REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Ingénierie des matériaux et des surfaces

Thème

Conception d'une coquille pour la coulée d'une pièce en aluminium

---

Présenté par :

GHEZZALI Slimane

ZIRARI Soufiane

Dirigé par :

Mr : HABIRECHE Mohamed

Mr : EL HADJ Abdellah

Promotion Juin 2020

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire M.HBIRECH MOHAMED pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de DR.YAHIA FARES DE MÉDÉA et les intervenants professionnels responsables de ma formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Je voudrais exprimer ma gratitude à M. Abdullah Al-Hajj pour son aide dans la préparation de cette thèse

Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements

Dédicace

A mes parents pour tout l'amour qu'ils m'ont donné.

A mes frères et mes sœurs pour leur soutien.

A tous ceux qui m'ont chaleureusement encouragée à finir ce mémoire du master.

Je dédie ce travail.

Résumé :

L’objectif est de réaliser un outillage permanent plus apte a la coulée des nombreuses pièces en aluminium, pour cette objectif différent étapes pourront être réalisées

Dessin du brut fonderie pour une coquille par logiciel solid works

Étude de moulage (dimensionnement de système de remplissage)

Simulation des phases de remplissage et de solidification pour identifier les éventuels problèmes de conception.

Fabrication des outillages (moule métallique)

Table des matières

Liste de figures

Liste de tableau

Introduction : 1

I- Les alliages d'aluminium 3

I.1- Généralités sur l'aluminium [5] 3

I.1.1- Historique : 3

I.1.2- Fabrication d'aluminium : 3

I.1.2.1- Production d'alumine : 3

I.1.2.2- Production de l'aluminium : 3

I.1.3- Principaux caractéristiques d'aluminium : 4

I.1.3.1- Propriétés d'aluminium : 4

I.2- Fonderie d'aluminium 4

I.2.1- Théorie des alliages d'aluminium de fonderie : 5

I.2.1.1- Alliages Al-Si : 6

I.2.1.2- Alliages Al-Mg : 7

I.2.1.3- Alliages Al-Cu : 8

I.2.1.4- Alliages Al-Si-Cu : 9

I.2.2- Classification des alliages d'aluminium de fonderie : 9

I.2.3- Influence des éléments d'addition : 9

I.2.3.1- Fer : 10

I.2.3.2- Magnésium : 11

I.2.3.3- Cuivre : 11

I.2.3.4- Silicium : 11

I.2.3.5- Titane : 11

I.3- Alliages aluminium-silicium : 14

I.3.1- Structure des alliages aluminium-silicium : 14

I.3.2- Affinage des grains : 15

I.3.2.1- Modification de la structure eutectique des alliages aluminium-silicium : 15

II- Procédé de moulage 17

II.1- Définition 17

II.2- Types de moulage 17

II.2.1- Moulage en moule non permanent 18
II.2.1.1- Moulage en sable 18
II.2.1.1.1- Définition : 18
II.2.1.1.2- Les étapes Principales du procédée du moulage en sable 19
II.2.1.2- Moulage en cire perdue 20
II.2.1.2.1- Définition 20
II.2.1.2.2- Principe de moulage à la cire perdue 21
II.2.2- Moulages en moules permanents 22
II.2.2.1- Moulage en coulée continue 23
II.2.2.1.1- Définition 23
II.2.2.1.2- Caractéristiques du procédé [1] 24
II.2.2.2- Moulage basse pression 24
II.2.2.2.1- Définition 24
II.2.2.2.2- Les Caractéristiques du procédé 24
II.2.2.3- Moulage en coquille par gravité 25
II.2.2.3.1- Définition 25
II.2.2.3.2- Le procédé de moulage en coquille : [12] 25
II.2.2.3.3- Le principe du procédé 26
II.2.2.3.4- Technologie de la coquille : [13] 28
II.2.2.3.4.1- Le système de remplissage : 28
II.2.2.3.4.1.1- Type de remplissage 28
II.2.2.3.4.2- Le système d'alimentation : 28
II.2.2.3.4.3- Les évents : 29
II.2.2.3.4.4- Les portées : 29
II.2.2.3.4.5- Mise en position des chapes : 29
II.2.2.3.4.6- Le poteyage : [14] 31
II.2.2.3.4.6.1- Rôle de protection : 31
II.2.2.3.4.6.2- Ajustement du refroidissement : 31
II.2.2.3.4.6.3- Amélioration de l'état de surface : 32

II.2.2.3.4.6.4- Rôle d'agent démoulant : 32
II.2.2.3.4.6.5- Constitution du poteyage : 32
II.2.2.3.4.6.6- Application du poteyage : 33
II.2.2.3.5- Avantages et Inconvénients de procédée de moulage en coquille : 33
II.2.2.3.5.1- Avantage : 33
II.2.2.3.5.2- Inconvénients : 33
III- TECHNIQUE DE MOULAGE 35
III.1- SITUATION DE DEPART 35
Surépaisseurs d'usinage 37
III.2- Le Retrait 38
III.2.1- Définition : 38
III.2.2- Instruments d'exécution : 38
III.2.3- Solutions pour applications : 38
III.2.4- Défauts engendrés par le retrait : 39
III.2.4.1- Retassure : 39
III.2.4.1.1- Mécanisme de formation des retassures : 39
III.2.4.1.2- Comment éviter la retassure : 42
III.2.4.1.2.1- Refroidisseur : 42
III.2.4.1.2.1.1- Refroidisseur externe (de surface) : 42
III.2.4.1.2.1.2- Refroidisseur interne : 42
III.2.4.1.2.2- Masselotte : 43
III.2.5- La Dépouille 43
III.2.6- Surépaisseurs d'usinage 45
Quand prévoir une surépaisseur 45
III.2.7- Joint de moulage 47
III.2.8- plan de joint 47
III.2.9- Tirage d'air (moulage en coquille) 47
III.2.10- Stabilité des Noyaux Remoulés 47
III.2.10.1- LES PORTEES 47
IV- Simulation 50
IV.1- Logiciel SOLIDWORKS : 50
IV.1.1- Pièce choisis 50

