °C	Dessiccation		
500 °C < T < 600 °C	$3 Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2 Fe_3O_4 + CO_2$	$3 Fe_2O_3 + C \rightarrow 2 Fe_3O_4 + CO$	$3 Fe_2O_3 + H_2 \rightarrow 2 Fe_3O_4 + H_2O$
600 °C < T < 900 °C	$Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3 FeO + CO_2$	$Fe_3O_4 + C \rightarrow 3 FeO + CO$	$Fe_3O_4 + H_2 \rightarrow 3 FeO + H_2O$
900 °C < T < 1 100 °C	$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$		$FeO + H_2 \rightarrow Fe + H_2O$
1 100 °C < T < 1 150 °C		$FeO + C \rightarrow Fe + CO$	
1 200 °C < T < 1 600 °C	Carburation et fusion		

Figure 1.8 : Principales réactions de réduction. [9]

- La deuxième filière pour la fabrication de l'acier est le recyclage des déchets. Ceux-ci sont fondus dans un four spécial (four à électrodes). [2].

1.3.3 Type d'aciers

On distingue les différents aciers par leur pourcentage de carbone (figure 1.5) :

- les aciers hypoeutectoïdes (de 0,0101 à 0,77 % de carbone).
- l'acier eutectoïde (0,77 % de carbone) appelé perlite.
- les aciers hypereutectoïdes (de 0,77 à 2,11 % de carbone) qui sont les plus durs et ne sont pas réputés soudables. [8]

1.3.4 Type de fonderies

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

- Selon la nature des métaux et alliages :
 - Fonderie de fonte et de l'acier.
 - Fonderie d'aluminium et ses alliages.
 - Fonderie de cuivre, bronzes, laitons etc...
- Selon l'utilisation :
 - Fonderie d'art.
 - Fonderie d'ornement (bijoux).
 - Fonderie de mécanique industrielle.
- Selon le procédé de moulage :
 - Moulage en sable (manuel ou mécanique).
 - Moulage en carapaces.
 - Moulage à la cire perdue.
 - Moulage en coquilles (moule permanent). [10]

1.4 Généralités sur le moulage

1.4.1 Définition

Le moulage est l'action de prendre une empreinte qui sera utilisée comme moule, le matériau y sera placé et plusieurs copies du modèle pourront être imprimées ou produites. L'impression consiste donc à placer des matériaux (liquide, pâte, poudre, feuilles, plaques, etc.) dans un moule qui prendra cette forme.

L'opération de moulage comprend la réalisation d'un moule, généralement en matériau réfractaire, avec une empreinte négative de la pièce, qui est obtenue à partir d'un modèle copiant

la pièce à fabriquer. Selon le modèle, il détermine la forme, la taille et la précision des pièces à couler, les conditions de surface, le refroidissement, et joue un rôle important dans un grand nombre de paramètres qui affectent sa qualité.

1.4.2 Moule

Le moule est utilisé pour effectuer le processus de moulage, dont l'un est le moulage en sable, qui utilise un moule en sable spécial comme empreinte négative pour produire les pièces requises.

1.4.3 Types de moule

Dans ces procédés le moule peut-être permanent ou non permanent (destructible).

- Les moules non permanents ne sont utilisés qu'une seule fois. Pour sortir les pièces, il faut les détruire. L'empreinte est obtenue par moulage des matériaux constitutifs autour du modèle en bois ou en métal.
- Le moule permanent peut être utilisé plusieurs fois et il est fabriqué en plusieurs parties pour faciliter le retrait des pièces. Il est particulièrement adapté aux situations où le nombre de pièces à couler est important [10]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes pour l'obtention des alliages de fer en passant par le haut fourneau pour les fontes et le convertisseur pour les aciers ordinaires ainsi qu'une introduction du principe de moulage.

Chapitre II

Moulage

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différents types de moulage. Celui-ci est divisé en deux catégories. On distingue principalement le moulage dans des moules non permanents (moules perdus généralement en sable) et les moules permanents en métal (appelés coquilles).

2.1 Moulage non permanent

2.1.1 Définition

C'est un moule qui ne peut être utilisé qu'une seule fois pour fabriquer une pièce. Le moule est détruit pour chaque pièce brute de coulée produite, qui est composé d'un ou plusieurs éléments. L'empreinte prend en compte les systèmes d'attaque, les systèmes d'alimentation et le retrait de la matière.

Le matériau de coulée doit être :

- Facile à mettre en œuvre, maintient la forme de la pièce à obtenir.
- Résistant aux effets mécaniques et thermiques de l'alliage coulé et permet le remplissage.
- N'interfère pas avec l'extraction et la pièce ne se désintègre pas après solidification.
- Permet la récupération des articles non endommagés.

2.1.2 Moules non permanents avec un modèle non permanent

Un moule non permanent avec un modèle non permanent est que le moule sera utilisé pour produire une seule pièce. Le modèle ne permettra la fabrication que d'un seul moule.

2.1.2.1 Moulage à la cire perdue

La pièce à couler doit être tout d'abord reproduite en cire. Pour se faire la forme de la pièce est usinée à l'intérieur d'un moule en aluminium. On pulvérise une poudre spéciale sur les surfaces. Ce moule est placé sur un appareil d'injection de cire liquide. Lorsque la cire se solidifie, le moule est ouvert pour contrôler la pièce en cire. Une fois les pièces de cire obtenues, elles sont assemblées en grappe. Cette étape nécessite de la minutie et de la patience. On trompe ensuite la grappe dans une barbotte de cire liquide avant de la saupoudrer dans le sable réfractaire.

On répète cette étape jusqu'à l'obtention d'une carapace assez solide pour résister à la coulée. Une fois la carapace obtenue, elle est placée dans un four pour faire fondre la cire. Nous

obtenons une carapace vide qui a exactement la forme de la pièce à couler. Pour éliminer toute trace d'humidité, les carapaces sont retournées au four pour une cuisson finale. Les moules ainsi produits peuvent être utilisés directement pour couler les pièces (figure 2.1).

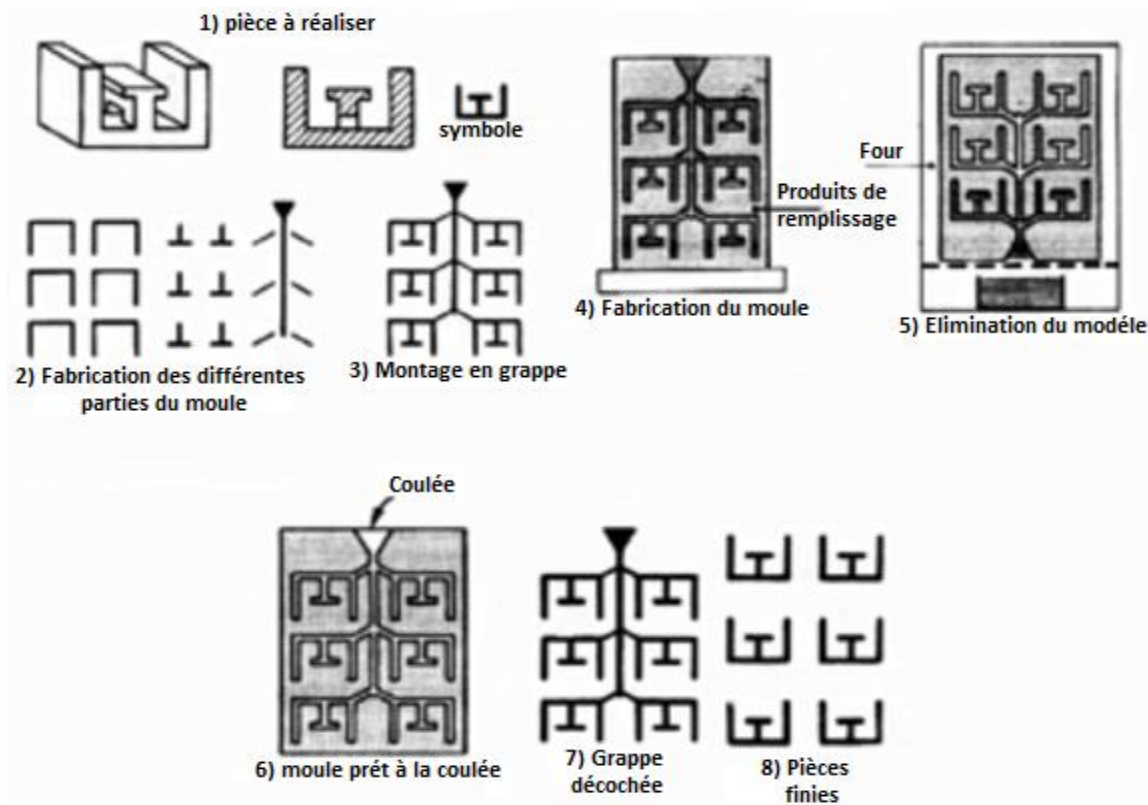


Figure 2.1 : Etapes du moulage à la cire perdue

2.1.2.2 Moulage en polystyrène

Ce processus de moulage consiste à réaliser autant de modèles qu'il y a de pièces à fabriquer. Le modèle est obtenu en injectant des granulés de polystyrène dans un moule métallique, qui sont soudés entre eux sous l'action de la vapeur. On colle les différentes parties du modèle et les accessoires de coulée pour former une grappe qui est recouverte d'un enduit réfractaire. On les place dans une cuve dans lequel on verse du sable sec sans liant. Celui-ci est compacté par vibrations. Pendant le processus de coulée, le métal progresse en évaporant le polystyrène (figure 2.2). [11]

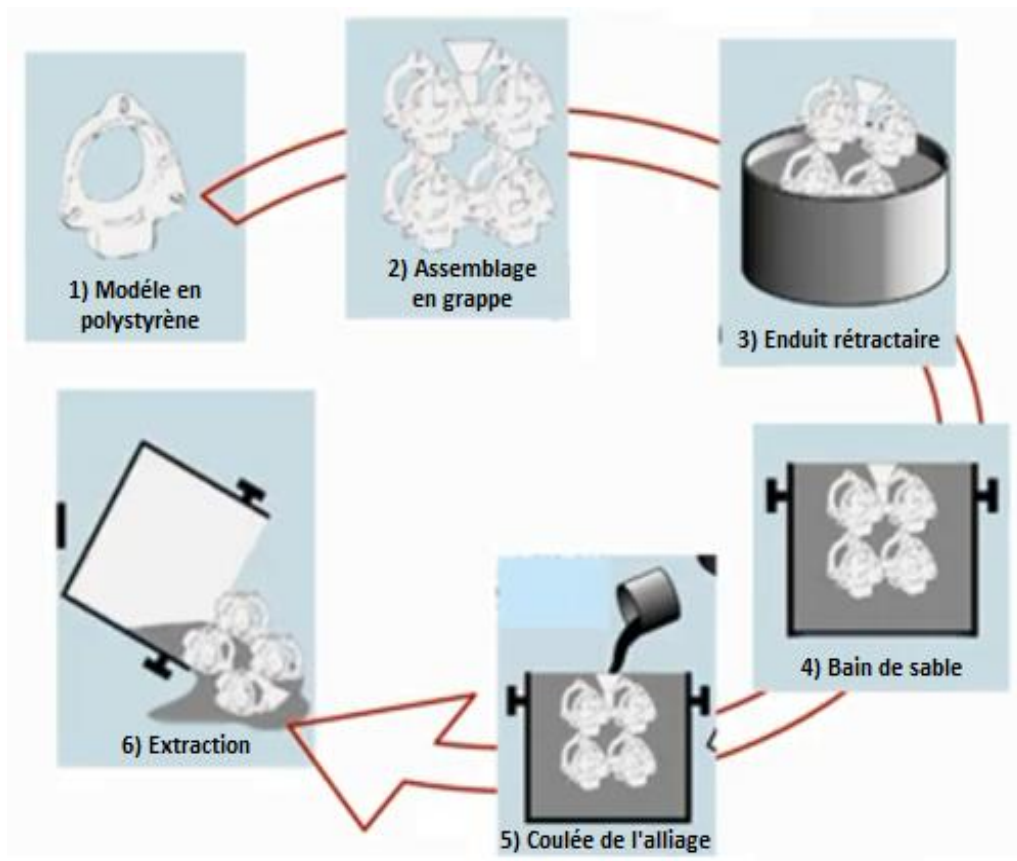


Figure 2.2 : Etapes du moulage en polystyrène

2.1.3 Moule non permanent avec un modèle permanent

Les moules non permanents (utilisation unique) avec un modèle permanent, utilise le même modèle plusieurs fois pour fabriquer différents moules.

2.1.3.1 Moulage en motte

Le principe de ce moulage est d'utiliser un moule qui ne comporte pas de châssis. Deux demis moules sont assemblés sur la même ligne. Les moules sont tous en contact et ils sont remplis sur la même chaîne de production (figure 2.3).

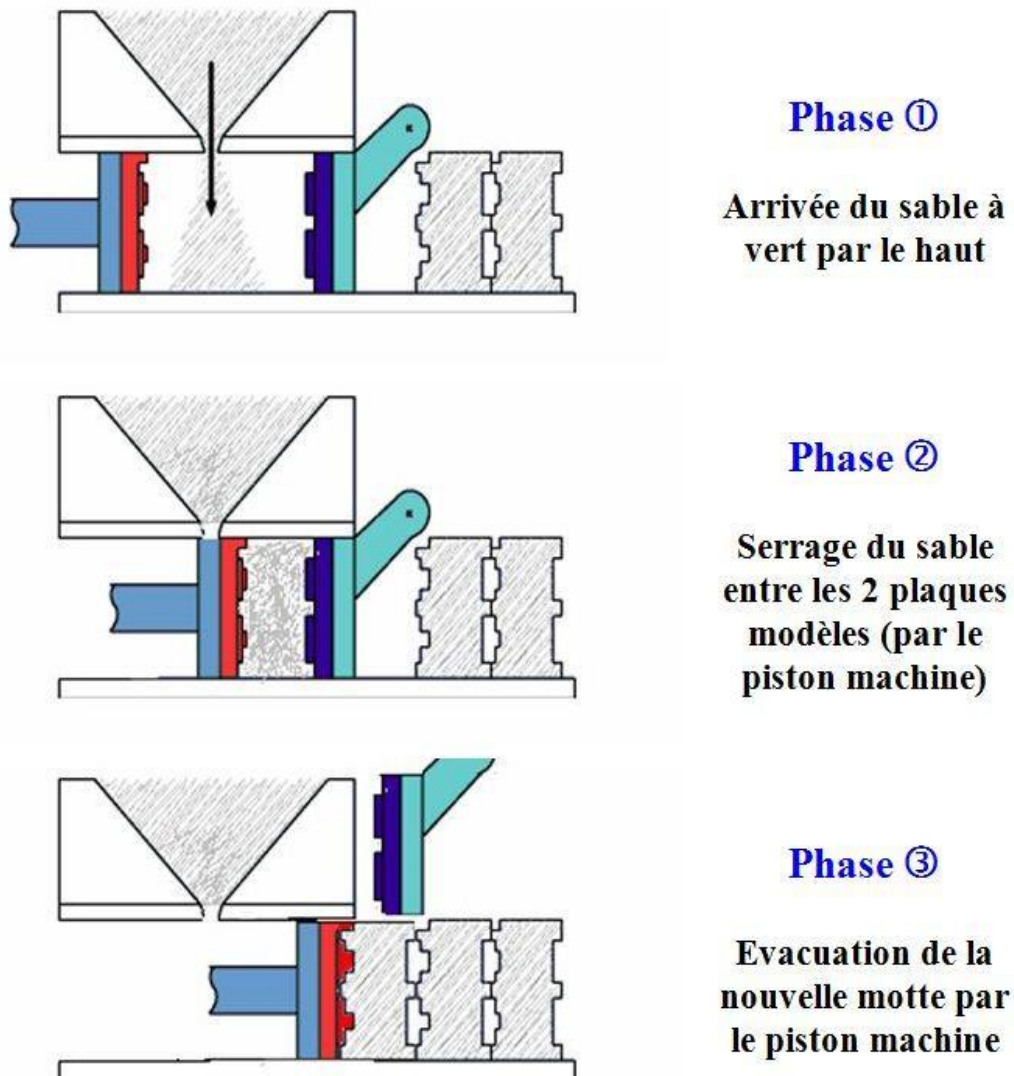


Figure 2.3 : Principe du moulage en mottes [12]

2.1.3.2 Moulage en carapace

C'est l'utilisation d'un mélange de sable avec des résines thermodurcissables pour le durcir. L'intérêt est d'utiliser très peu de sable pour obtenir des carapaces très peu épaisses. On mélange la résine avec le sable, on chauffe le modèle et on va avoir une solidification d'une fine couche de ce mélange. On obtient une petite épaisseur qui sera une partie de notre carapace, ensuite en assemblant cette partie avec une seconde partie on obtient un moule de faible épaisseur mais de bonne précision dimensionnelle (figure 2.4).

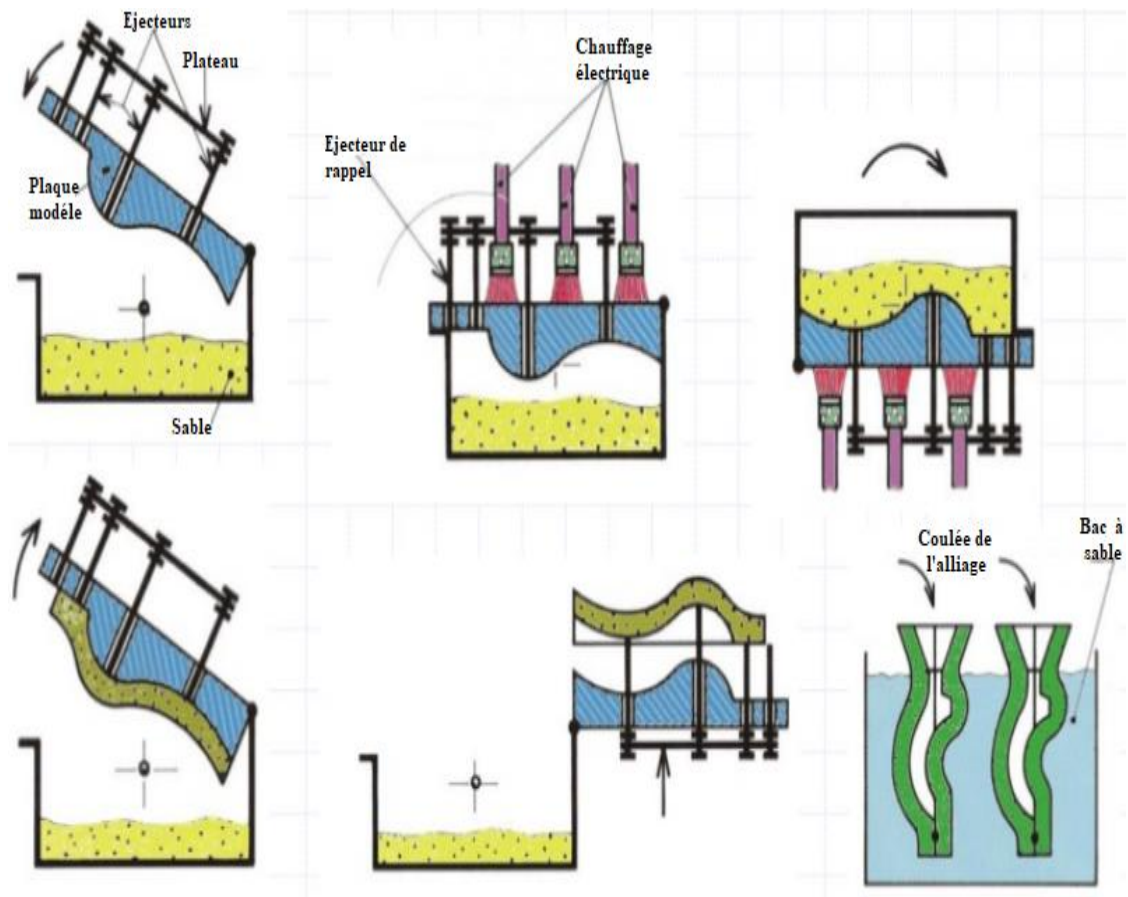


Figure 2.4 : Etapes pour le Moulage en carapace

2.1.3.3 Moulage V-Process

Consiste à maintenir un volume de sable sous dépression, pour donner la compacité suffisante au moule. Le sable siliceux sans liant est maintenu dans des caissons, au moyen de deux films plastiques thermo formables. Le modèle sur lequel on vient insérer un film épouse l’empreinte du modèle. On remplit du sable dans la partie supérieure pour le collage du film sur le modèle. On fait un rajout d'un film sur le dessus. La dépression fait que le film colle aux deux surfaces extérieures du modèle et donc on obtient notre empreinte cohérente lors de la coulée. Ensuite il suffit de supprimer la dépression pour que le moule se désagrège et qu'on puisse décrocher la pièce (figure 2.5).