IV.1.1.1- La forme de piéce générale 50
IV.1.1.2- Conception de la pièce sur solidworks 51
IV.1.1.2.1- piéce fini 54
IV.1.1.2.2- Conception Moule de la pièce 54
IV.1.1.2.3- Système de refroidissement 57
IV.1.1.2.4- Moule fermé 58
IV.1.1.2.5- Moule ouvert 58
IV.2- ANALYSE SUR PROCAST 59
IV.2.1- INTRODUCTION 59
IV.2.2- LES ÉTAPES DE L'UTILISATION DE PROCAST 60
- La géométrie : 60
- La mise en donnée : 60
- Exécution du solveur : 60
- Résultats : 60
IV.2.2.1- GÉOMÉTRIE 60
IV.2.2.2- LA MISE EN DONNÉE 61
IV.2.2.2.1- CHOIX DU PROCÉDÉ 61
IV.2.2.2.2- CHOIX DES MATÉRIAUX 61
IV.2.2.2.3- DÉFINITION DES CONDITIONS D'ENTRÉE DU MÉTAL 62
IV.2.2.2.4- Interface HTC manager 63
IV.2.2.2.5- Simulation paramètres 63
IV.2.2.2.6- DÉFINITION DES CONDITIONS INITIALES DES CALCULS 64
IV.2.2.2.7- vérification des données 64
REMARQUE 65
IV.2.3- Animation 65
IV.2.4- Résultat d'analyse 67
IV.2.4.1- Porosité 67
IV.2.4.2- Résultat d'analyse Pro-Cast pour différentes hauteurs de masslotte 68
IV.2.4.3- Résultat d'analyse Pro-Cast pour différentes hauteurs canal de d'alimentation 69
IV.3- Conclusion 70
V- Conclusion Générale : 71

Liste de références bibliographiques..... 72

Liste de figures

Figure 1: les lingots d'aluminium utilisé dans les fonderies [5] 3

Figure 2 : diagramme d'équilibre [Al-Si] [8] 6

Figure 3:influence du magnésium sur les propriétés mécaniques des alliages Al-CU [8]. 7

Figure 4:diagramme d'équilibre Al-Mg [8]. 7

Figure 5:diagramme d'équilibre Ai-Cu [8]. 8

Figure 6: influence de la teneur en fer sur les caractéristiques mécaniques de l'alliage AlSiMg0.6..... 10

Figure 7:solubilité du titane dans les alliages AlCu5MgTi, et AlSi7Mg en fonction de la température 12

Figure 8: schéma d'une dendrite 15

Figure 9: les types de moulage 17

Figure 10: principe du moulage en sable..... 19

Figure 11: principales étapes du procédé de moulage au sable, ... 20

Figure 12:principales étapes du procédé de moulage à la cire perdue,..... 22

Figure 13:schéma de machine de coulée continue horizontale..... 23

Figure 14:pièces moulées à basse pression..... 25

Figure 15:exemple de coquille..... 26

Figure 16:pièce en alliage d'aluminium (Al Si9 Cu3 Mg) moulée encoquille..... 26

Figure 17:*moulage par gravité en coquille (a) coulée, (b) pièce, images SECODIR Sarl* [11]..... 27

Figure 18: *exemple d'un outillage coquille pour fonderie aluminium, (a) modèle 3D, (b) outillage réalisé,*..... 30

Figure 19:*mécanisme de formation de retassure.* 40

Figure 20:*les différents types de retassures.* 41

Figure 21:*mécanisme de formation de retassure en moule fermé* 41

Figure 22:*refroidisseur externe* 42

Figure 23:*refroidisseur interne*..... 42

Figure 24:*masselotte*..... 43

Figure 25:*pièce brute* **Figure 26:***la dépouille* 44

Figure 27*:forme de piéce* 50

Figure 28: *extrude plane de piéce* 51

Figure 29: *enlév de matiére extrude de la piéce* 52

Figure 30: *Figuer assistance pour le parcage de piéce* 53

Figure 31*:patrie a + noyau* 54

Figure 32: partie B 55

Figure 33*:partie C* 55

Figure 34: *les broches* 56

Figure 35: *Système de refroidissement* 57

Figure 36: *Moule fermé* 58

Figure 37: *Moule ouvert* 58

Figure 38: *la pièce sous CATIA* 59

Figure 39: *Les attributs du procédé de fonderie* 60

Figure 40: *Type de moulage* 61

Figure 41: *Le jet de coulée* 62

Figure 42: *Volume d'entrée de forme parallélépipédique* 62

Figure 43: *Interface HTC manager* 63

Figure 44*: Simulation paramètres* 63

Figure 45: *Des conditions initiales des calculs* 64

Figure 46: *vérification des données* 64

Figure 47: *Message d'erreur* 65

Figure 48:*coulage* 65

Figure 49: *variation thermique* 66

Figure 50:*fraction solide* 66

Figure 51:*temps pour solidus* 67

Figure 52*:porosité de retrait* 67

Figure 53: *étapes du processus d'optimisation* 68

Figure 54: *hauteur de masslotte VS porosité de retait* 69

Figure 55: *Hauteurs canal de d'alimentation VS porosité de retrait*..... 69

Liste de tableau

Tableau 1 :*les principale caractéristiques mécaniques des alliages Al-Cu* 8

Tableau 2: *Classification d'alliages d'aluminium de fonderie* 9

Tableau 3:*principales causes de variation des concentrations de certains éléments* 13

Tableau 4:*valeurs de dépouille*..... 44

Introduction :