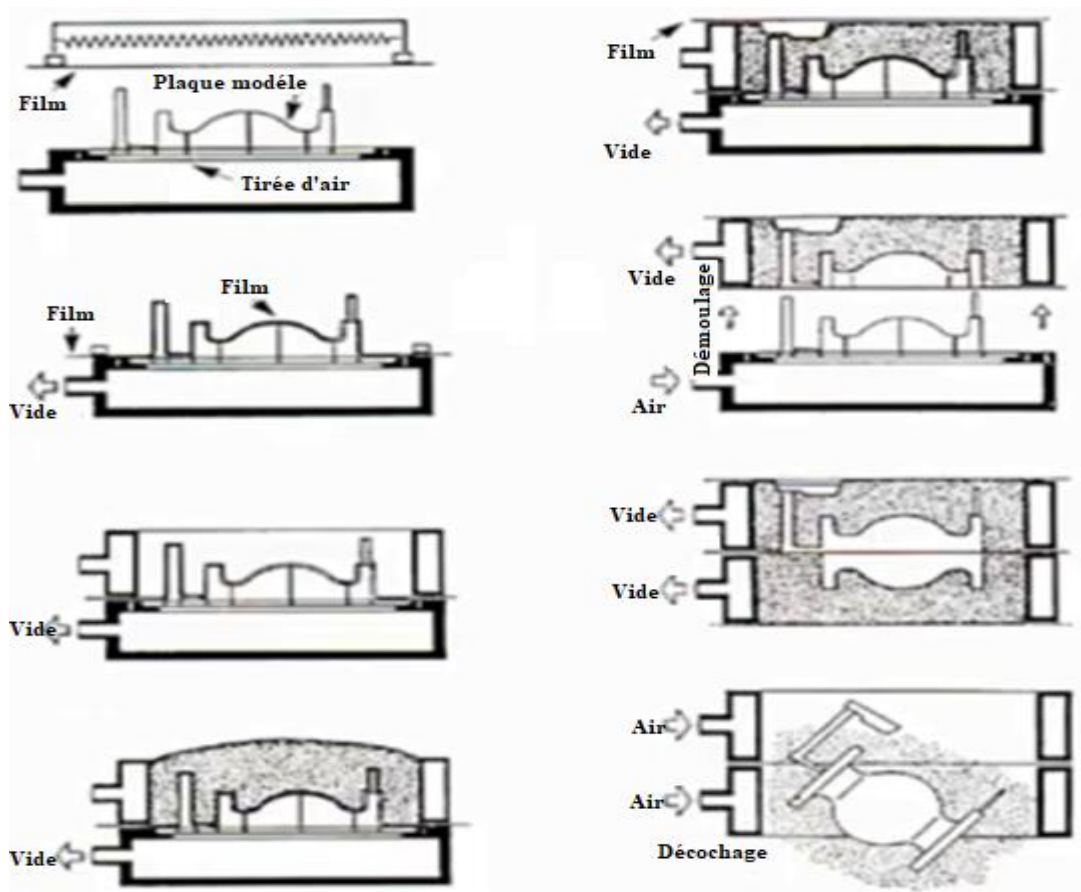


Figure 2.5 : Moulage V-Process

2.1.3.4 Moulage en sable

Le moulage au sable est un processus de coulée de métal, qui se caractérise par l'utilisation de sable comme matériau de moule. Le processus consiste à obtenir des pièces métalliques en versant du métal fondu dans une cavité créée à l'intérieur d'un moule puis laisser refroidir pour que la pièce obtenue durcisse. La destruction du moule est impérative. Les pièces moulées au sable sont produites dans des usines spéciales de fonderie. Elles sont relativement bon marché.

Le moule est généralement en deux parties. Après remplissage, refroidissement et destruction du moule on effectue sur la pièce obtenue un ébarbage, c'est à dire enlever le système d'alimentation, les évents pour obtenir la pièce brute et après l'usinage des surfaces fonctionnelles dans des ateliers de fabrication mécanique on aura la pièce finie.

Ces types de moulage convient à tous les métaux coulés, en particulier ceux à point de fusion élevé (fonte et acier), il convient aux pièces monobloc et à la petite et moyenne série.

2.1.3.4.1 Eléments pour la constitution le moule

• Qualité de moule

- L'objectif est d'éviter le gonflement du moule sous l'action des hautes pressions liquides exercées par le refroidissement et la solidification de la fonte à graphite.
- Les moules en sable vert et en coquille ne résisteront pas à la pression de solidification, s'ils sont bien préparés les sables liés chimiquement résisteront à la pression, cela nécessite un serrement mécanique du sable pendant la préparation du moule et une prise convenable.
- Les moules en sable ciment ou sec résisteront habituellement à la pression créée par la solidification de la fonte.

• Châssis

C'est un cadre rigide en fonte, en acier ou en aluminium, parfois en bois, et qui n'a pas de fond pour retenir et supporter le sable qui compose le moule. Un châssis complet comprend au moins deux parties. [10]

• Modèle

Le modèle est une représentation de la pièce ou d'un groupe de pièces à fabriquer et il permet la réalisation d'une empreinte dans un moule en sable. Il est en bois ou en métal selon les plans de fabrication, éventuellement en deux parties et peut être réutilisé. Il doit avoir :

- Une bonne résistance aux contraintes mécaniques, chimiques (humidité, adhérence du sable, gaz, etc.) et thermiques (chauffage du modèle dans divers procédés de moulage)
- Une bonne précision de la forme et de la taille.
- Bon prix de revient. [10]

• Sables de fonderie

Le sable utilisé dans la fonderie doit répondre à un certain nombre d'exigences :

- Reproduire fidèlement la pièce modèle,
- Grosseur du grain aussi fine que possible,
- Ne pas se désintégrer lors de l'extraction du modèle,
- Résister à la température de coulée élevée du métal,
- Résister à l'érosion de la coulée de métal liquide,
- Avoir perméabilité suffisante pour permettre la coulée,

- Le gaz produit dans le processus passe à travers,
- Facile à libérer.

Les sables de fonderie sont généralement composés de :

- 70 à 80 % de silice → support
- 5 à 15% d'argile → agglutinant
- 7 à 10% d'eau
- 3 à 5% d'impuretés (oxyde de fer, matières organique, etc.)

• Noyau et boîte à noyau

Afin d'obtenir le profil interne de la pièce, un noyau est utilisé et placé dans le moule. Lorsque la pièce présente des encoches difficiles à obtenir par moulage naturel ou même impossibles à obtenir. Le noyau est fait de sable auto-séchant, placé dans un moule appelé boîte à noyau métallique (figure 2.6), et se compose de deux parties assemblées par des goupilles de positionnement. [10]

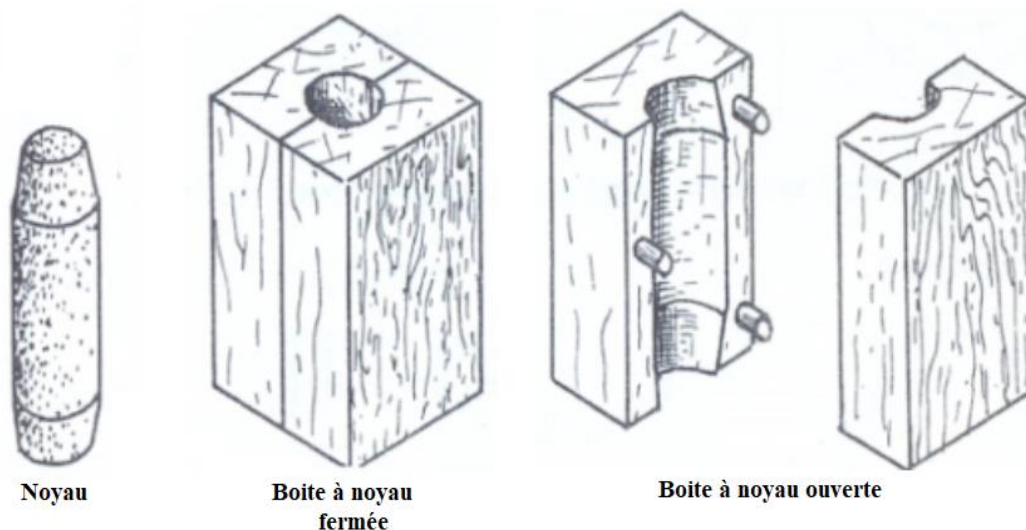


Figure 2.6 : Noyau et boîte à noyau [13]

• Plan de joint

C'est le plan de jonction entre les deux parties du moule. On choisit le sens du plan de joint tel que :

- Eviter les contre-dépouilles (pour rendre le démoulage du modèle possible et ceci implique nécessairement le passage du plan de joint par la plus grande section de la pièce).

- De préférence transversale, ceci facilite l'usinage des surfaces cylindriques.
- Maximiser le volume en dessous du plan de joint (le maximum de matière soit en bas pour favoriser et faciliter le remplissage par gravité).

- **Masselotte**

La masselotte est une réserve de métal liquide destinée à alimenter la pièce et à compenser le retrait de volume subi par la pièce lors de son refroidissement. C'est la zone la plus importante dans la coulée. Elle se solidifie après la pièce et les défauts se forment sur eux, pas dans le tube à essai.

- **Dépouille**

C'est un petit angle entre les parois du moule et la direction d'extraction du modèle. Il sert de faciliter l'extraction du modèle. On les ajoute uniquement sur les surfaces extérieures, sur les surfaces usinées et sur les surfaces qui sont perpendiculaire au plan de joint.

- **Retrait**

Le retrait est l'espace qui apparaît entre la pièce et le moule lors du refroidissement. Cela dépend du matériau de moulage.

- **Surépaisseur**

Afin d'obtenir la précision dimensionnelle requise, une surépaisseur d'usinage est conçue pour éliminer l'influence du moulage sur la surface fonctionnelle.

On ajoute les surépaisseurs d'usinage sur les surfaces qui seraient usinées. On les reconnaît : indication de faible rugosité (une rugosité qui ne peut être que par usinage), cote dimensionnelle précise.

Certaines formes sont impossibles (filetages, taraudages,...) ou difficiles (les petites trous, les détails finis,...) à réaliser par moulage, donc on va les ignorer et ensuite les faire par usinage.

2.1.3.4.2 Différentes étapes de la réalisation du moule et de la coulée

Le modèle est posé sur une table puis on place le châssis métallique. On tasse du sable. On réalise l'empreinte. Pour faciliter le démoulage du modèle, l'angle de dépouille est nécessaire et il faut que les surfaces soient perpendiculaires au plan de joint (figure 2.7). En retirant le modèle et on obtient une forme négative de ce dernier.

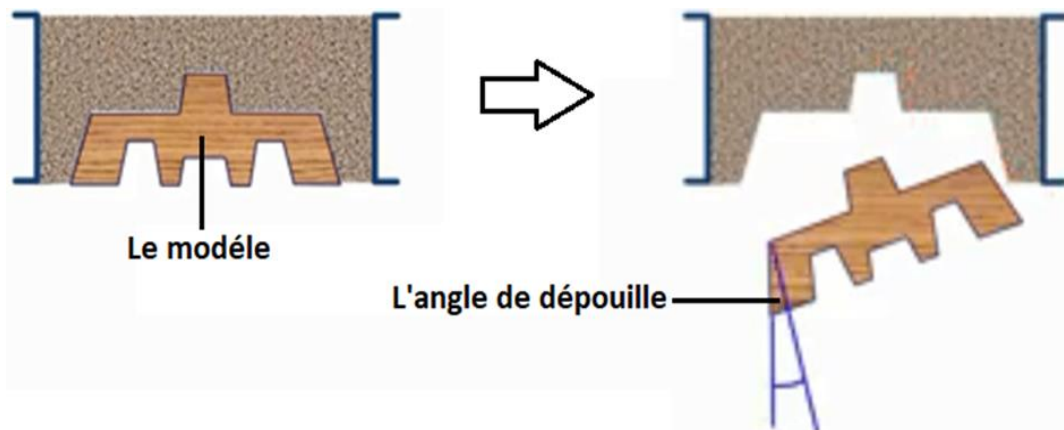


Figure 2.7 : Obtention du moule

On insère le noyau en sable à l'intérieur comme le montre la figure (2.8) pour obtenir une pièce moulée avec des formes intérieures. On creuse dans le sable le canal de coulée du métal en fusion.

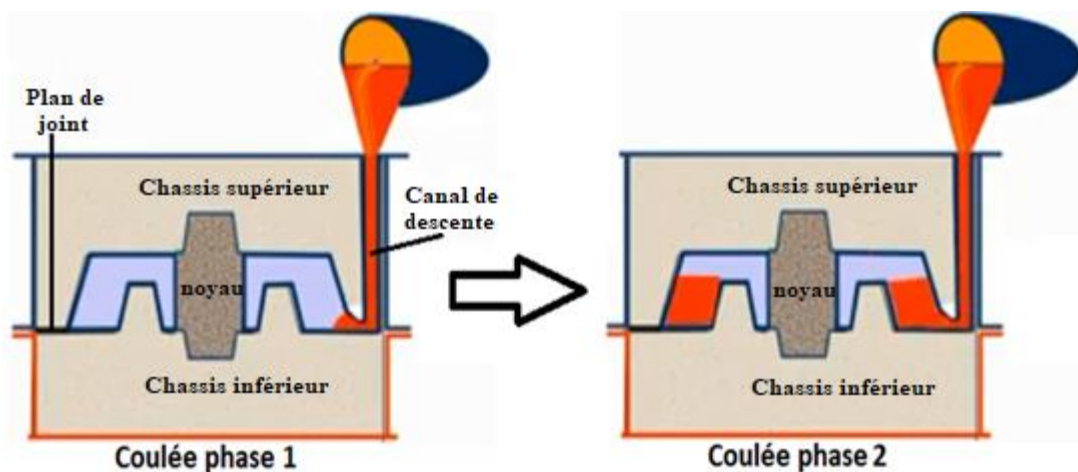


Figure 2.8 : Coulée du métal

Pour éliminer les gaz emprisonnés dans l'empreinte on réalise des événements comme le montre la figure (2.9), ensuite on va laisser l'ensemble se refroidir.

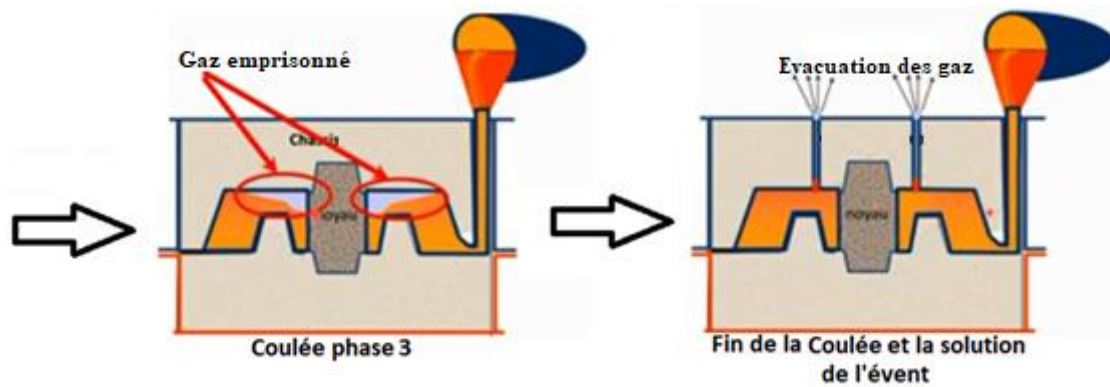


Figure 2.9 : Coulée du métal et échappement des gaz

Le métal va refroidir de l'extérieur de la pièce vers l'intérieur en plusieurs phases montré par les quatre schémas en figure (2.10).

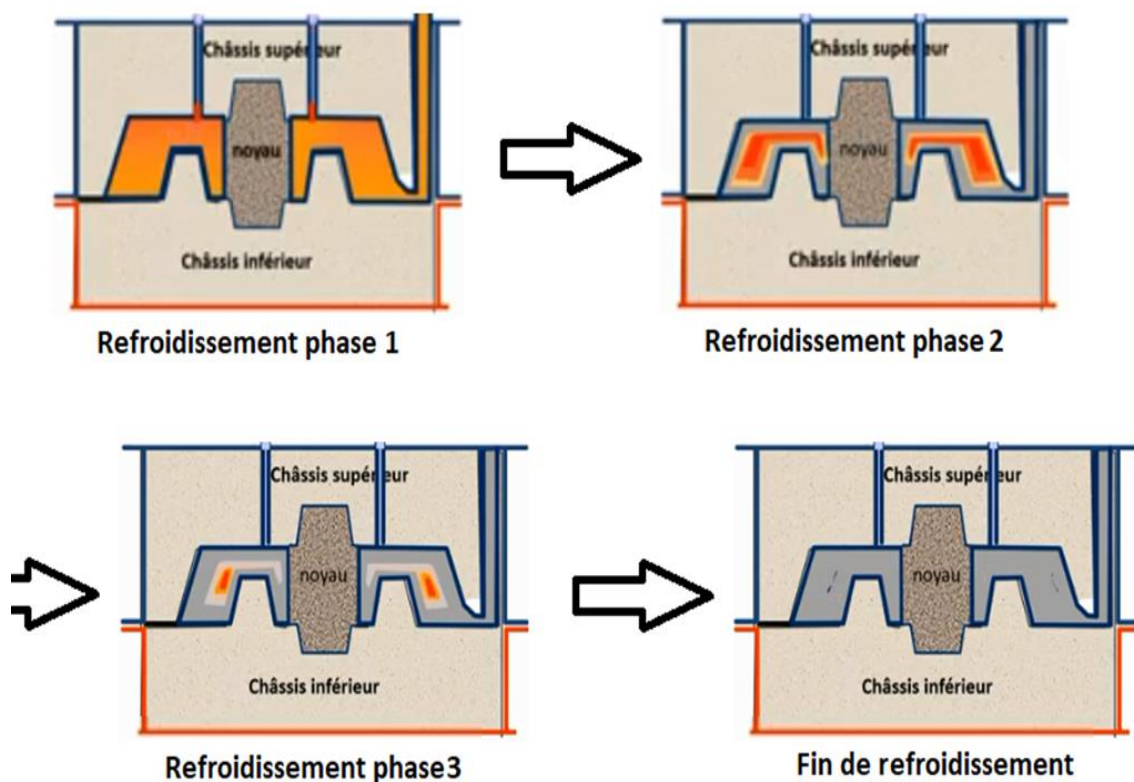


Figure 2.10 : Refroidissement de la pièce

On va avoir des zones chaudes à l'intérieur et on aura donc plusieurs défauts possibles comme le montre la figure (2.11). Tous ces défauts sont dus à la contraction du métal lors du refroidissement.

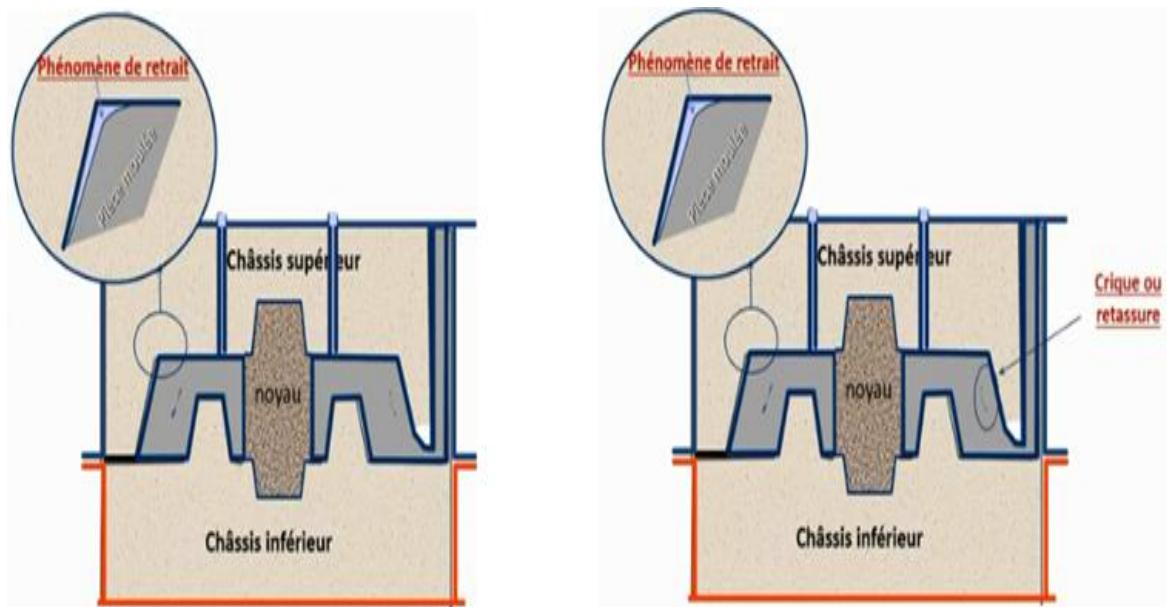


Figure 2.11 : Défauts possibles

La masselotte va nous permettre d'avoir une réserve de matériau qui pourra éventuellement alimenter l'empreinte lors de la phase de refroidissement et surtout essayer de déplacer les points chauds, donc de déplacer les défauts à l'extérieur de la pièce et qu'on va les supprimer lors de la phase d'usinage (figure 2.12).

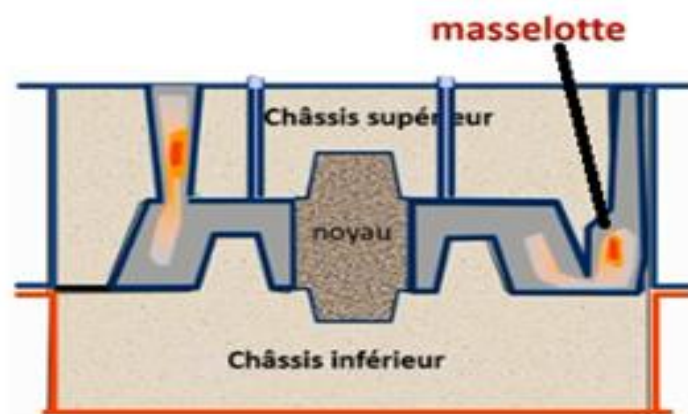


Figure 2.12 : Position de la masselotte

Après solidification, on trouvera la pièce brute avec la descente de coulée, les évents et la masselotte qu'on va les supprimer par ébarbage.

2.1.3.4.3 Critères principaux pour le choix du sens de moulage

- ✓ Localiser les surfaces usinées vers le bas et les surfaces brutes vers le haut (car il y a des impuretés qui vont se concentrer sur le haut et ses impuretés vont rendre l'usinage très difficile donc on devrait mettre les surfaces brutes non usinées vers le haut et celles usinées vers le bas).
- ✓ Maximiser le volume en dessous du plan de joint (faciliter le remplissage par gravité).