En moulage coquille, les enjeux principaux sont la complexification des géométries de noyaux internes, l'anticipation des contraintes thermomécaniques, des exigences croissantes sur la maitrise de la santé interne pièce et des caractéristiques associées Dans ce projet, on a opté a optimisé par simulation numérique la thermique du moule métallique (coquille pour la coulée des pièces en aluminium), et à valider le système de coulée et d'alimentation et ce par utilisation d'un logiciel de simulation connu sous le nom de PROCAST. Les travaux prévoient en particulier une recherche bibliographique sur les alliages d'aluminiums utilisés pour la coulée des pièces de fonderie par coquille, la fabrication d'une coquille par le logiciel SOLIDWORKS, et enfin l'optimisation d'un système de coulée et d'alimentation pour la coulée d'un corps en aluminium par simulation numérique, et ce pour éviter surtout les défauts internes tel que : les retassures.

l'objet de ce travail portera sur la maitrise de la qualité métallurgique et technologique des pièces obtenues par fonderie gravitaire par une étude de faisabilité lancée à partir des logiciels de dessin et de simulation, avant de passer à l'élaboration et la coulée des pièces de qualité inconnus.

Chapitre 1

I-Les alliages d'aluminium

I.1-Généralités sur l'aluminium [1]



Figure 1: les lingots d'aluminium utilisé dans les fonderies **[1]**

I.1.1-Historique :

La première apparition de l'aluminium était en 1854 lors d'une présentation à l'académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, sous la forme d'un lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique. En 1886 il y'a eu l'invention du procédé d'électrolyse l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA). Depuis, l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attrait au transport: aviation, automobile, marine .Il est aussi employée dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique...

I.1.2-Fabrication d'aluminium :

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, c'est le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium.

I.1.2.1-Production d'alumine :

La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. La bauxite contient de 40 à 60% d'oxyde d'aluminium hydraté mélangé à de la silice et à de l'oxyde de fer**.**

I.1.2.2-Production de l'aluminium :

L'aluminium est produit par électrolyse de l'alumine dans de la cryolithe *(Na3AlF6*) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone. L'aluminium se dépose au fond de la cuve avec un titre de 99,7% (les principales impuretés étant le fer et le silicium). Plusieurs procédés de raffinage permettent d'obtenir un titre plus élevé sachant que pour fabriquer une tonne d'aluminium, il faut deux tonnes d'alumine et quatre tonnes de bauxite.

I.1.3-Principaux caractéristiques d'aluminium :

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2% environ de celle des aciers Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières

I.1.3.1-Propriétés d'aluminium :

Avec 25 million de tonnes de consommation mondiale annuelle l'aluminium occupe la première place de la métallurgie des métaux non ferreux. La production d'aluminium primaire connaît une croissance régulière depuis 1950.Le développement des applications de l'aluminium et ses alliages, la croissance régulière et soutenue de la consommation s'explique par plusieurs propriétés qui sont autant d'atouts décisifs dans le choix des utilisateurs.

Les intérêts technologiques attribués aux alliages d'aluminium sont :

- La légèreté
- La conductivité thermique
- La conductivité électrique
- L'aptitude aux traitements de surface
- La tenue à la corrosion
- La diversité des demi-produits.
- La diversité des alliages d'aluminium
- La fonctionnalité des demi-produits filés et moulés
- La facilité de mise en œuvre
- Le recyclage

I.2-Fonderie d'aluminium

L'utilisation de l'aluminium pour la fabrication de fonderie est plus ancienne que son emploi comme matière première ; car, tout au début de l'obtention électrochimique de l'aluminium (1888), on ne savait pas comment s'y prendre pour le transformer ce métal, relativement mou et facile à usiner. Pour commencer, on a fabriqué des bronzes d'aluminium qui contenaient au plus 10% d'aluminium mais qui présentaient de l'intérêt à cause de leur bonne résistance mécanique, de leur stabilité chimique et leur résistance à l'usure et à l'oxydation. Mais l'avantage présente par la faible densité de l'aluminium ne pouvait pas être mis à profit dans les bonzes. L'aluminium à une densité de 2.7, plus léger que le fer de 2 fois et0 plus de 3 fois que plus léger que le laiton et le cuivre.

C'est uniquement grâce à la fabrication d'alliage, dont l'aluminium est le constituant principal qu'on est arrivé à créer une matière appropriée pour la confection des moulages. Les alliages d'aluminium sont à peine plus lourds que l'aluminium lui-même, parfois même ils sont légers et, d'autre part, ils atteignent des résistances mécaniques qui leur permettent de concurrencer certains matériaux **[2]**.

I.2.1-Théorie des alliages d'aluminium de fonderie :

Fabriqué industriellement depuis 1886 à partir des bauxites et de la cryolithe, ces métaux sont les plus utilisé juste après les fontes et les aciers. L'aluminium, depuis son développement industriel au début du 20^{éme} siècle n'a pas cessé d'envahir notre vie quotidienne. Son utilisation est souvent liée à une de ses principales qualités.

L'aluminium s'allie à presque tous les matériaux, mais pour la fonderie d'alliages ayant l'aluminium comme constituant principal, on ne peut envisager que des quantités d'additions qui donneront des alliages d'aluminium ayant une densité de 3,65 au maximum, car un alliage d'aluminium ne serait plus considéré comme un métal léger. Tous les matériaux d'addition sont plus lourds que l'aluminium, sauf le silicium et le magnésium ; les quantités ajoutées sont donc déjà limitées par la considération du poids spécifique.

En fondant ensemble de l'aluminium et un ou plusieurs autres métaux, on obtient des alliages qui possèdent des propriétés nouvelles, améliorées, différentes de celles de l'aluminium. On peut mentionner a cet égard les propriétés suivantes : coulabilité ; résistance mécanique ; stabilité chimique ; usinage ; dilatation thermique ; conductibilité thermique ; résistance à a la chaleur **[2]**.