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents types de moulage ainsi que les étapes de réalisation d'un moule en sable avec les inconvénients de ce type de moulage qu'on va prendre en considération dans le prochain chapitre.

Chapitre III

Conception des pièces moulées

Introduction

La qualité des pièces, dans une première étape, dépend du soin apporté par le concepteur et dans une deuxième étape de la réalisation du moule. Afin d'obtenir une pièce de haute qualité, il faut éviter au maximum les défauts qui surviennent lors du moulage par des opérations réfléchies pour chaque étape.

3.1 Etapes d'élaboration de moule

Les étapes d'élaboration d'un moule suivent un processus bien défini donné ci-dessous. [13]

3.1.1 Lecture du cahier de charge

Le modelleur est chargé de s'informer sur :

- Le matériau de la pièce à mouler (donc de sa température de fusion).
- La cadence de production.

Le tableau suivant récapitule la température de fusion et la masse volumique des métaux.

Tableau 3.1 : Température de fusion et la masse volumique des métaux

<i>Métal</i>	<i>Symbole</i>	<i>Température de fusion (°C)</i>	<i>Masse volumique (g/cm³)</i>	<i>Métal</i>	<i>Symbole</i>	<i>Température de fusion (°C)</i>	<i>Masse volumique (g/cm³)</i>
<i>Aluminium</i>	Al	658	2,66	<i>Plomb</i>	Pb	327	11,3
<i>Argent</i>	Ag	960	10,5	<i>Zinc</i>	Zn	419	7,19
<i>Chrome</i>	Cr	1550	6,74	<i>Acier</i>	Fe+C	1400	7,85
<i>Cuivre</i>	Cu	1090	8,9	<i>Alpax</i>	Al+Si	600	2,68
<i>Etain</i>	Sn	232	7,28	<i>Bronze</i>	Cu+Sn	900	7,8-8,5
<i>Fer</i>	Fe	1535	7,95	<i>Fonte</i>	Fe+C	1230	7,2
<i>Magnésium</i>	Mg	649	1,74	<i>Laiton</i>	Cu+Zn	940	7,3-8,4
<i>Or</i>	Au	1063	19,3	<i>Zamak</i>	Sn+Al	420	6,6

3.1.2 Lecture du dessin de définition :

Le modelleur est chargé de :

- Comprendre les formes de la pièce.
- S'informer de l'échelle indiquée.
- S'assurer des surfaces à usiner et de celles qui vont rester brutes.
- Lire la rugosité minimale inscrite sur une des surfaces à usiner.
- Lire les dimensions maximales et minimales de la pièce et sur les tolérances.

3.1.3 Choix du procédé de moulage

Le modelleur est chargé de choisir le procédé de moulage adéquat en fonction :

- De la cadence de production.
- De la nature de l'alliage coulé.
- Du poids de la pièce (tableau 3.2)
- De l'épaisseur de la pièce (tableau 3.3).
- De la rugosité et de l'intervalle de tolérance (tableau 3.4).

Tableau 3.2 : Poids de la pièce (kg)

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

Tableau 3.3 : Epaisseur de la pièce (mm)

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

Tableau 3.4 : Rugosité (μm) et l'intervalle de tolérance (mm)

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
<i>Au sable</i>	± 2	20	$\pm 1,5$	20	± 3	25	$\pm 1,7$	20	$\pm 1,5$	12	$\pm 0,8$	10	$\pm 0,5$	10
<i>En carapace</i>	$\pm 0,7$	8	$\pm 0,6$	7	-	-	$\pm 0,5$	5	$\pm 0,6$	4	$\pm 0,6$	4	-	-
<i>En coquille par gravité</i>	$\pm 1,5$	5	$\pm 1,2$	5	-	-	± 1	3	$\pm 0,8$	2	$\pm 0,8$	2	$\pm 0,6$	1,5
<i>En coquille sous pression</i>	-	-	-	-	-	-	$\pm 0,4$	2	$\pm 0,3$	1,5	$\pm 0,3$	1,5	$\pm 0,2$	1
<i>Par centrifugation</i>	$\pm 1,5$	10	$\pm 1,2$	6	-	-	$\pm 0,8$	4	-	-	-	-	-	-
<i>Coulée continue</i>	$\pm 0,6$	10	$\pm 0,8$	15	-	-	$\pm 0,6$	10	-	-	-	-	-	-

3.1.4 Choix du plan de joint

Il faut choisir un nombre minimal de plan de joints, de préférence surfaces planes et perpendiculaires au sens de démoulage.

3.1.5 Retrait

Le retrait est l'espace qui apparaît entre la pièce et le moule lors du refroidissement. Le tableau (3.5) nous donne un aperçu du retrait de chaque alliage.

Tableau 3.5 : Retrait

Alliage		Valeurs prises en compte pour réaliser l'outillage du moule (%)
<i>Alliages d'aluminium</i>	<i>et de cuivre</i>	1,2 à 1,4
	<i>et de Magnésium</i>	1,2 à 1,4
	<i>et de Silicium</i>	1,1 à 1,3
	<i>et de Zinc</i>	1,5
<i>Alliages de cuivre</i>	<i>Cupro-aluminium</i>	1,8
	<i>Bronzes</i>	1,2 à 1,4
	<i>Laiton</i>	1,5
	<i>Laiton haute résistance</i>	1,7
<i>Alliages ferreux</i>	<i>Aciers moulés non alliés</i>	2 à 2,4
	<i>Aciers moulés alliés</i>	2,2 à 2,4
	<i>Fonte GL</i>	0,5 à 1,2
	<i>Fonte GS</i>	1 à 1,7
	<i>Fonte alliée</i>	1,5 à 2
<i>Alliages de magnésium</i>		5
<i>Alliages de zinc</i>		0,4 à 0,5

3.1.6 Dépouille

C'est un angle qui est donné pour faciliter l'extraction du modèle. Le tableau (3.6) suivant donne les différentes valeurs.

Tableau 3.6 : Dépouille

<i>Procédé de moulage</i>	<i>Fontes</i>	<i>Aciers</i>	<i>Alliages de cuivre</i>	<i>Alliages d'aluminium</i>	<i>Alliages de zinc</i>
<i>En sable</i>	5%	3%	3%	3%	3%
<i>En coquille par gravité</i>			3%	2,5%	2,5%
<i>En coquille sous pression</i>			1,5%	1,5%	1%

3.1.7 Surépaisseur d'usinage

Une surépaisseur est ajoutée pour l'usinage des surfaces fonctionnelles. Selon la norme ISO 8062, le tableau (3.7) nous montre la classe et le tableau (3.8) la surépaisseur.

Tableau 3.7 : Classe de la surépaisseur d'usinage

<i>Type de moulage</i>	<i>Classe des surépaisseurs d'usinage spécifiées</i>								
	<i>Métaux et alliages de coulée</i>								
	<i>Acier</i>	<i>Fonte grise</i>	<i>Fonte à graphite sphéroïdale</i>	<i>Fonte malléable</i>	<i>Alliage de cuivre</i>	<i>Alliage de zinc</i>	<i>Alliages de métaux légers</i>	<i>Alliages à base de nickel</i>	<i>Alliages à base de cobalt</i>
<i>Moulage en sable à la main</i>	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
<i>Moulage en sable mécanique et moulage en carapace</i>	F à H	E à G	E à G	E à G	E à G	E à G	E à G	F à H	F à H
<i>Moulage en coquille par gravité/basse pression</i>	-	D à F	D à F	D à F	D à F	D à F	D à F	-	-
<i>Moulage en coquille sous pression</i>	-	-	-	-	B à D	B à D	B à D	-	-
<i>Moulage de précision</i>	E	E	E	-	E	-	E	E	E

Tableau 3.8 : Surépaisseurs

<i>Surépaisseurs d'usinage</i>											
<i>Cote la plus large (mm)</i>		<i>Classe des surépaisseurs d'usinage spécifiées</i>									
<i>Au dessus de</i>	<i>Jusqu'à et y compris</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>K</i>
-	40	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,7	1	1,4
40	63	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	1	1,4	2
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	4	6
160	250	0,3	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,5	8
250	400	0,4	0,7	0,9	1,3	1,8	2,5	3,5	5	7	10
400	630	0,5	0,8	1,1	1,5	2,2	3	4	6	9	12
630	1000	0,6	0,9	1,2	1,8	2,5	3,5	5	7	10	14
1000	1600	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,5	8	11	16
1600	2500	0,8	1,1	1,6	2,2	3,2	4,5	6	9	13	18
2500	4000	0,9	1,3	1,8	2,5	3,5	5	7	10	14	20
4000	6300	1	1,4	2	2,8	4	5,5	8	11	16	22
6300	10000	1,1	1,5	2,2	3	4,5	6	9	12	17	24

La plus grande dimension concerne celle de la pièce usinée.

3.1.8 Boîte à noyau et noyau

- **Choix de la boîte à noyau**

Le choix est fait suivant le tableau ci-dessous.

Tableau 3.9 : Choix de boîte à noyau

<i>Type de boîtes</i>	<i>Nombre de pièces</i>			<i>Noyautage</i>	
	<i>Unitaire</i>	<i>Petite à moyenne série</i>	<i>Grande série</i>	<i>Main</i>	<i>Sur machine</i>
<i>En bois</i>	X	X		X	
<i>Métallique</i>			X		X
<i>En résine synthétique</i>			X		X

- **Dimensionnement du noyau**

Pour le choix du dimensionnement du noyau (figure 3.1), on utilise les courbes de la figure (3.2)

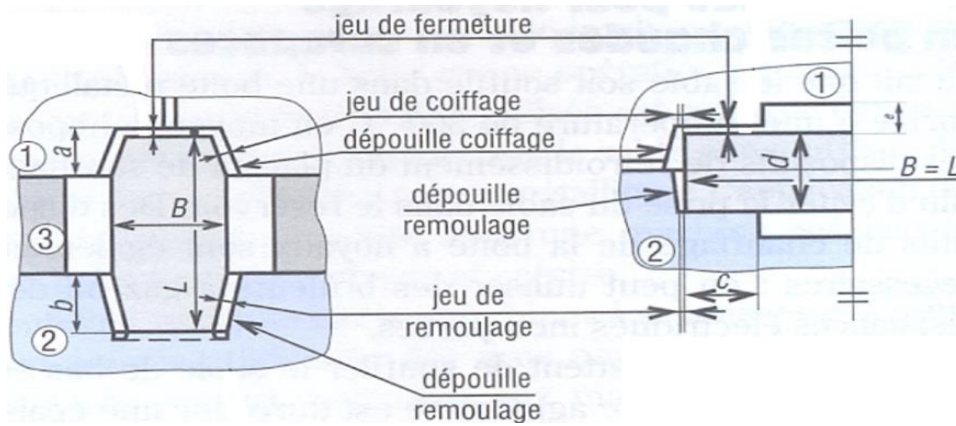


Figure 3.1 : Noyau

d : diamètre du noyau en sable aggloméré ; L : longueur du noyau

B : La plus grande dimension du noyau parallèle au plan du joint du moule.

$a = 10$ à 15 mm ; $b = 20$ à 40 mm ; $c = d$

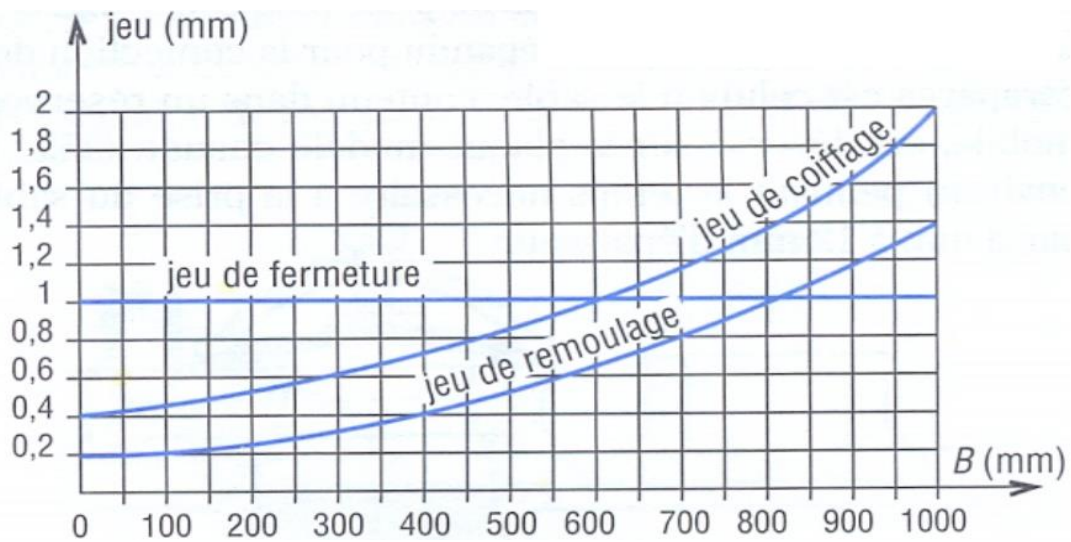


Figure 3.2 : Jeu pour le montage du noyau [13]

Le tableau suivant nous donne les valeurs de la dépouille en %

Tableau 3.10 : Dépouille remoulage et coiffage

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

3.1.9 Dimensionnement du châssis

Le tableau (3.11) suivant nous montre les différentes valeurs pour le dimensionnement du châssis.

Tableau 3.11 : Dimensionnement du châssis

<i>l</i>	Largeur " <i>l</i> " 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
<i>Hauteur "H" en mm</i>													
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

3.1.10 Choix du type et dimensionnement de la masselotte

Afin de déterminer le masselottage optimal, il faut diviser la pièce en volumes simples et évaluer chronologiquement la solidification de ces volumes.

Il faut masselotter les volumes solidifiés en dernier lieu et pour cette raison, on calcule les modules de refroidissements de chaque volume élémentaire et qui sont données par l'expression suivante :

$$MR = V/S \quad (3.1)$$

MR : Module de refroidissement.

V : Volume d'une partie de la pièce.

S : Surface de refroidissement cette partie de la pièce.

On positionnera ainsi les masselottes à proximité des zones se solidifiant en dernier.

Pour déterminer le volume de la masselotte V_m , on doit utiliser l'expression :

$$\eta \cdot V_m = r \cdot V \tag{3.2}$$

- η est le rendement de la masselotte, il est de 1/6 pour une masselotte débouchante et de 1/2 pour une masselotte borgne.
- V est le volume de la pièce.
- r étant le retrait donné par le tableau suivant :

Tableau 3.12 : Retrait de la formule du volume de la masselotte

<i>Alliage</i>		<i>Valeurs prises en compte pour réaliser les systèmes d'alimentation en alliage liquide en %</i>
<i>Alliages d'aluminium</i>	<i>et de cuivre</i>	7 à 8
	<i>et de Magnésium</i>	7 à 8
	<i>et de Silicium</i>	3,5 à 5
	<i>et de Zinc</i>	8
<i>Alliages de cuivre</i>	<i>Cupro-aluminium</i>	4
	<i>Bronzes</i>	4,5
	<i>Laiton</i>	6,5
	<i>Laiton haute résistance</i>	7,5
<i>Alliages ferreux</i>	<i>Aciers moulés non alliés</i>	5 à 7
	<i>Aciers moulés alliés</i>	7 à 10
	<i>Fonte GL</i>	0,5 à 3
	<i>Fonte GS</i>	3 à 6
<i>Alliages de magnésium</i>		4
<i>Alliages de zinc</i>		5

Le col est la liaison entre la masselotte et la pièce, il a les formes suivantes :

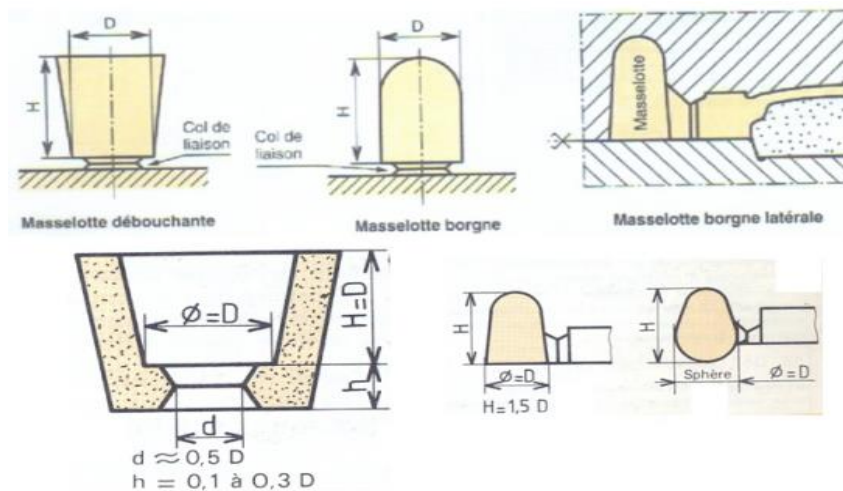


Figure 3.3 : Col de la masselotte [13]

3.1.11 Système de coulée

- **Choix du type de système de coulée**

Dans le système chenal-attaque, les pièces sont étranglées individuellement par une ou plusieurs attaques.

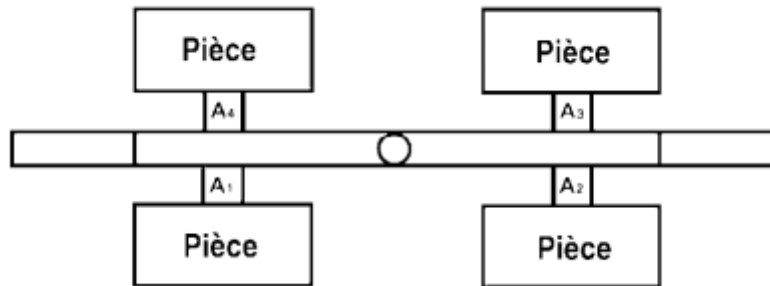


Figure 3.4 : Chenal-attaque [14]

Dans le système descente de coulée-chenal, plusieurs pièces profitent d'un étranglement unique et pour un grand nombre de petites pièces dans le moule. [14]

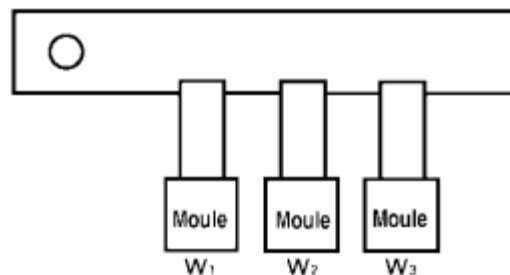


Figure 3.5 : Descente de coulée-chenal [14]

- **Temps de coulée**

Il doit être aussi court que possible, et on peut le déterminer par le diagramme de temps de remplissage en fonction de masse brute des pièces. [14]

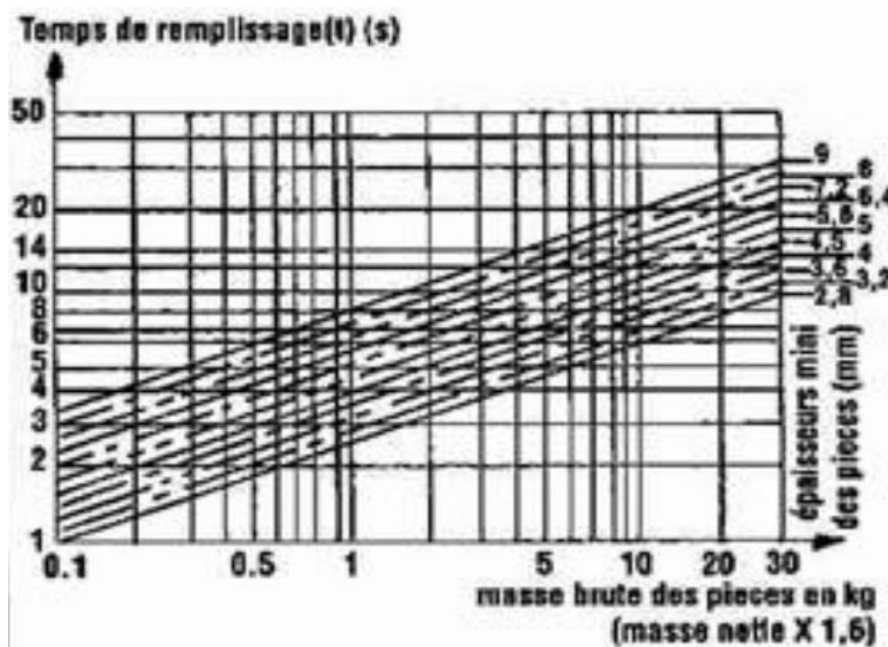


Figure 3.6 : Temps de remplissage en fonction de masse des pièces [14]

• Etranglement

L'étranglement nous aide pour passer le liquide seul et laisser les impuretés dans le pied de la descente. Il permet l'alimentation en douceur qui va maintenir la forme de l'empreinte dans le sable.

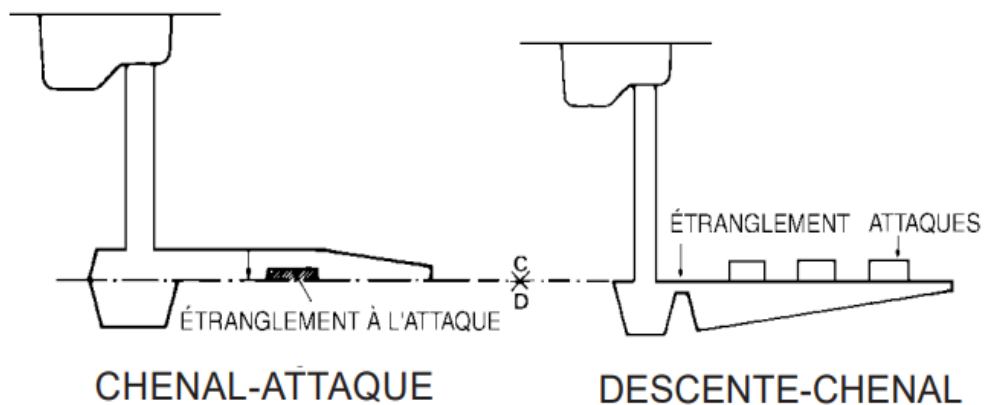


Figure 3.7 : Etranglement dans la chenal-attaque et la descente-chenal [14]

• Bassin de coulée

Le bassin de coulée est le premier réservoir recevant le métal liquide par lequel il transite avant de passer à travers les autres éléments pour remplir l'empreinte.