Les alliages d'aluminium de fonderie (série à trois chiffres) sont les plus versatiles de tous les alliages de fonderie et ils offrent de façon générale une facilité de mise en forme, contrairement aux alliages de corroyage (série à quatre chiffres). Les alliages d'aluminium, comme tous les autres matériaux de fonderie, ont les caractéristiques suivantes :

- Une bonne fluidité pour bien remplir toutes les parties du moule.
- Un point de fusion relativement bas.
- Un transfert de chaleur rapide de l'aluminium liquide vers le moule, ce qui assure un cycle de mise en forme rapide.
- L'hydrogène qui est le seul gaz avec lequel l'aluminium et ses alliages sont solubles peut être contrôlé efficacement.

- Plusieurs alliages d'aluminium n'ont relativement pas de tendance au craquage à chaud.
- Une bonne stabilité chimique.
- Une finition de l'état de surface lustrées et peu ou pas de défauts **[3]**.

I.2.1.1-Alliages Al-Si :

Ces alliages portent le nom de silumines, lesquels s'apparentent quant à leur composition à un alliage eutectique, leur- coulabilité est très élevée et les moulages obtenus sont plus denses. Ils sont destinés à la coulée sous pression. Sur le diagramme d'équilibre AI- Si (Figure 2).On peut constater que la solidification commence par une cristallisation des cristaux mixtes riches en aluminium α et se termine par la cristallisation de l'eutectique α + β et éventuellement, avec d'autres phases formées par d'autres éléments [8]**.**

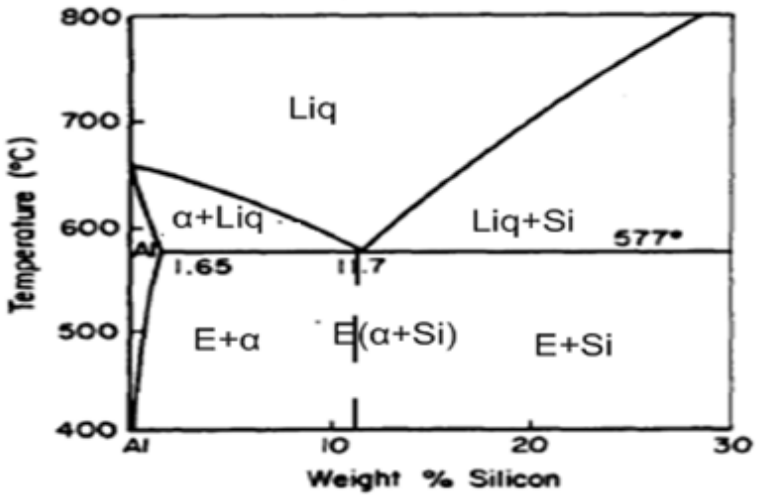


Figure 2 : diagramme d'équilibre [Al-Si] [4]

I.2.1.2-Alliages Al-Mg :

Les alliages Al-Mg possèdent de faibles propriétés de fonderie. Leur propriété caractéristique est la bonne tenue à la corrosion et leurs propriétés mécaniques sont accrues avec une usinabilité élevée. L'addition à l'alliage AI-Mg (9,5 à 11,5) % Mg et d'inoculant (Ti, Zr), améliorent les propriétés mécaniques, alors que le béryllium diminue l'oxydabilité de la fusion, ce qui permet de la conduire sans flux de protection. Le magnésium accroît fortement la résistance des alliages (**Figure 3**), jusqu'à 12 ou 14 %, avec le Mg, la plasticité change peu mais ensuite elle se dégrade brusquement **[4]**.

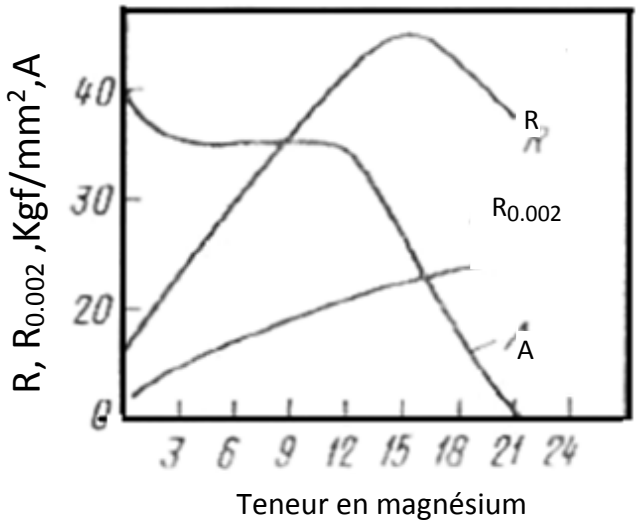


Figure 3:influence du magnésium sur les propriétés mécaniques des alliages Al-CU **[4]**.

L'addition aux alliages Al-Mg jusqu'à 1,5 % Si, améliore les propriétés de fonderie par suite la formation d'un eutectique triple. Ces alliages s'emploient dans la construction navale et l'aéronautique

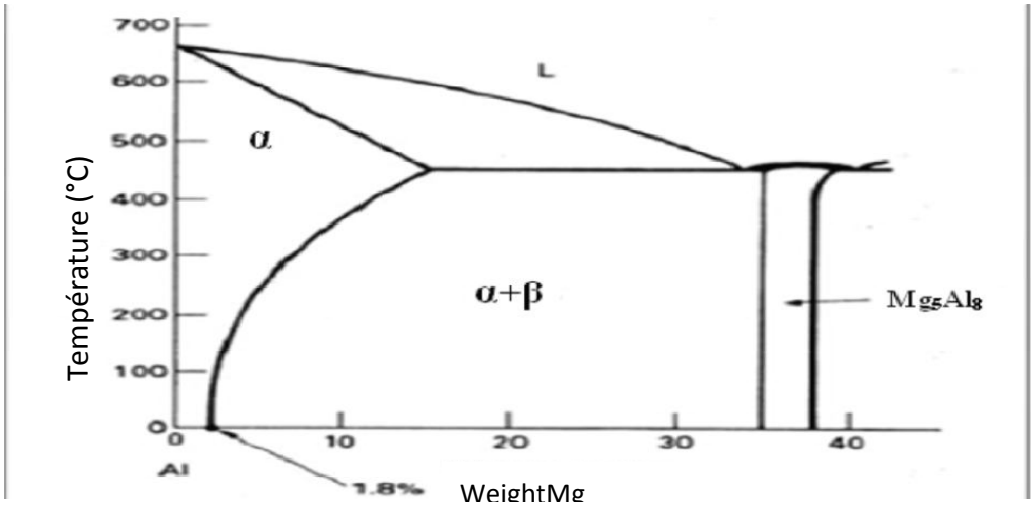


Figure 4:diagramme d'équilibre Al-Mg **[8]**.