Le bassin est utilisé mors de la coulée des moyennes et grandes pièces (poids > 150kg) et pour les petites pièces on utilise l'entonnoir qui est de forme conique. [15]

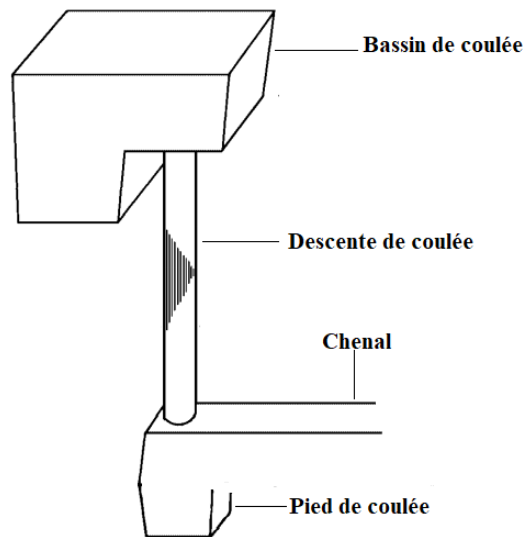


Figure 3.8 : Bassin, descente et pied de coulée [14]

• Descente de coulée

La descente de coulée est un canal vertical par lequel le métal descend vers le chenal. Sa forme est conique pour faciliter le démoulage. [15]

Les sections rétrécies entraînent des pertes de charges qui sont évaluées à :

Tableau 3.13 : Pertes de charges

Coulée par le haut	0,7
Coulée par le côté	0,4
Coulée par le bas	0,4
Coulée des pièces plates	0,25

- La coulée par le haut s'adresse aux pièces de faible hauteur.
- La coulée par le côté est destinée aux pièces de hauteur moyenne.
- La coulée par le bas est destinée aux pièces de hauteur importante.

Le schéma suivant illustre les différentes coulées :

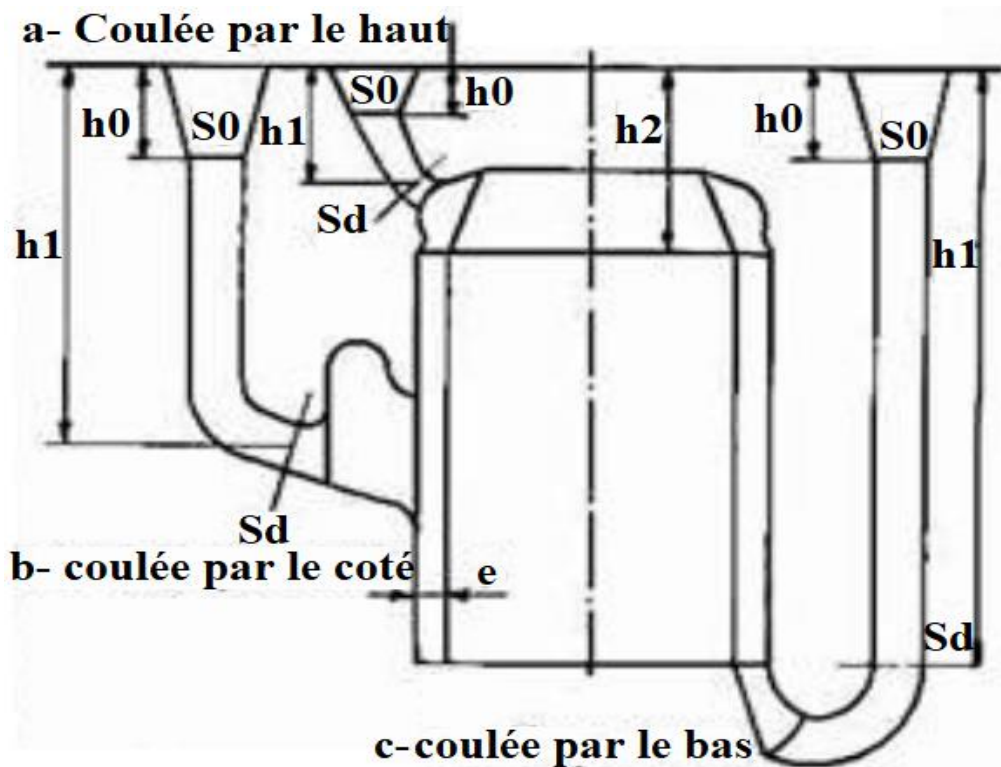


Figure 3.9 : Trou de coulée [13]

La plus petite section transversale d'un système de coulée est calculée comme suit :

- Section théorique S'_d en chute par le haut :

$$S'_d = \frac{V}{0.7t(\sqrt{2gh_1})} \quad (3.3)$$

- Section théorique S'_d en cotée ou en bas :

$$S'_d = \frac{V}{0.4t(\sqrt{g(h_1+h_2)})} \quad (3.4)$$

Tel que :

h_1 : Hauteur de la descente de coulée (mm).

t : Temps de remplissage en seconde (s).

0.7 ou 0.4 : Coefficient de perte de charge.

V : Volume totale de l'empreinte (mm^3).

g : Pesanteur (m/s^2).

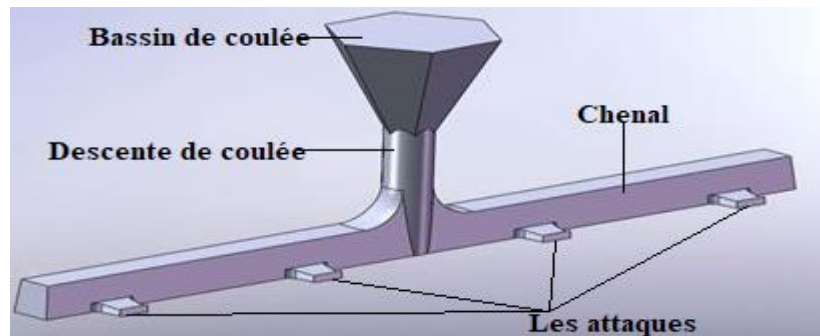


Figure 3.10 : Chenal et attaques [16]

- **Attaques de coulée**

Les attaques de coulée sont de petits canaux ou dispositifs par lequel le métal pénètre dans l’empreinte pour la remplir (figure 3.10). Elles peuvent avoir plusieurs formes : rectangulaires, carrés, rondes, semi-rendes, triangulaires...

Le nombre d’attaques est déterminé en fonction de la longueur des pièces et la quantité du métal dans le moule. [15]

- **Events**

Le mandrin d’évent facilite l’échappement des gaz de l’empreinte (figure 3.11).

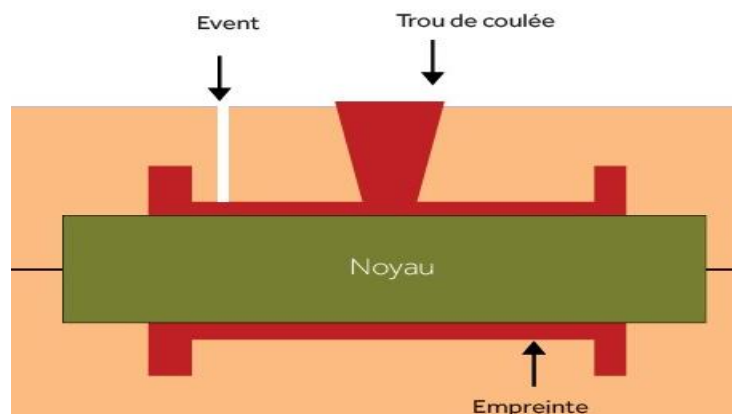


Figure 3.11 : Event du moulage [17]

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes étapes d’élaboration d’un moule que nous appliquerons à un exemple de pièce dans le prochain chapitre.

Chapitre IV

Etude de cas

Introduction

On se propose de préparer le brut d'un moulage en sable à la main du corps d'une pompe centrifuge de matière AU8S, donnée par le dessin 3D ci-dessous.

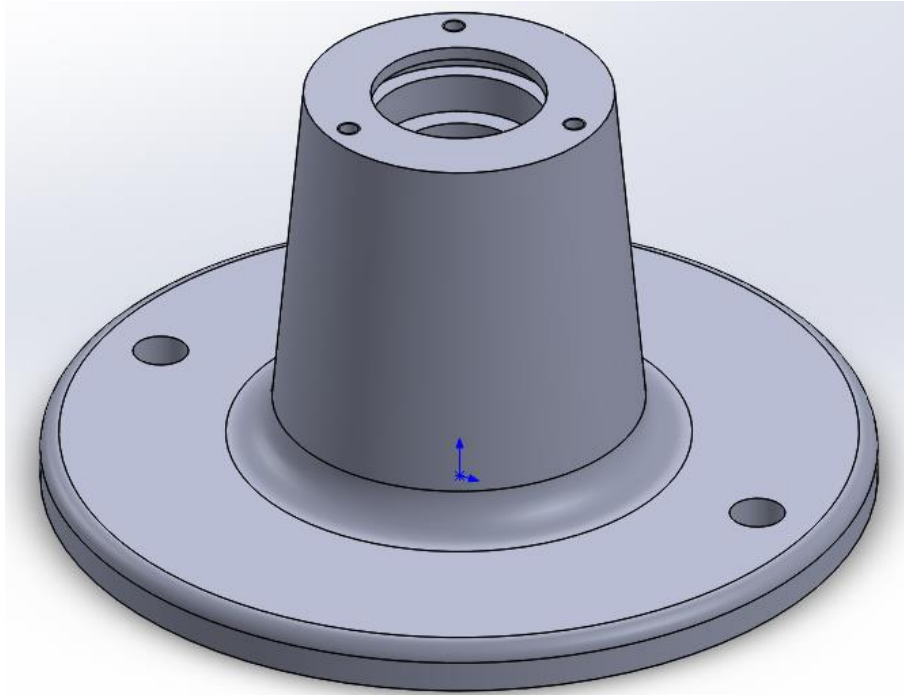


Figure 4.1 : Dessin 3D de la pièce

Le dessin simplifié de la pièce pour le moulage est le suivant :

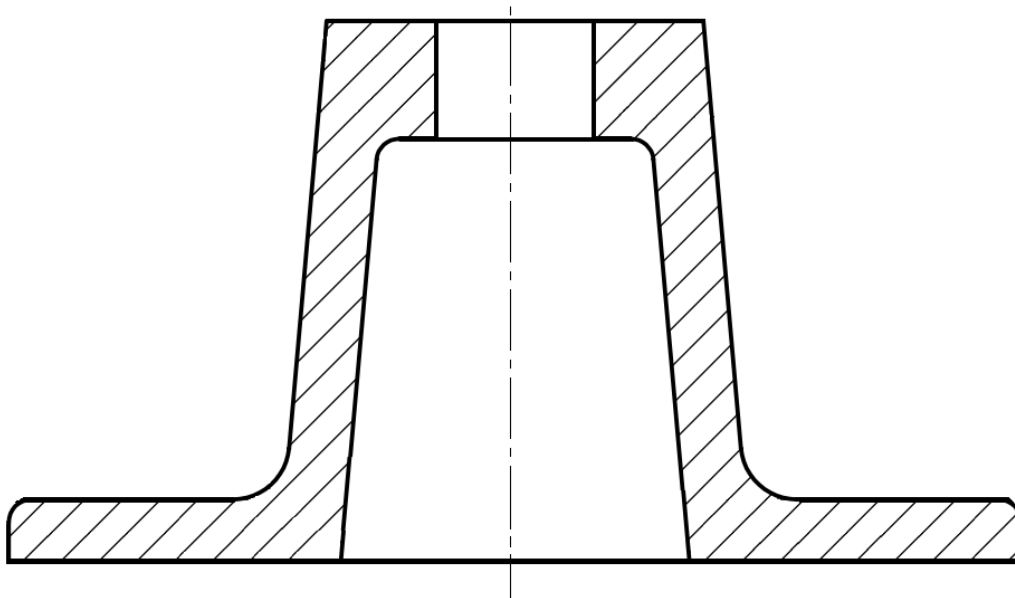


Figure 4.2 : Dessin simplifié de la pièce

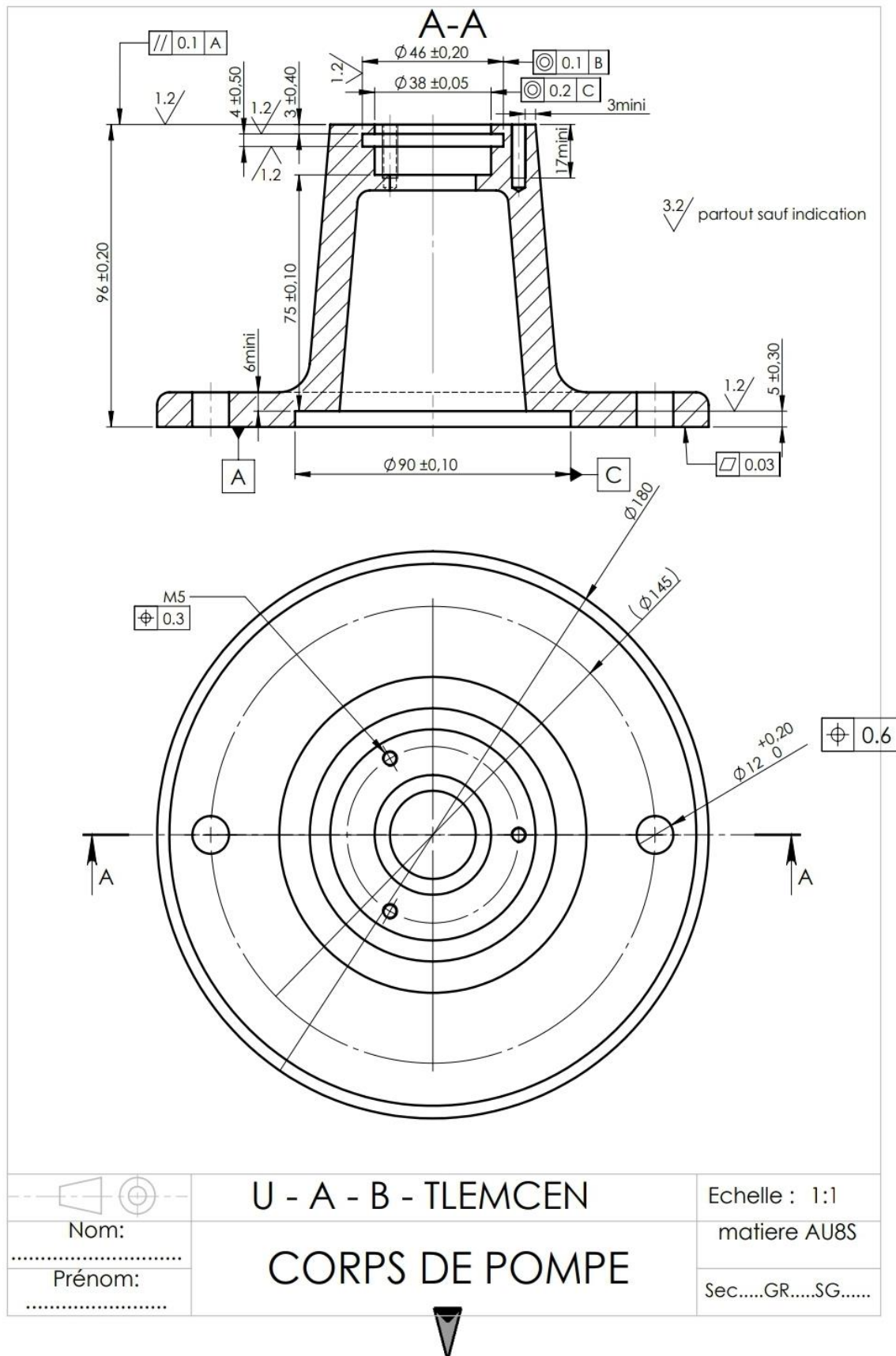


Figure 4.3 : Dessin de définition

4.1 Plan de joint

Pour l'emplacement du plan de joint on propose 3 solutions.

● **1^{ère} solution :**

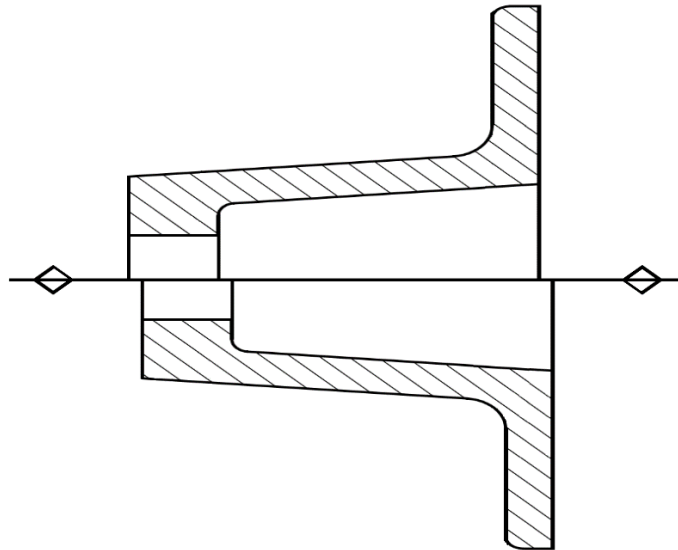


Figure 4.4 : 1^{ère} solution de plan de joint

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

● **2^{ème} solution :**

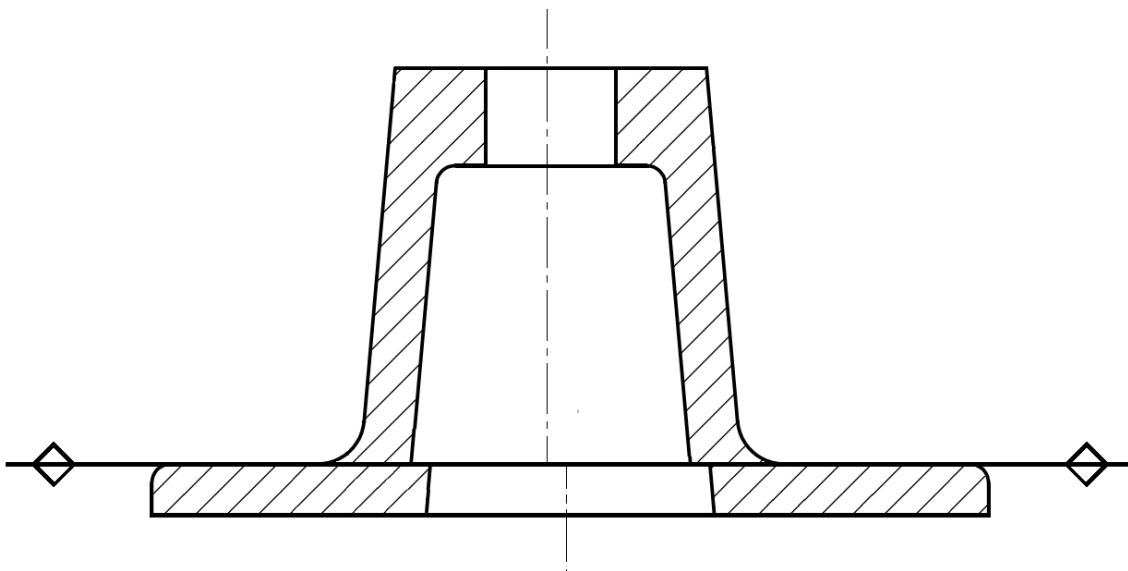


Figure 4.5 : 2^{ème} solution de plan de joint

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

● **3^{ième} solution :**

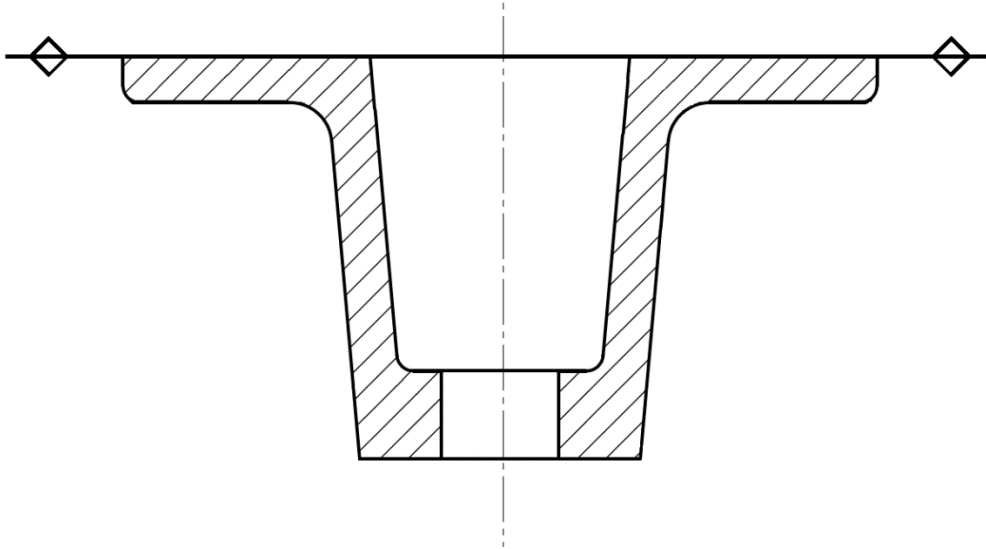


Figure 4.6 : 3^{ième} solution de plan de joint

- Le plan du joint le plus simple.
- La précision de la pièce sera maximum.
- Pièce plus conforme aux conditions du dessin de définition.