I.2.1.3-Alliages Al-Cu :

Leur composition chimique et les principales caractéristiques mécaniques sont données dans le (**Tableau 1**).

Tableau 1 *: les principales caractéristiques mécaniques des alliages Al-Cu* **[8]**.

Mn (%)	Cu (%)	Autres et Ti (%)	R (Kp/mm²)	R 0,002 (Kp/mm²)	A (%)
0,6 à 1	4,5 à 5,3	0,25 à 0,45	24	16	7

Ces alliages possèdent, après traitement thermique, de hantes propriétés mécaniques a l'ambiante et aux températures élevées et se prêtent bien à l'usinage. Leurs propriétés de fonderie sont basses (grand retrait, aptitude à la fissuration à chaud). L'alliage s'emploie pour- la fabrication des moulages de petites pièces de fermes simples (armatures, supports) **[8].**

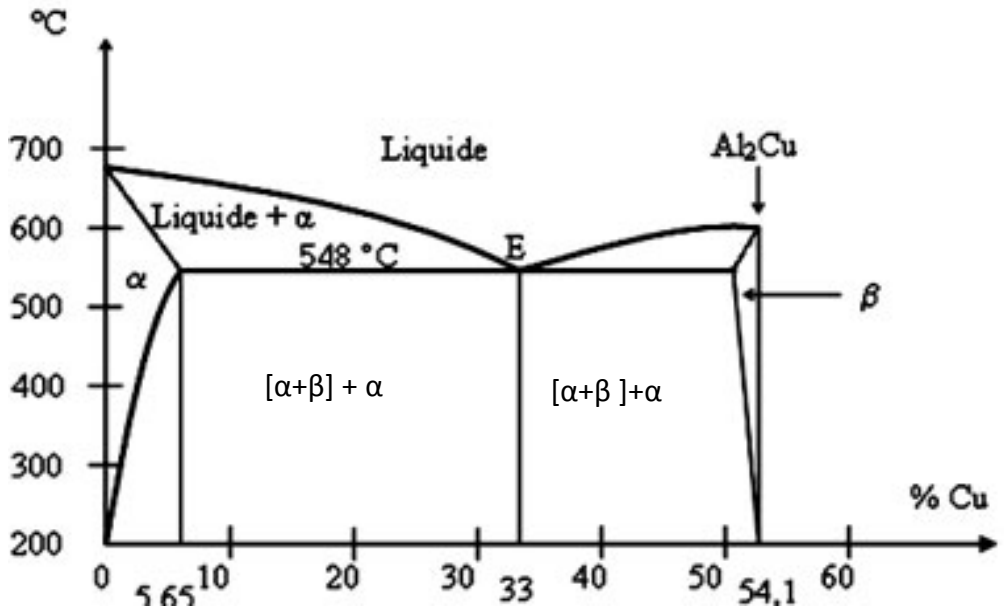


Figure 5:diagramme d'équilibre Ai-Cu **[8]**.

I.2.1.4-Alliages Al-Si-Cu :

Ce groupe d'alliages comprend les alliages avec une bonne coulabilité et de bonnes propriétés de résistance. La tenue à la corrosion est faible, cela est dû à la présence du cuivre. Les alliages avec

6 % Si, ≈ 3 % Cu, sont utilisés dans tous les domaines de construction des machines et des moteurs où ils existent uniquement des sollicitations moyennes. Les alliages avec une teneur de 12 % Si ne durcissent pas eux-mêmes et ils sont utilisés pour les pièces compliquées **[8].**

I.2.2-Classification des alliages d'aluminium de fonderie :

Ce système contient trois chiffres plus une décimale (par ex. 356.0). L'élément d'alliage principal. Les deuxième et troisième chiffres identifient l'alliage spécifique s'il s'agit d'une pièce moulée (.0) ou d'un lingot (.1 Ou .2) voir *le* **Tableau 2. [9]**

Tableau 2: *Classification d'alliages d'aluminium de fonderie* **[9].**

Séries d'alliages	Elements d'alliages principaux
1xx.x	99% d'aluminium minimum
2xx.x	Cuivre
3xx.x	Silicium
4xx.x	Silicium + cuivre et/ou magnésium
5xx.x	Magnésium
6xx.x	N'existe pas
7xx.x	Zinc
8xx.x	Etain
9xx.x	Autres éléments

I.2.3-Influence des éléments d'addition :

L'opération de fusion peut conduire à un enrichissement de certains éléments et une perte de certains autres. D'où la nécessité de contrôler la composition à l'issue de l'opération de fusion afin de pouvoir faire les corrections nécessaires.

I.2.3.1-Fer :

Cet élément est généralement nuisible car il forme avec l'aluminium et d'autres éléments des composés intermétalliques affectant les caractéristiques mécaniques. Ces composés existent même pour des teneurs en fer de l'ordre de 0,10 %. Ils se présentent sous forme de plaquettes (FeSiAl5) ou sous d'autres formes (Al-Fe-Mg-Si) dans les alliages Al Si Mg. Ce sont les charges de rupture et surtout les allongements qui sont diminués (**Figure 6**). La limite d'élasticité $Rp^{0,2}$ n'est pratiquement pas affectée. Les alliages Al-Cu-Mg, Al-Si-Mg hautes performances élaborés en première fusion ont des teneurs en fer en général 0,15 %. Certains dits « haute pureté » ont une teneur en fer 0,05 %. Une teneur en fer plus élevée, mais n'excédant pas 1 % peut avoir un effet bénéfique dans le cas des alliages [AlSi9Cu3] utilisés en coulée sous pression. Une teneur en fer de l'ordre de 0,7 à 0,8 % est souhaitée pour faciliter le démoulage des pièces. L'aluminium a tendance à dissoudre l'acier du moule et à provoquer un phénomène de collage. Augmenter la teneur en fer revient à « saturer » le métal liquide donc à diminuer son potentiel de dissolution du fer. Une teneur en fer élevée conduit à des « lits de fusion » plus économiques lors de la fabrication des alliages en affinage **[10].**

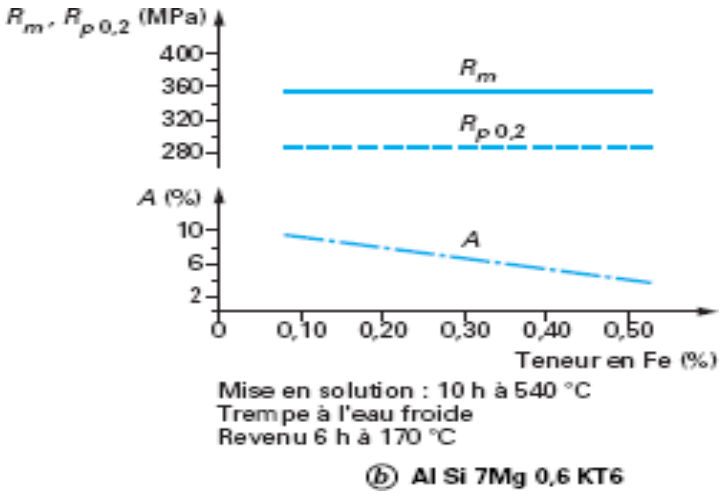


Figure 6: influence de la teneur en fer sur les caractéristiques mécaniques de l'alliage AlSiMg0.6 [10]

I.2.3.2-Magnésium :

Cet élément est très oxydable : sa teneur diminue et il se retrouve sous forme d'oxydes mixtes contenant de l'aluminium et du magnésium. On doit tenir compte de cette perte, à condition de l'avoir mesurée, lorsque l'on calcule la charge. Les pertes dépendent du type de four et des sels utilisés pour désoxyder les bains. L'addition de sels libérant du sodium provoque une diminution de la teneur en magnésium. Dans les alliages Al-Si-Mg, les pertes à la fusion sont en moyenne de 0,05 % et on maintien l'ordre de 0,02 % à l'heure. La diminution de la teneur en magnésium provoque une diminution de la limite d'élasticité et de la dureté si l'alliage est traité thermiquement. Pour parvenir à une faible dispersion des résultats mécaniques, il faut maintenir une teneur en magnésium dans une fourchette très étroite (exemple : 0,05 % dans le cas des AlSi7Mg 0,3 et 0,6) **[10].**

I.2.3.3-Cuivre :

Un excès de cuivre dans un alliage comme l'AlCu4TiMg peut provoquer la brûlure de trempe. En règle générale, les alliages commercialisés sous forme de lingots sont titrés avec une grande rigueur et les écarts, s'il en survient, proviennent de mélanges de jets en fonderie. Un excès de cuivre dans les alliages du type AlSi7Mg 0,3 ou 0,6 (dont la teneur maximale est 0,02 %) peut conduire à partir de 0,40 % à une brûlure de trempe car le cuivre diminue la température de fin de solidification. Par ailleurs, un tel excès de cuivre diminue la résistance à la corrosion de ces alliages **[10].**

I.2.3.4-Silicium :

Dans l'alliage AlCu4TiMg, si un enrichissement accidentel se produit, cela conduit au même résultat que dans le cas précédent (§ 4.1.1.3). La température de fin de solidification atteint, pour une teneur en silicium au-delà de 0,30 %, la valeur de 507^0C **[10].**

I.2.3.5-Titane :

Le titane en excès au-delà de la teneur de 0,15 % (composition péritectique) forme avec l'aluminium TiAl3 qui se présente soit en plaquettes, soit en cristaux compacts. Dans l'alliage [AlCu4TiMg], il peut former des points durs. Dans les alliages [AlSi7Mg] ou une quantité de titane est comprise entre 0,3 et 0,6, le titane en excès forme des cristaux de [Al-Si-Ti]. Le titane est avec le bore un élément essentiel des agents affinant du grain de solution solide α Al. L'alliage mère [AlTi5B1] contient des cristaux de TiAl3 et des amas de TiB2 qui servent de germes à la cristallisation. Un excès d'agent affinant peut conduire à une décantation de ces germes dans le fond des creusets et à un évanouissement rapide de l'affinage.

La solubilité du titane dépend de la température (**Figure 7**). Un ajout de titane, s'il s'avère nécessaire, doit être fait à température relativement élevée pour faciliter la dissolution de l'alliage mère utilisé **[10].**