➔ La 3^{ième} solution est la plus favorable pour notre cas, donc on la choisit.

4.2 Valeur du retrait du matériau

D'après le tableau de retrait (3.5), le pourcentage du retrait de l'alliage l'aluminium est 1.3 % donc il faut ajouter aux dimensions du dessin de définition de la pièce (figure 4.3) les valeurs suivantes :

Cote 11 :

$$\left. \begin{array}{l} 11 \rightarrow 100\% \\ X \rightarrow 1.3\% \end{array} \right\} X = (11 \times 1.3) / 100 = 0.143 \text{ mm}$$

Cote 85 :

$$85: \quad \rightarrow \quad X = (85 \times 1.3) / 100 = 1.105 \text{ mm}$$

Cote 20 :

$$20: \quad \rightarrow \quad X = (20 \times 1.3) / 100 = 0.26 \text{ mm}$$

4.3 Surépaisseurs d'usinage spécifié

D'après le tableau (3.8), on obtient la surépaisseur 2mm.

Donc :

$$\text{Cote 11 mm} \rightarrow 11+2=13 \text{ mm}$$

$$\text{Cote 85 mm} \rightarrow 85+2=87 \text{ mm}$$

$$\text{Cote 20 mm} \rightarrow 20-2=18 \text{ mm}$$

4.4 Classe de tolérance selon la norme 8062

La tolérance d'après le tableau (3.4) est ± 1.5 mm

4.5 Cotes moyennes du brut

$$\begin{array}{l} 11 + 2 + 1.5 = 14.5 \text{ mm} \\ 11 + 2 - 1.5 = 11.5 \text{ mm} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} 11 + 2 + 1.5 = 14.5 \text{ mm} \\ 11 + 2 - 1.5 = 11.5 \text{ mm} \end{array}} \right\} (14.5 + 11.5) / 2 = 13 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} 85 + 2 + 1.5 = 88.5 \text{ mm} \\ 85 + 2 - 1.5 = 85.5 \text{ mm} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} 85 + 2 + 1.5 = 88.5 \text{ mm} \\ 85 + 2 - 1.5 = 85.5 \text{ mm} \end{array}} \right\} (88.5 + 85.5) / 2 = 87 \text{ mm}$$

$$20 - (2 \times 2) - (2 \times 1.5) = 13 \text{ mm}$$

4.6 Châssis

Suivant le chapitre 3, le matériau du châssis du moule sera en acier et de forme carrée.

Les dimensions d'après le tableau (3.11) sont :

- Longueur : 315 mm
- Hauteur : 125 mm
- Largeur : 400 mm

4.7 Dimensionnement du noyau

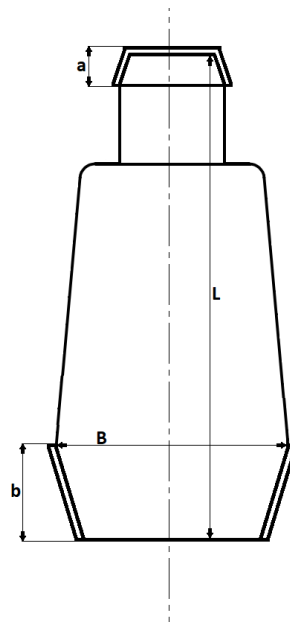


Figure 4.7 : Dimensionnement du noyau

B : 58.42mm

L : $13.643 + 88.105 + a + b = 13.643 + 88.105 + 12.5 + 30 = 144.25$ mm

a : 10 à 15mm $\rightarrow a = (10+15)/2 = 12.5$ mm

b : 20 à 40mm $\rightarrow b = (20+40)/2 = 30$ mm

- D'après le diagramme de la figure (3.2) on a :

- Jeu de remoulage : 0.2 mm

- Jeu de fermeture : 1 mm

- Jeu de coiffage : 0.41mm

- D'après le tableau (3.10) on a :

Dépouille de coiffage : 10%

180°	→	100%	}	X = (180 x 10) / 100 = 18°
X	→	10%		

Dépouille de remoulage : 10%

180°	→	100%	}	X = (180 x 10) / 100 = 18°
X	→	10%		

4.8 Calcul du module de refroidissement MR

Pour le calcul de MR (formule 3.1) et pour déterminer le masselottage optimal, il faut diviser la pièce en volumes simples et évaluer chronologiquement la solidification de ces volumes.

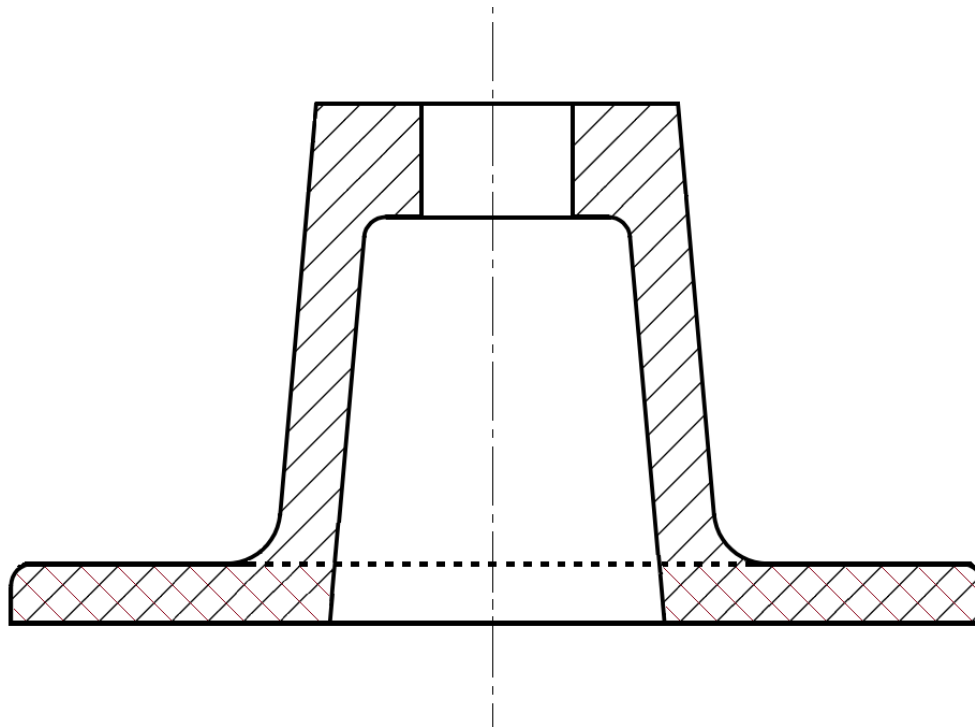
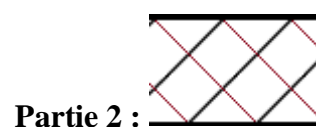
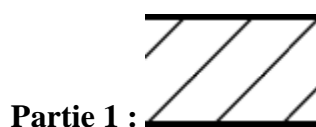


Figure 4.8 : Décomposition de la pièce

Tel que :



Les nouvelles dimensions de la pièce sont :

Les cotes moyennes du brut + retrait :

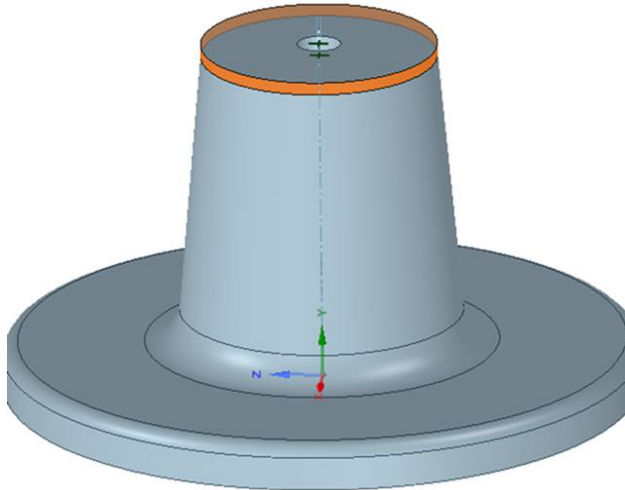
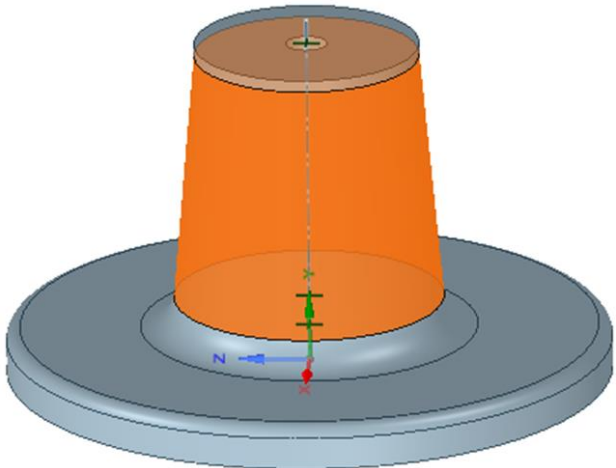
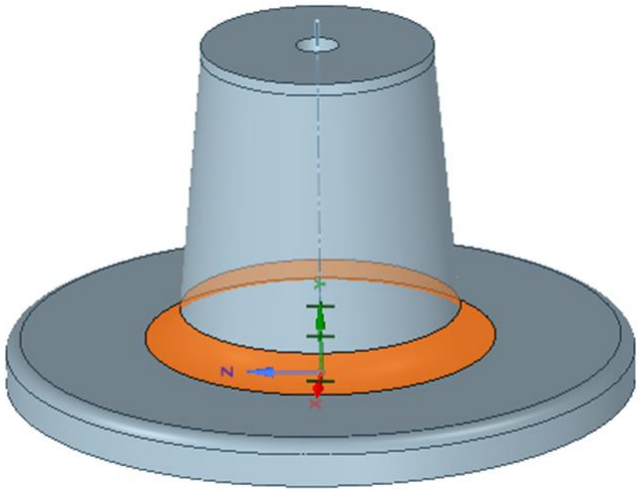
$$13 + 0.143 = 13.643 \text{ mm}$$

$$87 + 1.105 = 88.105 \text{ mm}$$

$$13 - (2 \times 0.26) = 12.48 \text{ mm}$$

Le dessin est fait par le logiciel SolidWorks. Après décomposition de la pièce en surfaces simples (partie 1 et partie 2), il nous donne automatiquement les valeurs des surfaces suivantes :

Tableau 4.1 : Surfaces de la partie 1

<p>$S_1 = 738.8 \text{ mm}^2$</p>	
<p>$S_2 = 17629.44 \text{ mm}^2$</p>	
<p>$S_3 = 4098.51 \text{ mm}^2$</p>	

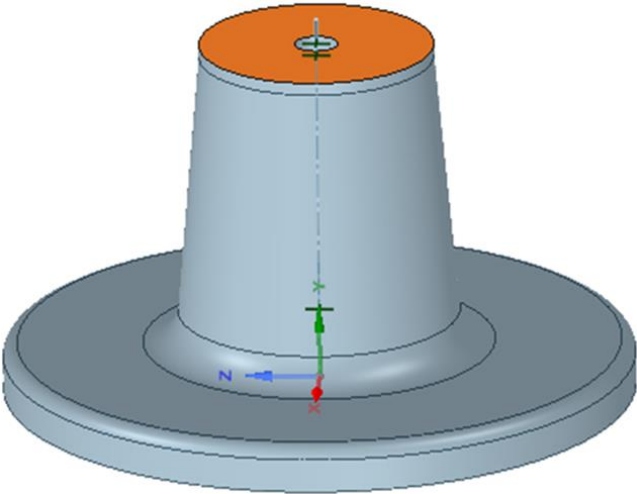
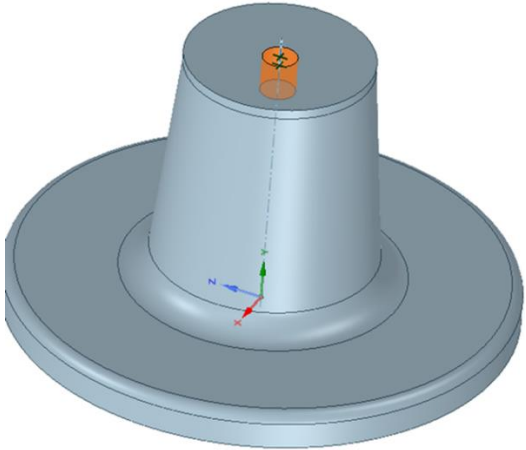
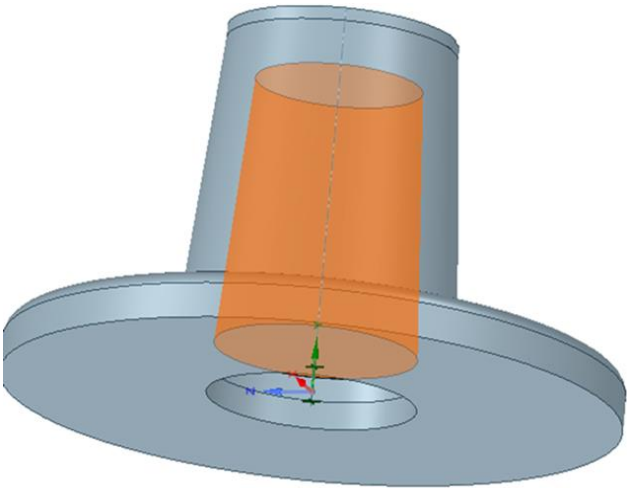
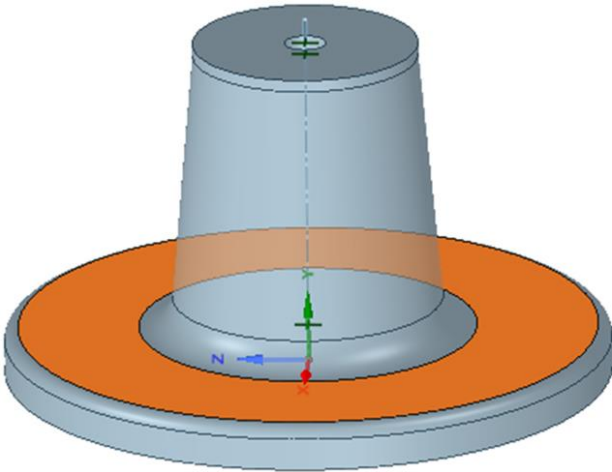
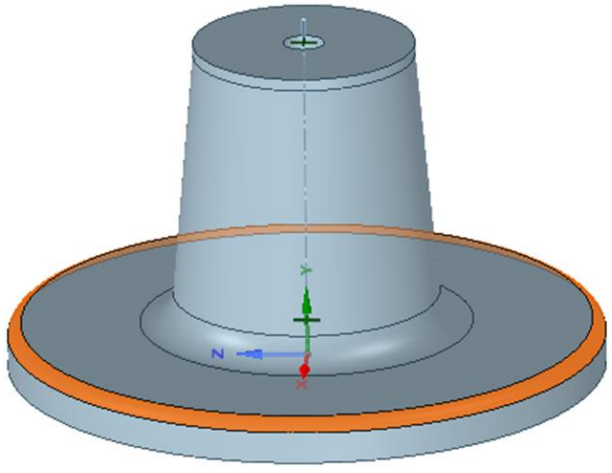
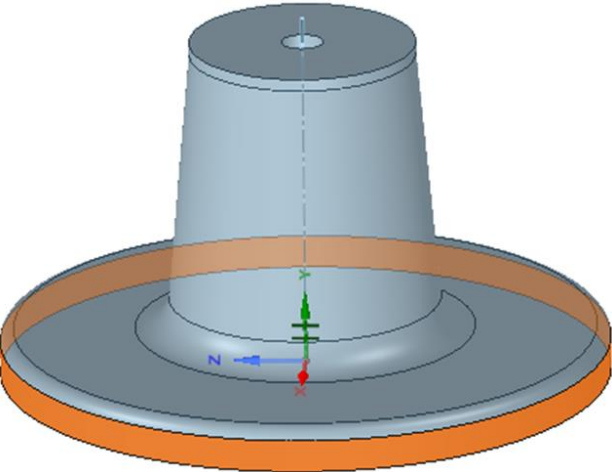
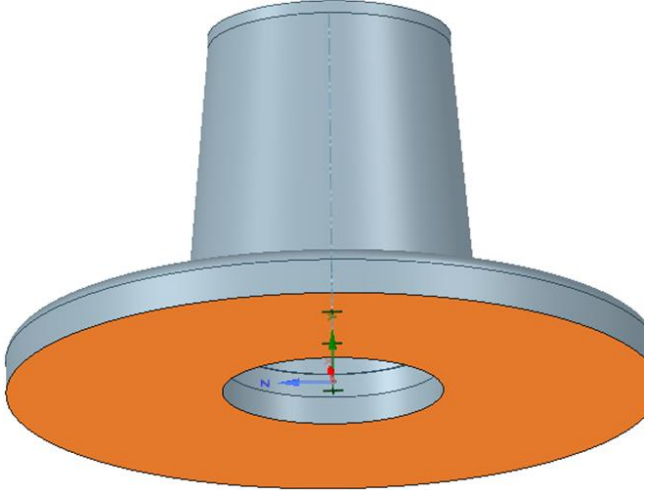
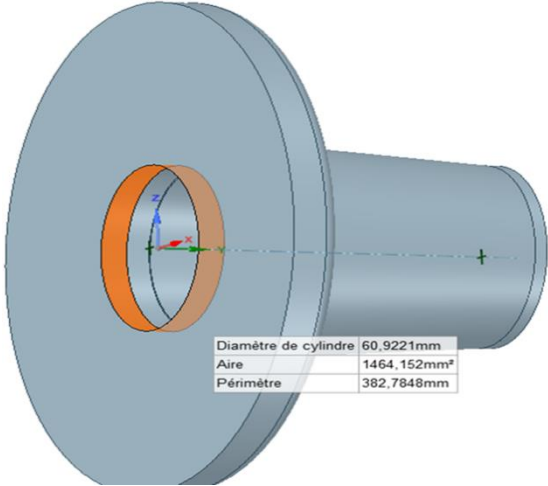
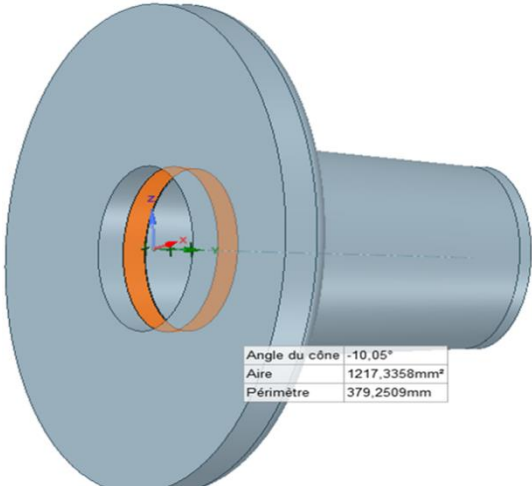
<p>$S_4 = 3403.33 \text{ mm}^2$</p>	
<p>$S_5 = 531.06 \text{ mm}^2$</p>	
<p>$S_6 = 12588.62 \text{ mm}^2$</p>	

Tableau 4.2 : Surfaces de la partie 2

<p>$S_7 = 15338.8 \text{ mm}^2$</p>	
<p>$S_8 = 3495.67 \text{ mm}^2$</p>	
<p>$S_9 = 5456.95 \text{ mm}^2$</p>	

<p>$S_{10} = 22531.89 \text{ mm}^2$</p>							
<p>$S_{11} = 1464.15 \text{ mm}^2$</p>	 <table border="1" data-bbox="927 1211 1171 1267"> <tr> <td>Diamètre de cylindre</td> <td>60,9221mm</td> </tr> <tr> <td>Aire</td> <td>1464,152mm²</td> </tr> <tr> <td>Périmètre</td> <td>382,7848mm</td> </tr> </table>	Diamètre de cylindre	60,9221mm	Aire	1464,152mm ²	Périmètre	382,7848mm
Diamètre de cylindre	60,9221mm						
Aire	1464,152mm ²						
Périmètre	382,7848mm						
<p>$S_{12} = 1217.33 \text{ mm}^2$</p>	 <table border="1" data-bbox="963 1760 1171 1816"> <tr> <td>Angle du cône</td> <td>-10,05°</td> </tr> <tr> <td>Aire</td> <td>1217,3358mm²</td> </tr> <tr> <td>Périmètre</td> <td>379,2509mm</td> </tr> </table>	Angle du cône	-10,05°	Aire	1217,3358mm ²	Périmètre	379,2509mm
Angle du cône	-10,05°						
Aire	1217,3358mm ²						
Périmètre	379,2509mm						

$$S (\text{partie 1}) = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 = 38989.76 \text{ mm}^2$$

$$V (\text{partie 1}) = 305938.87 \text{ mm}^3$$

$$\Rightarrow MR1 = V (\text{partie1}) / S (\text{partie1}) = 305938.87 / 38989.76 = 7.85 \text{ mm}$$

$$S (\text{partie2}) = S_7 + S_8 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} = 49504.79 \text{ mm}^2$$

$$V (\text{partie2}) = 217014.05 \text{ mm}^3$$

$$\Rightarrow MR2 = V (\text{partie2}) / S (\text{partie2}) = 217014.05 / 49504.79 = 4.38 \text{ mm}$$

4.9 Masselotte

On positionnera les masselottes à proximité des zones se solidifiant en dernier, et on a $MR1 > MR2$ alors la partie 1 se solidifiera en dernier.

Dans ce cas, on a notre masselotte en haut de la partie 1. Donc on a une masselotte débouchante. Pour le calcul du volume de la masselotte la relation (3.2) citée au chapitre 3 est appliquée :

$$V_m = rV_p / \eta \rightarrow V_m = 0.07 \times 305938.87 \times 6 = 128.5 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

4.10 Système de coulée

4.10.1 Choix du type de système de coulée

Puisque on a une seule pièce avec des plusieurs attaques, donc on utilise la descente de coulée-chenal.

4.10.2 Temps de coulée

Pour trouver le temps de coulée, on utilise le diagramme de temps de remplissage en fonction de masse brute des pièces (figure 3.6).

La masse brute de la pièce (pièce + masselotte) est :

$$m = 1.41 + 0.35 = 1.76 \text{ Kg}$$

$$m_p = V_p \cdot \rho = 522952.92 \times 10^{-9} \times 2700 = 1.41 \text{ Kg}$$

$$m_m = V_m \cdot \rho = 128500 \times 10^{-9} \times 2700 = 0.35 \text{ Kg}$$

m_p : La masse de la pièce (Kg).

V_p : Volume de la pièce : 522952.92 mm³

m_m : La masse de la masselotte (Kg).

V_m : Volume de la masselotte : 128500 mm³

ρ : Masse volumique d'aluminium : 2700 Kg/m³

Et l'épaisseur mini de la pièce : 12.48 mm

D'après le diagramme (figure 3.6) on obtient le temps de remplissage égal à 20s.

4.10.3 Bassin de coulée

Le bassin est un réservoir recevant le métal liquide. Dans notre cas on a une pièce inférieure de 150 Kg donc on doit utiliser un entonnoir qui est de forme conique.

4.10.4 Descente de coulée

La descente de coulée est un canal vertical par lequel le métal descend vers le chenal.

Pour notre pièce, on a la coulée par le bas qui a de 0.4 de perte de charge.

Section théorique S'_d en chute par le bas (formule 3.4) :

$$S'_d = \frac{V}{0.4.t(\sqrt{g(h_1+h_2)})} = \frac{651452.92}{0.4.20(\sqrt{9810(125+23.26)})} = 67.52 \text{ mm}^2$$

On a $S'_d = 67.52 \text{ mm}^2 = 0.67 \text{ cm}^2$, d'après le tableau (3.14) des sections S'_d et S_d on trouve :

$$S_d/S'_d = 1.34 \rightarrow S_d = 1,34 S'_d = 67.52 \times 1.34 = 90.5 \text{ mm}^2$$

$$a = 17 \text{ mm et } b = 6 \text{ mm}$$

Alors d'après les formules (3.5, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13) :

$$R = a = x/4 = 17 \text{ mm} \rightarrow x = 17 \times 4 = 68 \text{ mm}$$

$$S_a = 3. S_d = 3 \times 90.5 = 271.5 \text{ mm}^2$$

$$S = 2S_d\sqrt{h_1} = 2 \times 90.5 \sqrt{125} = 2023.6 \text{ mm}^2$$

$$S_0 = S_d \sqrt{\frac{h_1}{h_2}} = 90.5 \sqrt{\frac{125}{23.26}} = 209.8 \text{ mm}^2$$

$$Y = \sqrt{2x} = \sqrt{2.68} = 11.66 \text{ mm}$$

4.10.5 Chenal à coulée

Le chenal est une conduite horizontale servant de liaison entre la descente de coulée et les attaques par lesquelles le métal est débité dans l’empreinte.

On essaye d’alimenter l’ensemble de la pièce au même temps pour éviter le risque d’avoir commencé la solidification donc on choisit cette chenal qu’elle est autour de l’empreinte.

La surface du chenal est : $S_a = 271.5 \text{ mm}^2$.

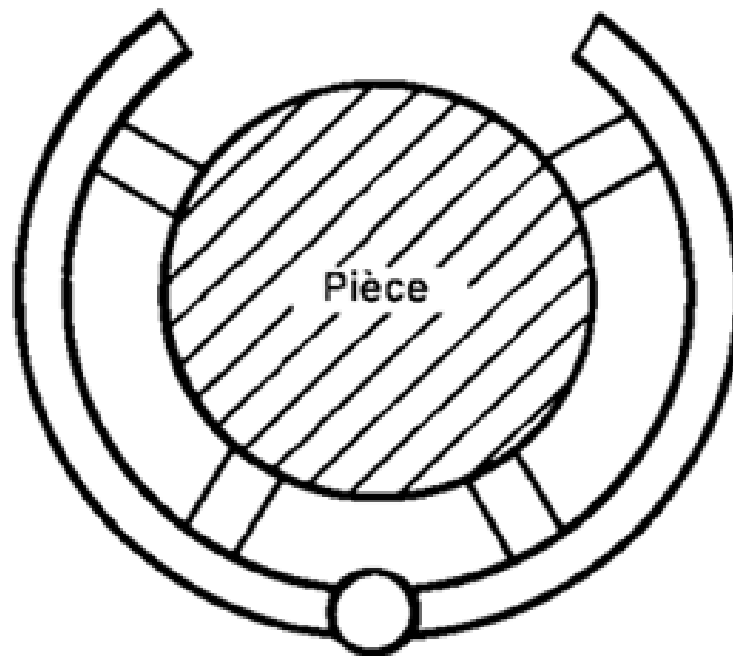


Figure 4.9 : Chenal et les 4 attaques

4.10.6 Attaques de coulée

Les attaques de coulée sont de petits canaux ou dispositifs par lequel le métal pénètre dans l’empreinte pour la remplir. On a choisit d’utiliser 4 attaques autour de la pièce pour l’alimenter au même temps.

Sa surface d’après la formule (3.14) :

$$S_t = \frac{S_a}{\text{nombre d'attaques}} = \frac{271.5}{4} = 67.87 \text{ mm}^2$$

4.10.7 Events

On met les événements dans plusieurs endroits pour éviter le stockage des gaz. On le fait en le perçant avec des tiges cylindriques de différent diamètre dans les grandes surfaces (partie 2).

→ Après avoir appliqué toutes les étapes pour le calcul de l’empreinte, on obtient le schéma du moule de notre corps de pompe étudié :

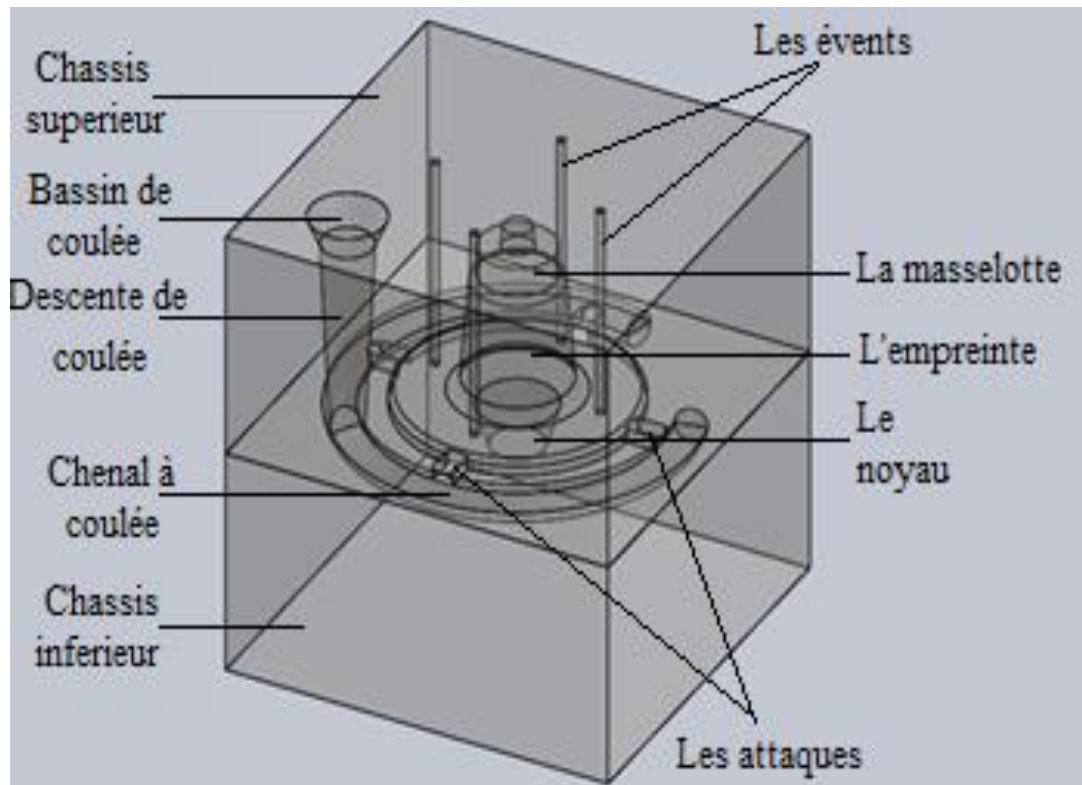


Figure 4.10 : Moule obtenu

Conclusion

Le moule ainsi obtenu, et après la coulée nous supprimerons les détails (masselotte, trou de coulée et événements) par usinage. Mais avant ça il faut passer par l'étape du refroidissement, que nous étudierons dans le chapitre suivant.

Chapitre V

Etude du refroidissement

Introduction

Une fois que le métal en fusion est versé dans le moule, il se refroidit et se solidifie, cela signifie une différence de température c'est ce qu'on l'appelle de transfert de chaleur. Dans cette section, nous examinerons la solidification qui se produit lors de la coulée. Les aspects associés à la solidification comprennent le temps de refroidissement du métal.

5.1 Transfert thermique

L'énergie thermique est l'énergie cinétique d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés transferts thermiques. Deux corps ayant la même température sont dits en équilibre thermique. Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid comme notre cas : il y a alors un transfert de chaleur.

Il existe 3 types de transfert d'énergie thermique : la conduction, la convection et le rayonnement thermique. [18]

5.1.1 Transfert de chaleur par conduction

Le transfert par conduction est un échange d'énergie avec contact. Dans un gaz ou un liquide, l'énergie se propage par contact direct entre molécules au gré des chocs aléatoires à l'échelle microscopique. Dans les solides, la conduction thermique est assurée par les électrons de conduction et les phonons.

La conduction thermique est un transfert thermique spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse. [18]

Dans le moulage on a une conduction entre le châssis et le sable et entre le sable et le métal (aluminium).

5.1.2 Transfert thermique par convection

Ce transfert d'énergie s'accompagne de mouvement de molécules dans un liquide ou un gaz. La convection naturelle ou libre évoque un échange de chaleur responsable du mouvement (c'est le transfert thermique qui provoque le mouvement).

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. [18]

Dans notre cas, L'ensemble moule-aluminium a une convection naturelle avec l'environnement.

5.1.3 Rayonnement

Le transfert se fait par rayonnement électromagnétique. Le rayonnement du soleil dans l'espace en est l'exemple caractéristique.

Le corps récepteur réfléchit alors certaines longueurs d'ondes. Ce sont uniquement ces longueurs d'onde absorbées qui contribuent à son équilibre thermique. [18]

5.2 Etude thermique

Dans le cas d'un moule peu conducteur, la cinétique est contrôlée par le transfert de chaleur au sein de ce moule. Ce qui nous amène à résoudre l'équation de la chaleur au sein du moule. [19]

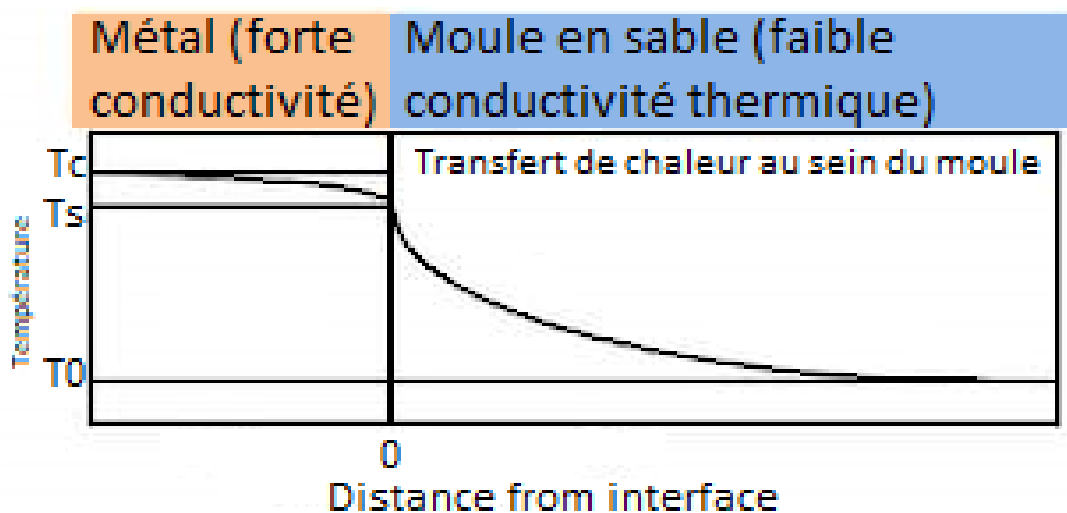


Figure 5.1 : Diagramme de température dans le métal et le moule [19]

Avec :

T_c : Température de coulée.

T_s : Température du solidus.

T_0 : Température de solidification.

5.3 Résolution de l'équation de la chaleur

L'équation de transfert de chaleur (conduction) en 1D :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_M \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5.1)$$

Avec :

a_M (m²/s) : Diffusivité thermique du moule ($a_M = \frac{K_M}{\rho c_p}$)

K_M : Coefficient de conductivité thermique (W/m.°C)

ρ : Masse volumique du métal (Kg/m³)

c_p : Chaleur massique (J/Kg.°C)

Pour les conditions aux limites suivantes : à $x = 0$, $T = T_s$ et à $x = \infty$, $T = T_0$; la solution analytique de l'équation de la chaleur s'écrit :

$$T_{(x,t)} = T_0 + (T_s - T_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_M t}} \right) \right] \quad (5.2)$$

erf : Fonction d'erreur ayant le développement limité suivant [19] :

$$\operatorname{erf} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(u - \frac{u^3}{3.1!} + \frac{u^5}{5.2!} - \frac{u^7}{7.3!} + \dots \right) \quad (5.3)$$

5.4 Bilan de chaleur

La chaleur totale libérée avant la solidification se compose de :

1- La chaleur latente de solidification :

$$Q_F = \rho_{\text{métal}} L V_{\text{métal}} \quad (5.4)$$

2- La chaleur sensible (de refroidissement) :

$$Q_S = \rho_{\text{métal}} V_{\text{métal}} (T_c - T_s) c_{\text{métal}} \quad (5.5)$$

Le temps correspondant à $Q = Q_S + Q_F$ est le temps de solidification $t = t_s$ [19]

$$Q_S + Q_F = \frac{2AK_M}{\sqrt{K_M a_M}} (T_S - T_0) t_s^{0.5} \quad (5.6)$$

5.5 Loi de Chvorinov

Si le moulage est en métal pur ou en alliage, la solidification prend du temps de toute façon. Le temps total de solidification est le temps nécessaire à la coulée pour se solidifier après la coulée. Ce temps dépend de la taille et de la forme du moulage exprimé par une relation empirique connue sous le nom de règle de Chvorinov qui établit :

$$t_s = B (V/A)^n \quad (5.7)$$

Ou, V est le volume de la coulée ; A est la surface et B est la constante du moule, qui dépend des caractéristiques du métal coulé (sa densité, sa capacité thermique et sa chaleur de fusion), le matériau du moule (sa densité, sa conductivité thermique et sa capacité thermique), l'épaisseur du moule, et la quantité de surchauffe et n égale à 2.

Tel que :

$$B = \frac{\pi \rho^2 (c(T_c - T_s) + L)^2}{4b^2 (T_s - T_{sable})^2} \quad (5.8)$$

Puisque la masselotte et la pièce moulée se trouvent toutes deux dans le même moule et se remplissent du même métal dans les mêmes conditions, la règle de Chvorinov peut être utilisée pour garantir que la pièce moulée se solidifiera avant la masselotte. Ceci est nécessaire si le liquide à l'intérieur de la masselotte doit alimenter efficacement la coulée pour compenser le retrait de solidification.

• Pour la constante B (formule 5.8) on a :

➤ Volume de la pièce :

$$V = V (\text{partie 1}) + V (\text{partie 2}) = 305938.87 + 217014.05 = 522952.92 \text{ mm}^3$$

$$V = 522952.92 \text{ mm}^3$$

➤ Surface de contact entre la zone et le matériau de moulage :

$$S = S (\text{partie 1}) + S (\text{partie 2}) = 38989.76 + 49504.79 = 88494.55 \text{ mm}^2$$

$$S = 88494.55 \text{ mm}^2$$

- Masse volumique d'aluminium : $\rho = 2700 \text{ Kg/m}^3$
- chaleur massique d'aluminium : $c = 900 \text{ J/Kg.K}$
- Chaleur latente : $L = 388.10^3 \text{ J/Kg}$
- Température du sable : $T_{sable} = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298.15 \text{ K}$
- Température de solidus : $T_s = 548.2 \text{ }^\circ\text{C} = 821.35 \text{ K}$

D'après le diagramme ci-dessous de solidification de l'alliage AU8S (Al-Cu), et puisque on a de 8% de cuivre pour cet alliage on obtient par projection :

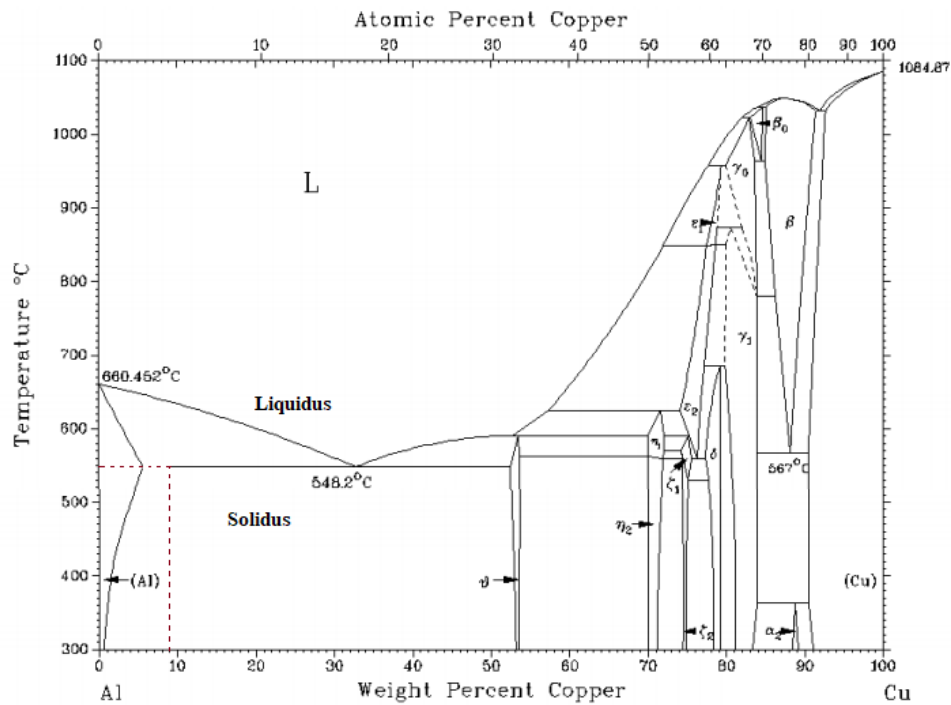


Figure 5.2 : Diagramme de solidification de l'alliage Al-Cu [20]

Température de coulée : $T_c = T_s + \Delta T_p = 548.2 + 251.8 = 800 \text{ }^\circ\text{C} = 1073.15 \text{ K}$

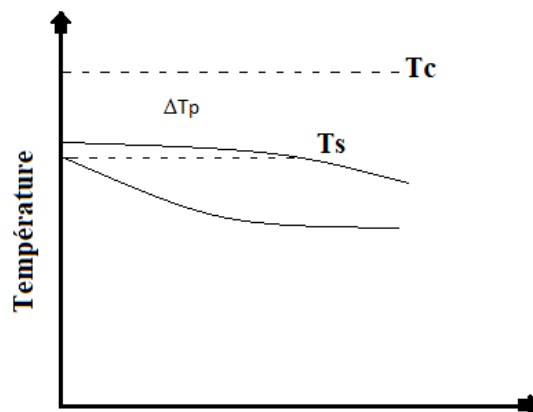


Figure 5.3 : Diagramme explique T_c , T_p et ΔT_p

- Effusivité d'aluminium : $b = \sqrt{(\lambda \cdot \rho \cdot c)} = \sqrt{(0.5 \times 2700 \times 900)} = 1102.3 \text{ J/m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{0.5}$
- λ : Conductivité thermique (W/m.K) : 0.5 W/m.K
- ρ : Masse volumique d'aluminium (Kg/m³) : 2700 Kg/m³
- c : Capacité thermique massique d'aluminium (J/Kg.K) : 900 J/Kg.K

Donc :

$$B = \frac{\pi \rho^2 (c(T_c - T_s) + L)^2}{4b^2 (T_s - T_{sable})^2} = \frac{\pi 2700^2 (900(1073.15 - 821.35) + 388.10^3)^2}{4 \cdot 1102.03^2 (821.35 - 298.15)^2} = 6.5 \times 10^6 \text{ s/m}^2$$

Alors la formule (5.7) nous donne :

$$\Rightarrow t_s = B \left(\frac{V}{S}\right)^2 = 6.5 \times 10^6 \left(\frac{522952.92 \cdot 10^{-9}}{88494.55 \cdot 10^{-6}}\right)^2 = 227 \text{ s}$$

$$\Rightarrow t_s = 3 \text{ min } 48 \text{ s}$$

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de calculer le temps de refroidissement de la pièce après la coulée. On laisse le métal pendant 3 minutes 48 secondes pour se solidifier complètement.