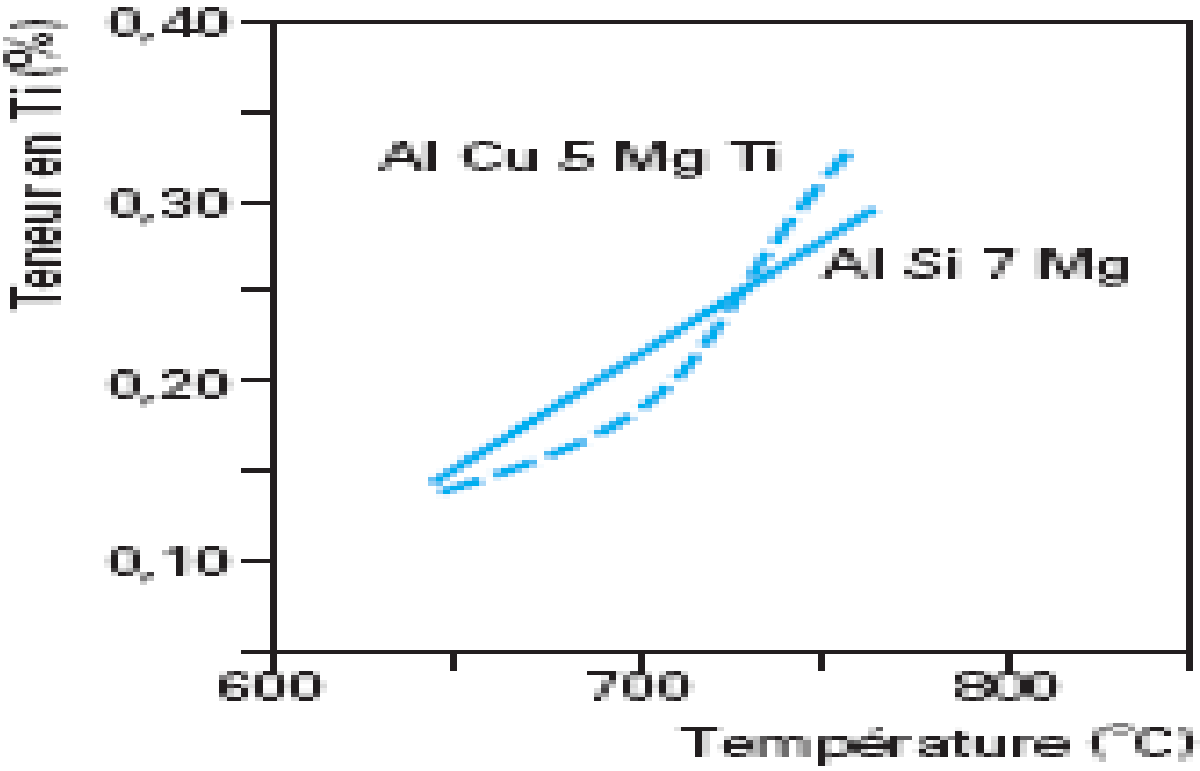


Figure 7:solubilité du titane dans les alliages AlCu5MgTi, et AlSi7Mg en fonction de la température[10]

Le **tableau 3** illustre les principales causes de variation de concentration de certains éléments.

***Tableau 3**:principales causes de variation des concentrations de certains éléments* [10]

Elément	Augmentation de la concentration Causes principals	diminution de la concentration Causes principals	Consequence
Fer (Fe)	-Utilisation des outils en acier non protégés -tubes acier basse pression mal protégés. -Refusions de pièces contenant des inserts acier ou fonte.		-Fragilisation de l'alliage
Magnesium (Mg)		-Température du métal trop élevée (≥800°C). -Execs de sodium. -Utilisation d'hexachloroéthane (C_2Cl_2)	-Diminution des caractéristiques mécanique après traitement thermique type T4- T5-T6-T7.
Phosphor (P)	-Contact du métal avec des filtres sous des pièces de four contenant des liants phosphatés.		-Détérioration de la structure de l'alliage. -Diminution des caractéristiques mécaniques.
Silicium (Si)	-Réduction de silice contenue dans les graissages de fours par l'aluminium. -Glaçure des creusets.		-non-respect des standards pour des alliages Al-Cu haute pureté. -Diminution des caractéristiques mécaniques

I.3-Alliages aluminium-silicium :

Le système aluminium-silicium forme un eutectique pour une teneur en silicium de 12,6 % en masse. Les systèmes eutectiques possèdent en général d'excellentes propriétés de fonderie, et l'eutectique [Al-Si] a été l'un des premiers alliages de fonderie à être utilisé industriellement. Le traitement dit de « modification » par le sodium, découvert par AladarPacz en 1920, a permis d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques de cet alliage par transformation de la structure naturellement aciculaire en structure fibreuse. Cela a contribué à l'essor des alliages de fonderie à cette époque **[11].**

I.3.1-Structure des alliages aluminium-silicium :

L'importance notable d'alliages Al-Si dans l'industrie a motivé plusieurs chercheurs à explorer la microstructure de ces alliages avec leurs propriétés. La microstructure d'alliages Al -Si dépend de la composition chimique, et la chaleur de traitement à appliquer. La microstructure d'Al-Si alliages est composée de deux phases, c.-à-d. α et β, sous forme d'eutectique [α+β] ou sous forme de [α+β] +α ou [α+β] +β**.**

Les cristaux solides d'aluminium se forment sur les parois du moule (Plus froides que le cœur) et croissent vers l'intérieur. Leur composition en Si est inferieure solidification du liquide à cet endroit par effet cryoscopique (dit surfusion). Ceci ralentit la solidification car plus de chaleur doit être évacuée pour solidifier le liquide de cette couche. Mais si un germe du cristal en croissance parvient à traverser cette couche de liquide en surfusion, il se retrouve dans un milieu non enrichi en silicium et peut se solidifier, ce qui est thermodynamiquement favorable. Cette protubérance est instable et croit rapidement.

Ce qui explique que les cristaux d'aluminium se développent non sous forme de sphères ou d'aiguilles mais sous forme d'arborescences appelées *dendrites* (**Figure 8**), dont les bras secondaires sont espacés de quelques dizaines de micromètres. Cette distance est appelée espacement des bras de dendrite, et le silicium peut être présent dans la forme d'aiguilles de l'aciculaire, ou une structure fibreuse raffinée .à celle du liquide qui les entoure car la solubilité de Si dans Al décroit avec la température. Donc, le silicium est rejeté à la surface des cristaux en cours de croissance et abaisse la température.