Chapitre VI

Simulation du moulage

Introduction

Après le dessin de la pièce par le Solid Works, une conception de moule est faite par le module « Mold Tool » du logiciel ainsi qu'une simulation. C'est un outil indispensable d'aide à la décision lors des phases de conception et d'industrialisation d'un produit manufacturé. Il permet de vérifier la bonne adéquation entre le produit moulé et le procédé de fabrication ce logiciel et sa se qu'on doit le présenté dans ce chapitre.

6.1 Module moulage

Le logiciel SW donne la possibilité de créer des moules simples ou complexes.

Voilà notre pièce en 3D après qu'on l'a dessiné et enregistré :

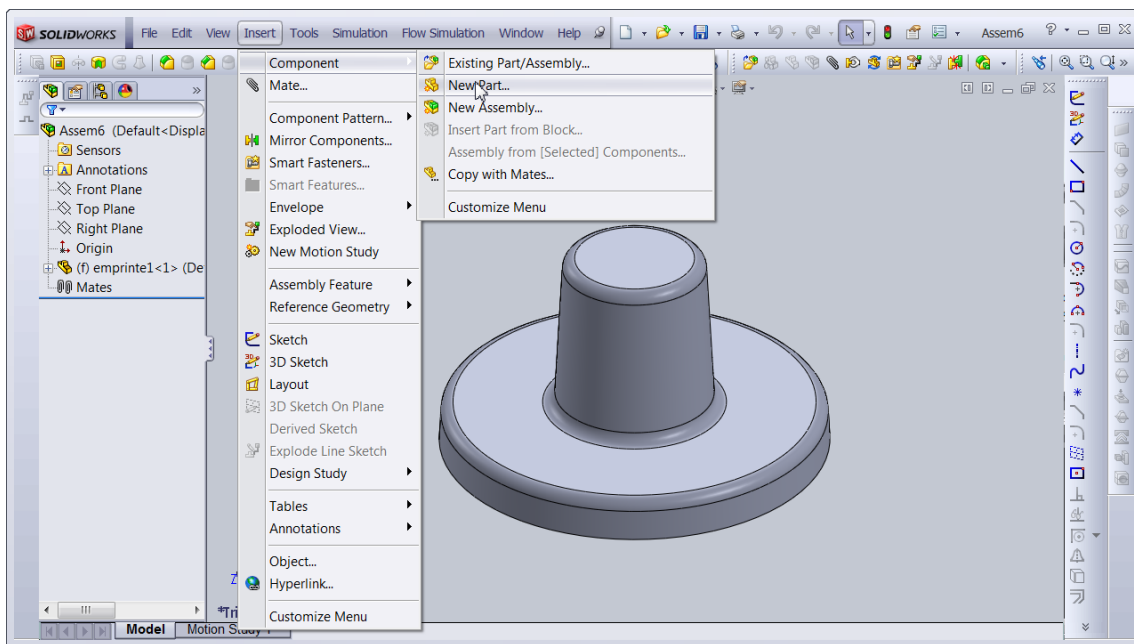
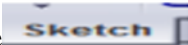



Figure 6.1 : Pièce pour moulage

Appuyer sur l'icône « enregistrer et continuer ». Prendre la fonction assemblage puis sélectionner la pièce. Cliquez droit « éditer la pièce » et après sélectionner suivant la figure 6.2.

Cliquer esquisse  → cliquer rectangle 

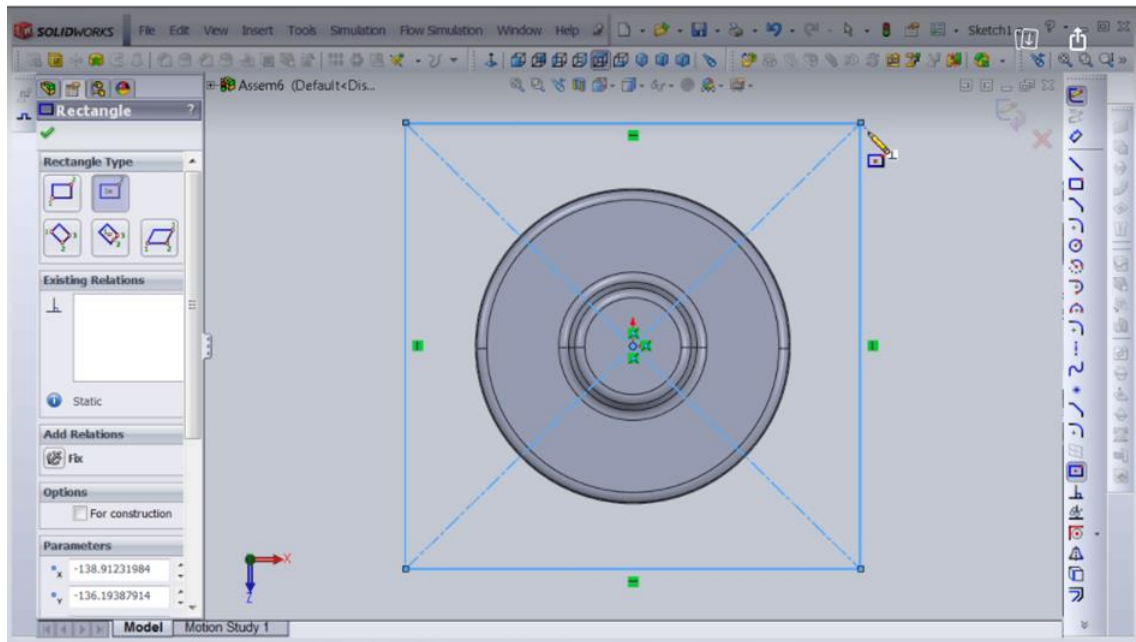
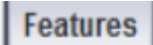
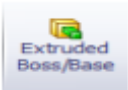


Figure 6.2 : Dessin d'un rectangle sur le plan choisi

Cliquer fonction  → Cliquer bossage extrude 

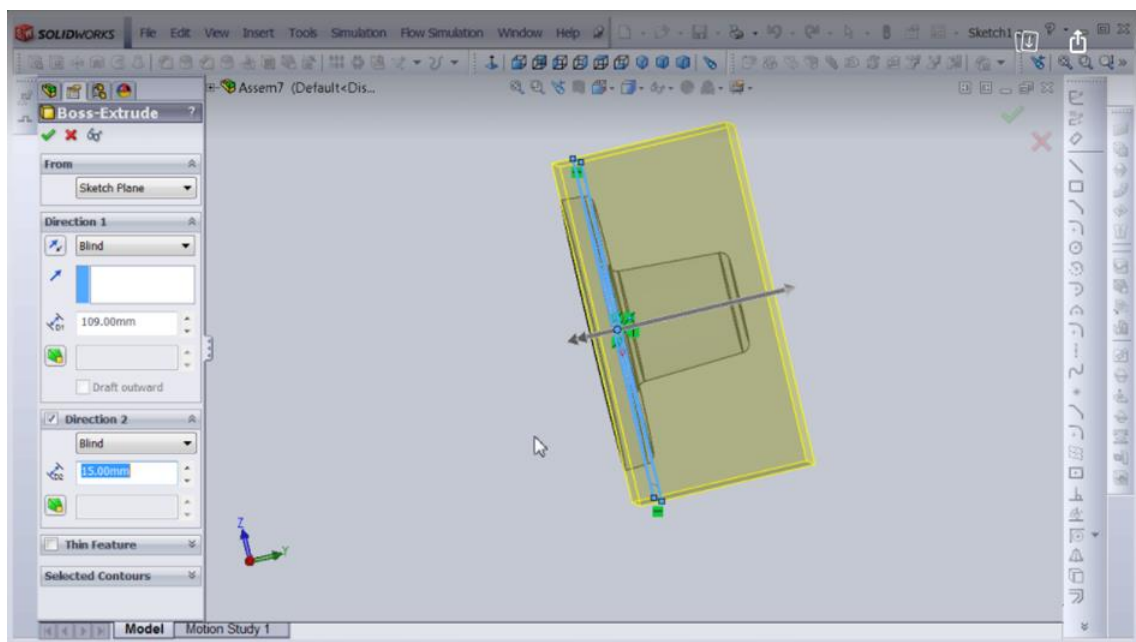


Figure 6.3 : Application de la fonction « extruder »

Cliquer fonction empreinte

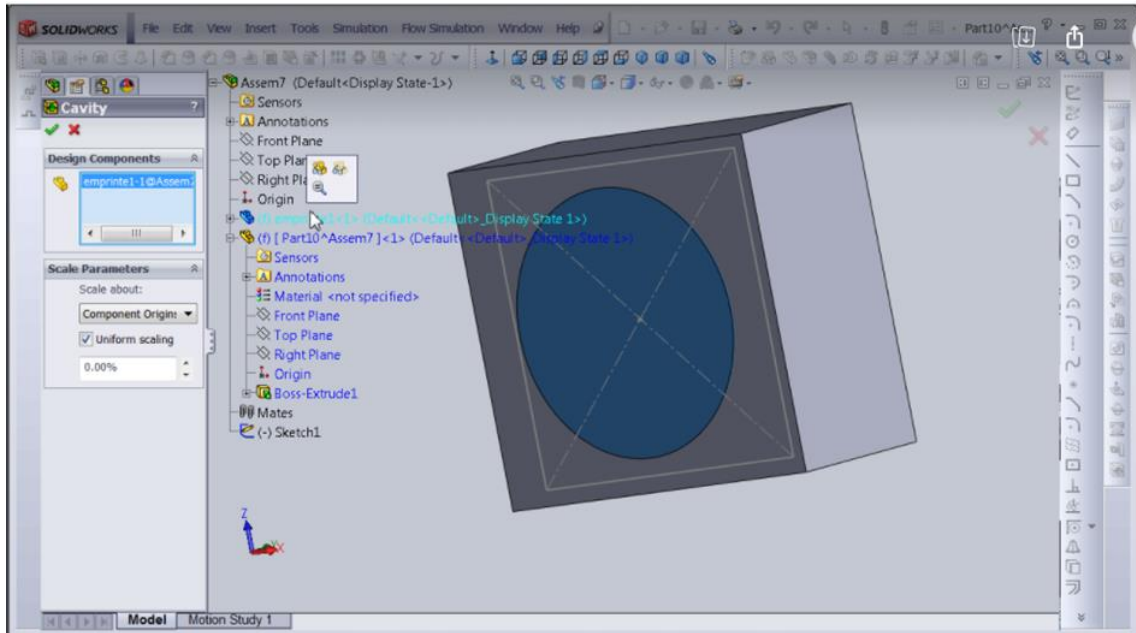


Figure 6.4 : Application de la fonction « empreinte »

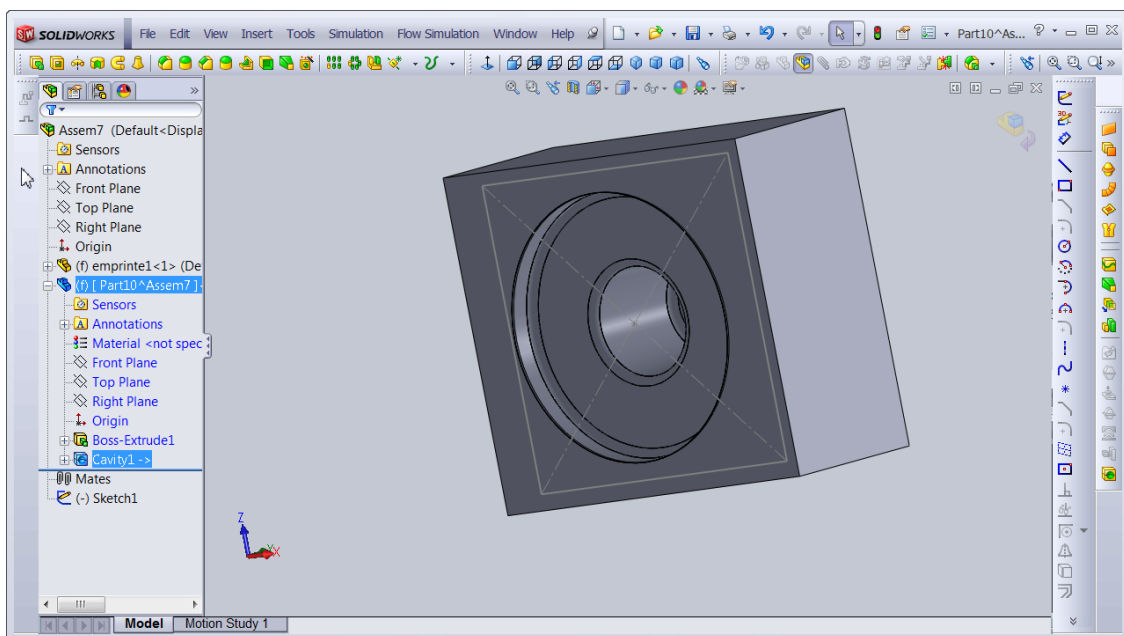


Figure 6.5 : Partie inférieure du moule

Création de la surface de joint :

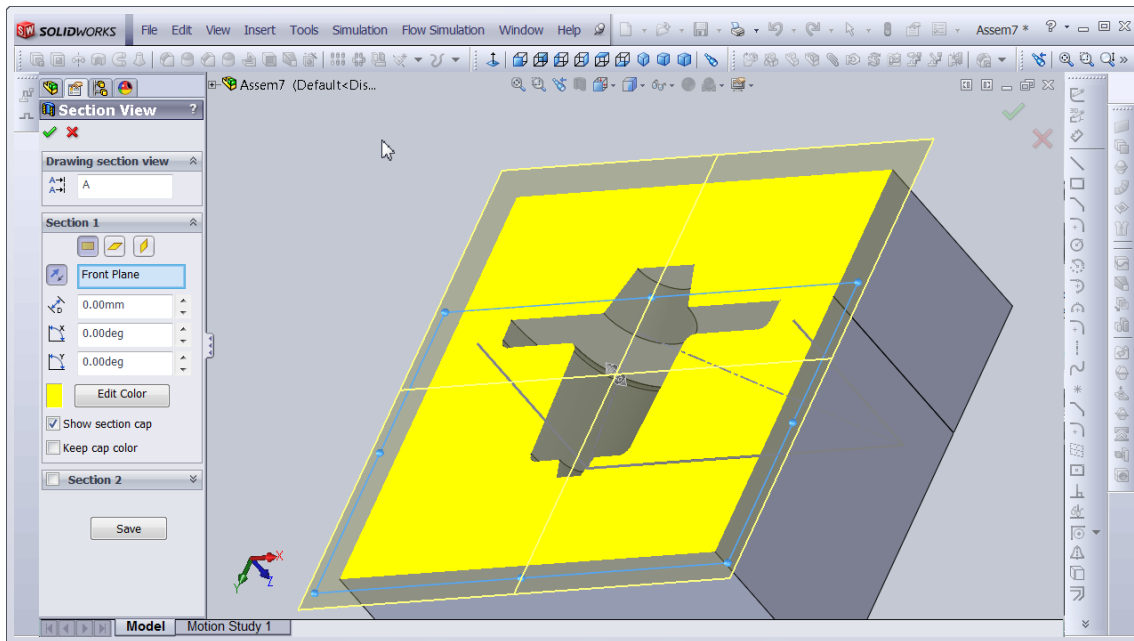


Figure 6.6 : Création de la surface de joint

Représentation de la caisse supérieure :

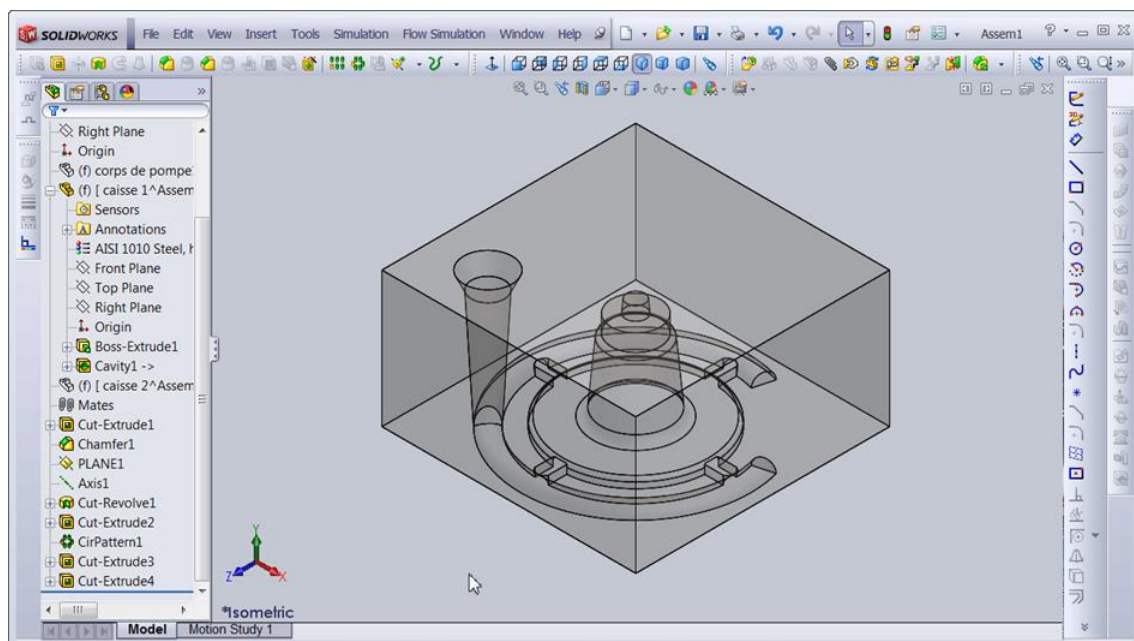


Figure 6.7 : Caisse supérieur

Représentation du moule :

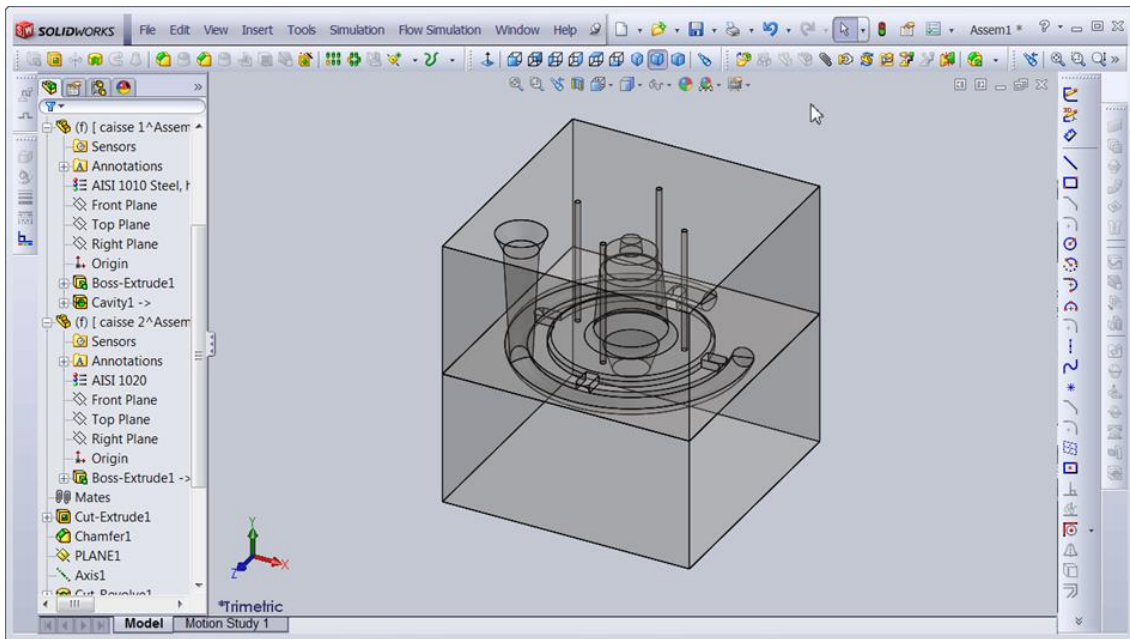


Figure 6.8 : Création de moule

6.2 Simulations et résultats

Quel que soit le procédé employé, la simulation de la coulée permet de vérifier l'adéquation entre la pièce souhaitée et les moyens utilisés. La figure suivante représente le moule complet avec les différentes couleurs représentant les températures.

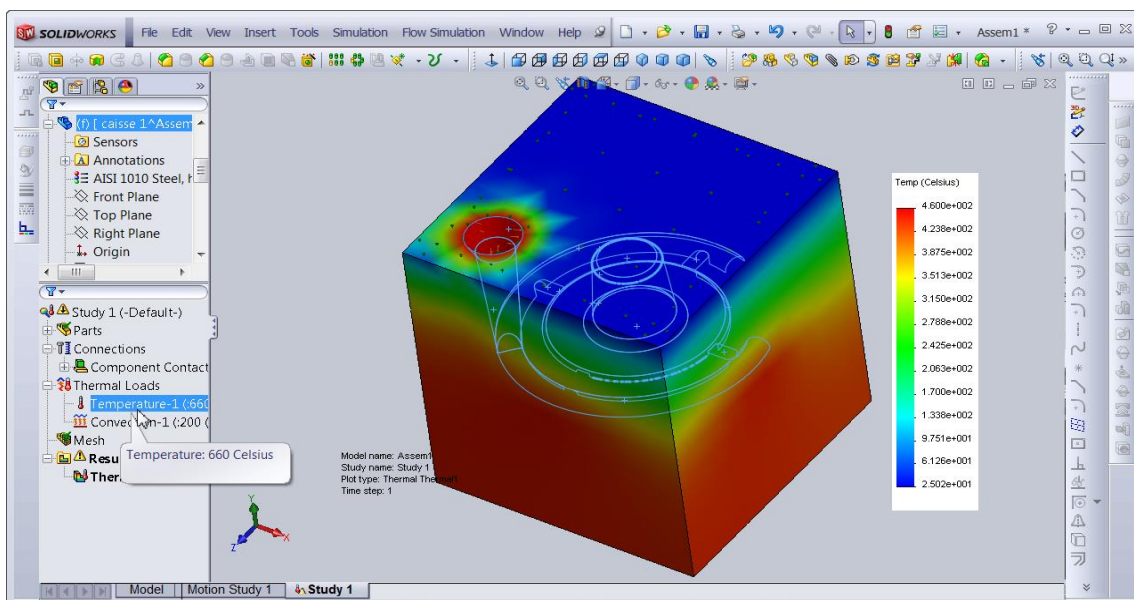


Figure 6.9 : Distribution de la température à l'intérieur du moule

6.2.1 Distribution de la température sur la face de coulée du moule

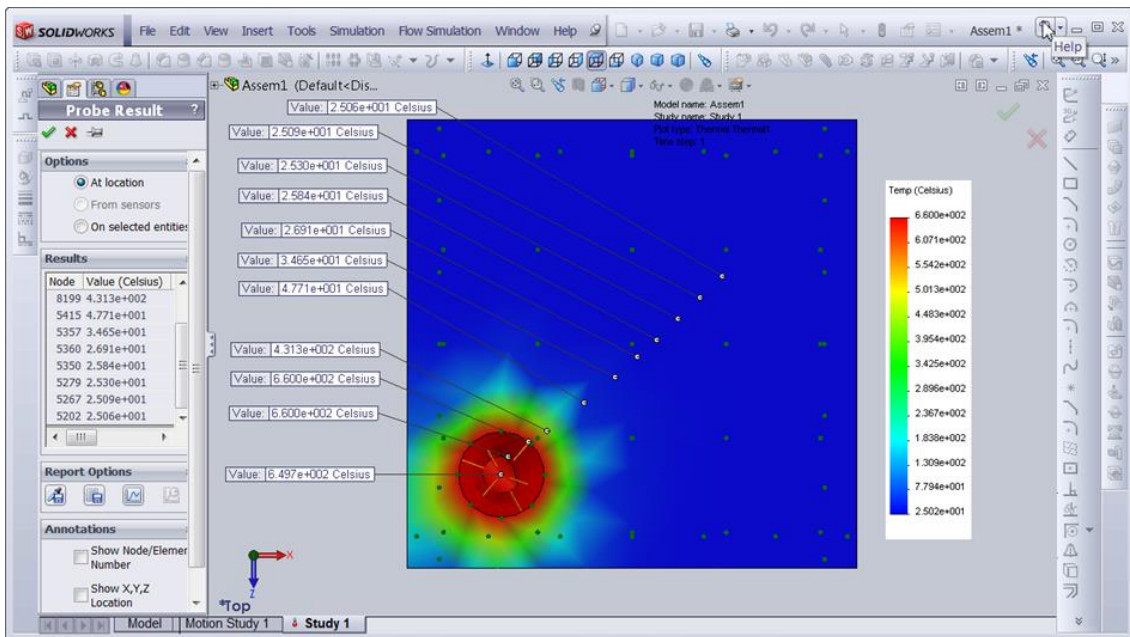


Figure 6.10 : Distribution de la température sur la face de coulée du moule

La figure 6.10 représente la distribution de la température sur la surface de coulée du moule, on voit que la température diminue de $6.497 \times 10^2 \text{ }^\circ\text{C}$ au niveau de bassin de coulée jusqu'à $2.506 \times 10^1 \text{ }^\circ\text{C}$ au niveau du sable.

- **Courbe de température**

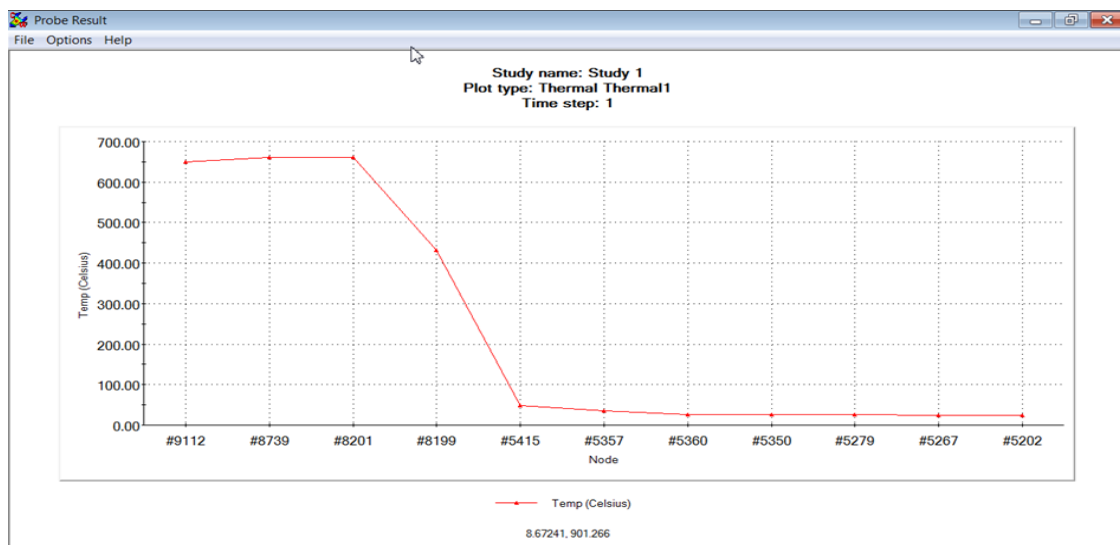


Figure 6.11 : Courbe de température sur la face de coulée du moule

Figure 6.11 représente la courbe de la variation de la température sur la face de coulée. On voit que la température diminue lorsqu'on s'éloigne du trou de coulée.

6.2.2 Distribution de la température sur la face latérale du moule

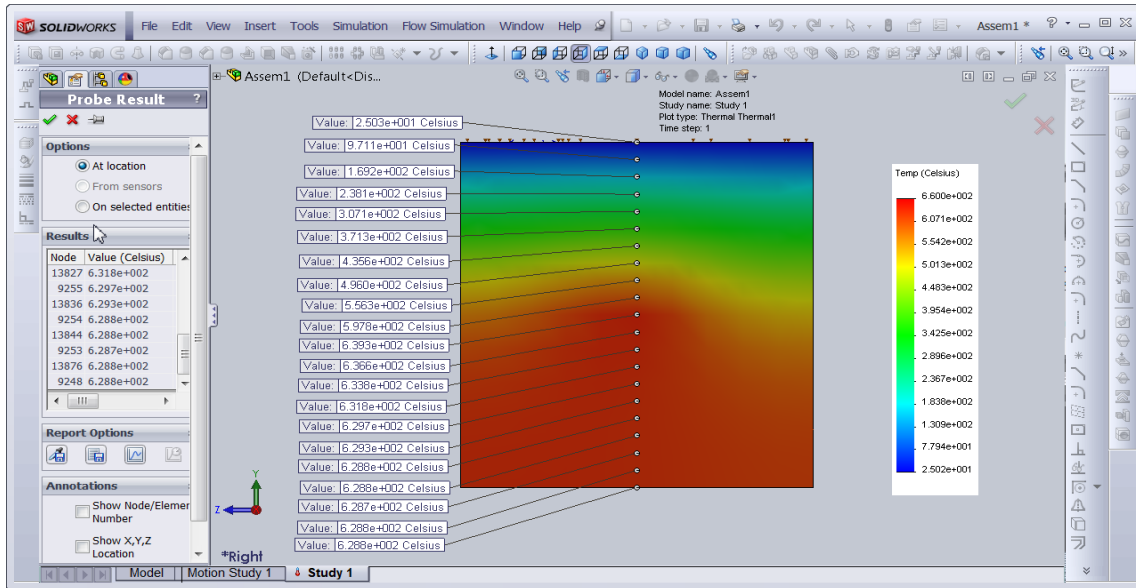


Figure 6.12 : Distribution de la température sur la face latérale du moule

La figure 6.12 représente la distribution de la température sur la face latérale. On voit que la température au niveau châssis inférieur est 6.288×10^2 °C et elle diminue progressivement jusqu'à 2.506×10 °C au niveau de la partie supérieur du moule.

- Courbe de température

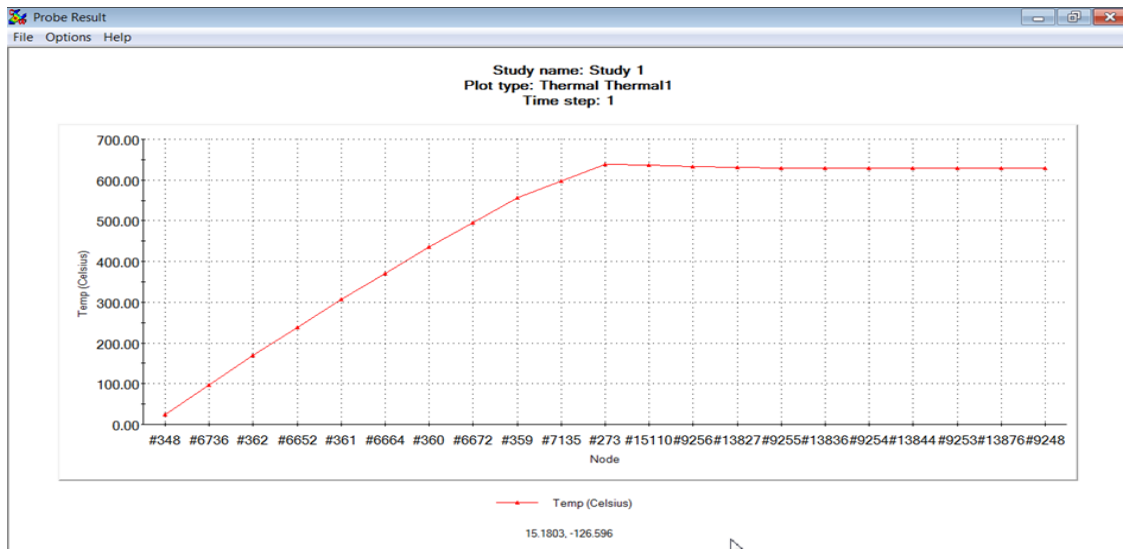


Figure 6.13 : Courbe de température sur la face latérale du moule

Figure 6.13 représente la courbe de la variation de la température sur la face latérale du moule. On voit que la température augmente jusqu'à elle arrive à la température maximale au niveau du châssis inférieur.

6.2.3 Distribution de la température sur la face de coulée et latérale du moule

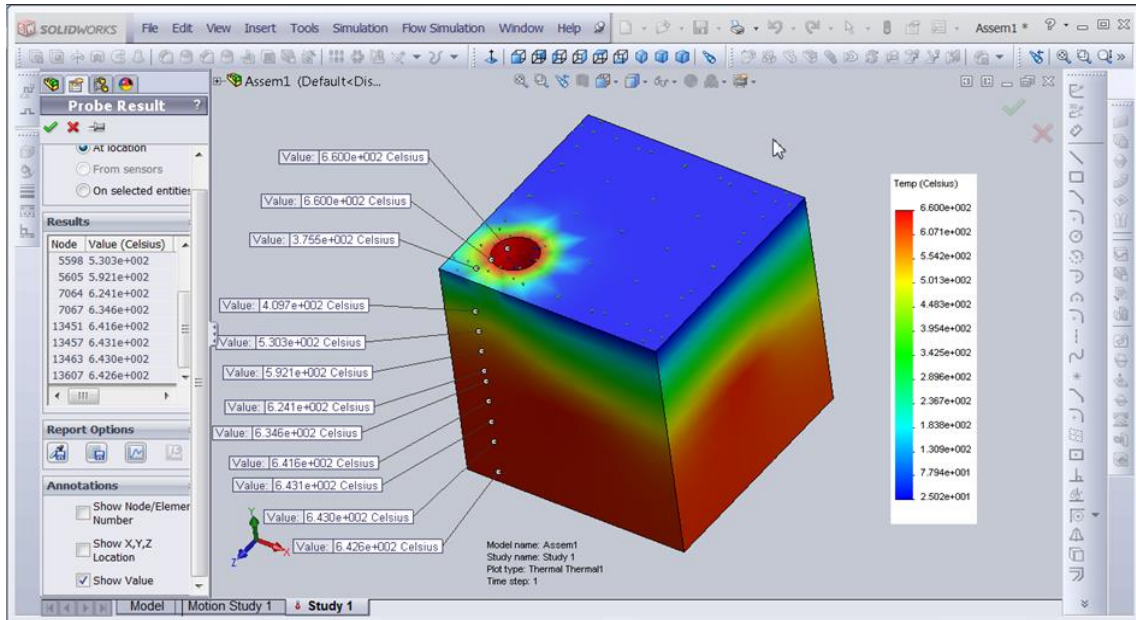


Figure 6.14 : Distribution de la température sur la face de coulée et latérale du moule

La figure 6.14 représente la distribution de la température sur la surface de moule, on voit que la température diminue du $6.497 \times 10^2 \text{ }^\circ\text{C}$ au niveau de bassin de coulée jusqu'à $2.506 \times 10 \text{ }^\circ\text{C}$ au niveau du châssis inférieur.

- Courbe de température :

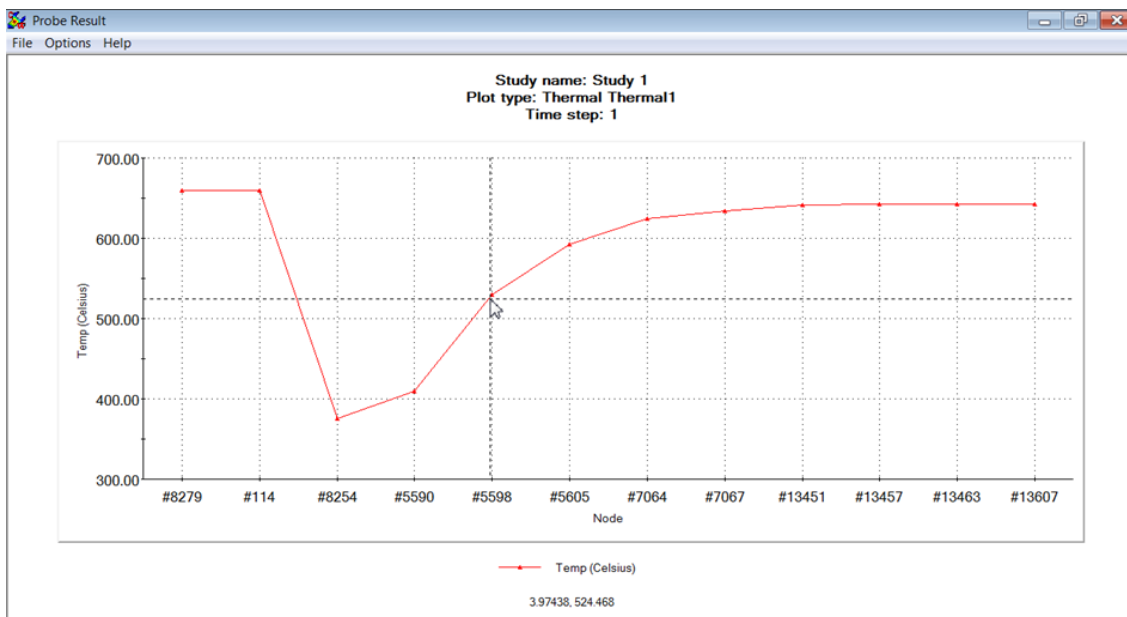


Figure 6.15 : Courbe de température sur le moule

Figure 6.15 représente la variation de la température sur le moule. On voit que la température reste stable au début puis elle diminue au contact avec le sable pendant quelque temps et puis elle augmente jusqu'à ce qu'elle soit stable.

6.3 Animation de solidification

La figure suivante montre une animation des étapes de coulée et de solidification simulées par le module « QuikCAST » de logiciel SolidWorks.

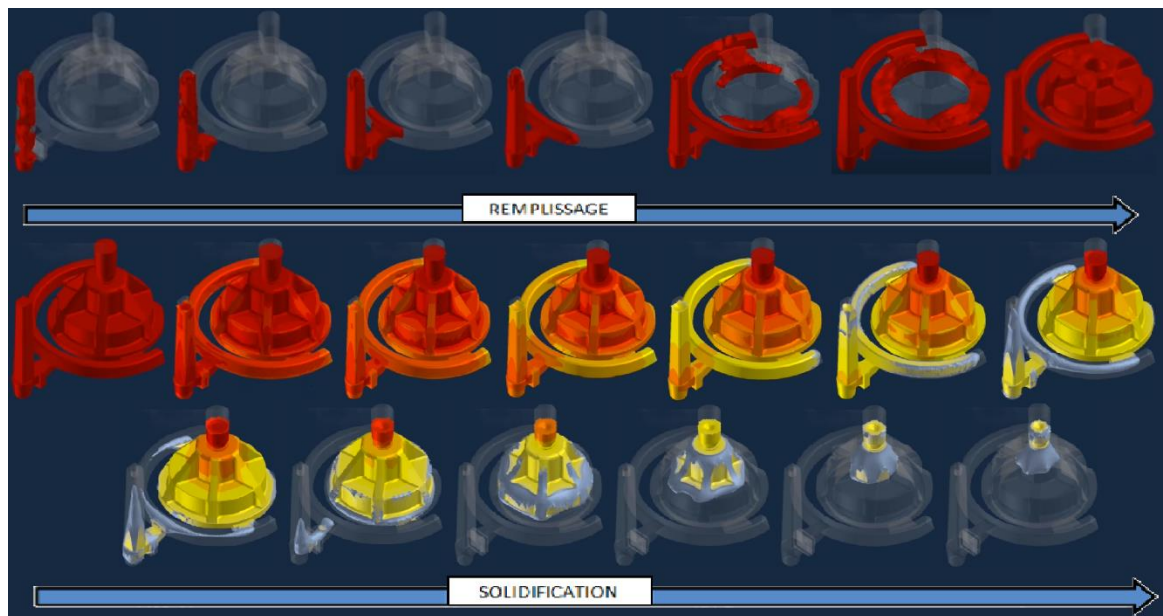


Figure 6.16 : Etapes de remplissage et solidification de la pièce

La couleur rouge représente l'aluminium à l'état liquide. Le changement de couleur montre les différentes étapes de solidification. Le refroidissement de la masselotte est en dernier lieu. Les résultats de la simulation nous permettent d'avancer dans la production du moule et des outillages. Dans le cas d'une simulation douteuse, on doit refaire les calculs, revoir l'emplacement des canaux d'alimentation, les masselottes et les événements pour éviter la porosité à l'intérieur de la pièce.

Conclusion

Les nouvelles technologies nous permettent avant de lancer la production des pièces par moulage, de faire des simulations et ceci pour réduire les pertes matérielles.

Conclusions
et perspectives

Conclusions et perspectives

La conception et la fabrication de pièces mécaniques est une activité qui pose de sérieux problèmes aux entreprises liées, car elles doivent concevoir et traiter des produits le plus rapidement possible à des coûts de plus en plus bas. En effet, la compression du temps de conception et la variété des pièces mécaniques conçues augmentent la possibilité de solutions de conception non usinable ou difficiles à usiner. Pour être compétitives, ces entreprises doivent intégrer des restrictions de traitement dans leurs conceptions. Les outils et méthodes actuels prennent en compte les contraintes d'usinage, mais seulement à la fin du processus de conception. Notre recherche s'inscrit dans ce contexte. Ceux-ci aident à fabriquer des pièces en coulant à moindre coût et sans erreurs dans les plus brefs délais.

Pour le moulage, il nous a permis de voir les différentes étapes pour l'élaboration d'un moule et de faire les calculs des différentes parties du moule ainsi que la durée du refroidissement du métal. La simulation de la solidification nous permet de vérifier l'adéquation entre la pièce souhaitée et les moyens utilisés.

En perspective, nous souhaitons une étude expérimentale pour la réalisation du moule et de vérifier les résultats de la simulation et du temps de solidification.

Références

bibliographiques

Références bibliographiques

Hanane Hadjari « Contribution à l'étude de refroidissement des pièces de fonderie- Etude expérimentale » université de Tlemcen (2018-2019)

Ioannis Liapis Spiraggelos Likoudis « Bonne route avec les granulats de laitiers EAF » Article April 2011

« Tout sur la Fabrication du Fer et de l'acier » Article juillet 2017

Dr.S.BENSAADA « F O N D E R I E E T S O U D A G E » université Biskra

My Little Blog Fonderie « Moulage en sable à plan de joint vertical » Article 14 juin 2017

GARA Souhir « Procédés de mise en forme par moulage » cours moulage 2017

Rio Tinto Fer & Titane inc. « FONTE GS Les principes essentiels de la conception du système de coulée et masselottage » 2002

Références webographies

https://fr.vikidia.org/wiki/Sid%C3%A9rurgie#La_production_de_la_fonte

[https://fr.vikidia.org/wiki/Fonte_\(m%C3%A9tallurgie\)#:~:text=La%20fonte%20est%20un%20m%C3%A9tal,une%20op%C3%A9ration%20de%20fusion%20r%C3%A9ductrice](https://fr.vikidia.org/wiki/Fonte_(m%C3%A9tallurgie)#:~:text=La%20fonte%20est%20un%20m%C3%A9tal,une%20op%C3%A9ration%20de%20fusion%20r%C3%A9ductrice)

https://www.researchgate.net/figure/Schema-delaboration-de-lacier-suivant-la-filiere-fonte_fig1_272484561

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonte_\(m%C3%A9tallurgie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonte_(m%C3%A9tallurgie))

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Haut_fourneau#:~:text=En%20g%C3%A9n%C3%A9ral%20%20le%20haut%20fourneau,%C3%AAtre%20affin%C3%A9%20dans%20des%20aci%C3%A9s

<https://slideplayer.fr/slide/1140303/>

<https://www.loiselet.com/fr/activites-industrielles/processus-de-fonderie>

<https://www.legarrec.com/entreprise/transfert-thermique-definition/>