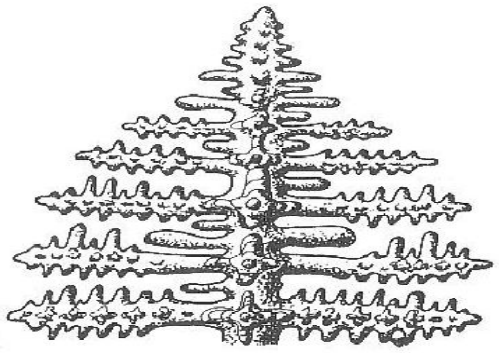


Figure 8: schéma d'une dendrite [11]

I.3.2- Affinage des grains :

Un grain fin conduit à l'amélioration de la qualité des pièces et à leur propriété d'utilisation. Ce traitement consiste à apporter dans le métal liquide des germes de cristallisation favorisant une germination hétérogène. Les éléments les plus efficaces pour l'aluminium et ses alliages sont le titane et le bore introduits soit sous forme d'alliages mère dont le plus utilisé est AlTi5B1, soit sous forme de sels contenant du fluoborate et du fluotitanate de potassium.

I.3.2.1- Modification de la structure eutectique des alliages aluminium-silicium :

Les alliages d'aluminium-silicium (Al-Si) ont connu de nombreuses applications dans l'industrie grâce à leur haute résistance mécanique, leur poids faible, leur bonne résistance à la corrosion et à leur excellente coulabilité. Un des traitements du métal liquide, appliqué sur ces alliages, est la modification par certains éléments comme le strontium (Sr) et le sodium (Na) **.**Elle s'applique à tous les alliages dont la teneur en silicium est comprise entre 4 et 13 %**.**

Son principal avantage est d'améliorer la ductilité (allongements) des alliages en changeant leurs morphologies eutectique aciculaire vers une forme fine et fibreuse. Les éléments chimiques « modificateurs » neutralisent les germes de phosphure d'aluminium et agissent sur la croissance des plaquettes de silicium en multipliant le nombre de branchements. Ce qui conduit à une croissance sous forme de fibres ayant l'allure du corail Les éléments les plus utilisés industriellement sont le sodium et le strontium, plus accessoirement le calcium**[10].**

CHAPITRE 2

II-Procédé de moulage

II.1-Définition

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 de 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. [3]

Les étapes du moulage semblent simples :

- Fondre le métal
- Le verser dans le moule
- Le laisser refroidir

II.2-Types de moulage

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

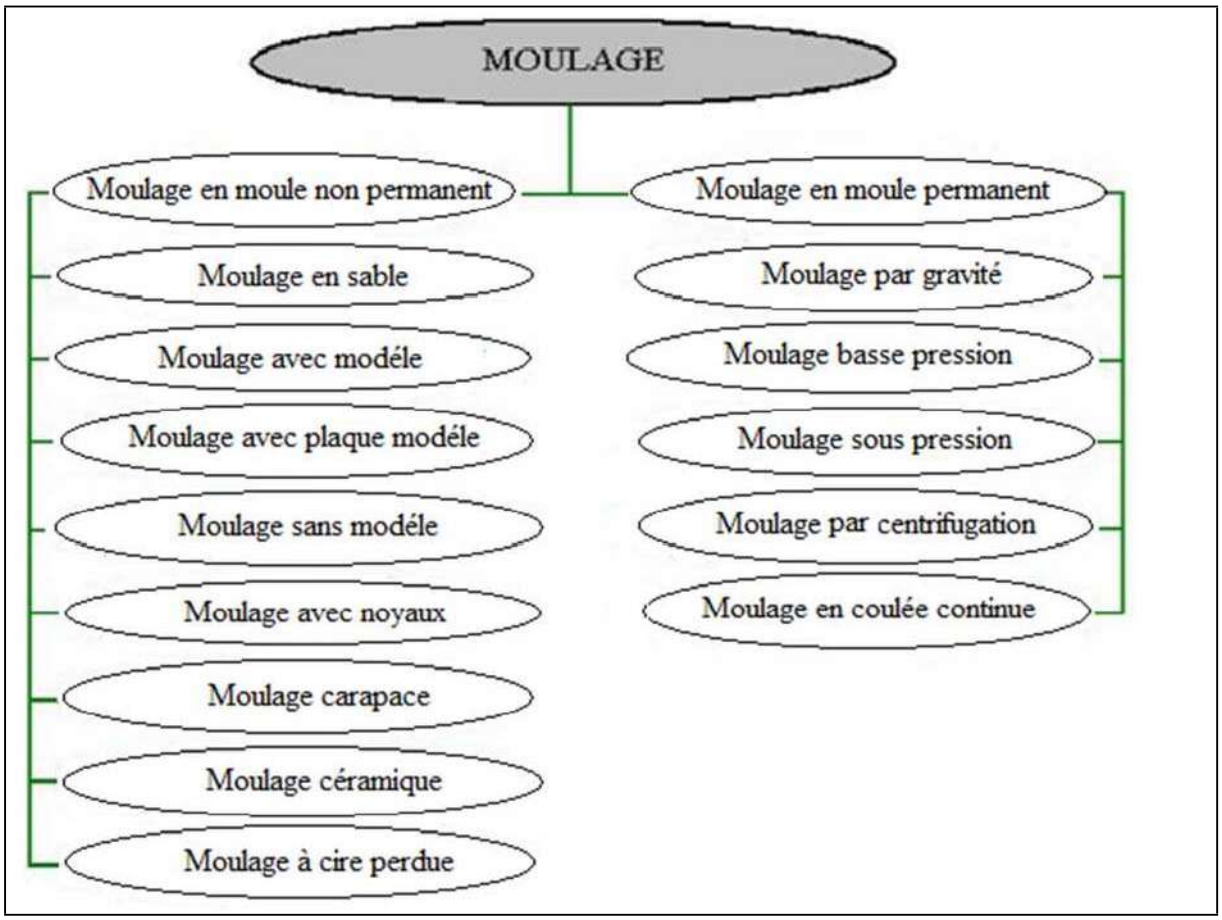


Figure 9: **les types de moulage**[3]

II.2.1-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 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. **[1]**

II.2.1.1-Moulage en sable

II.2.1.1.1-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. [1]

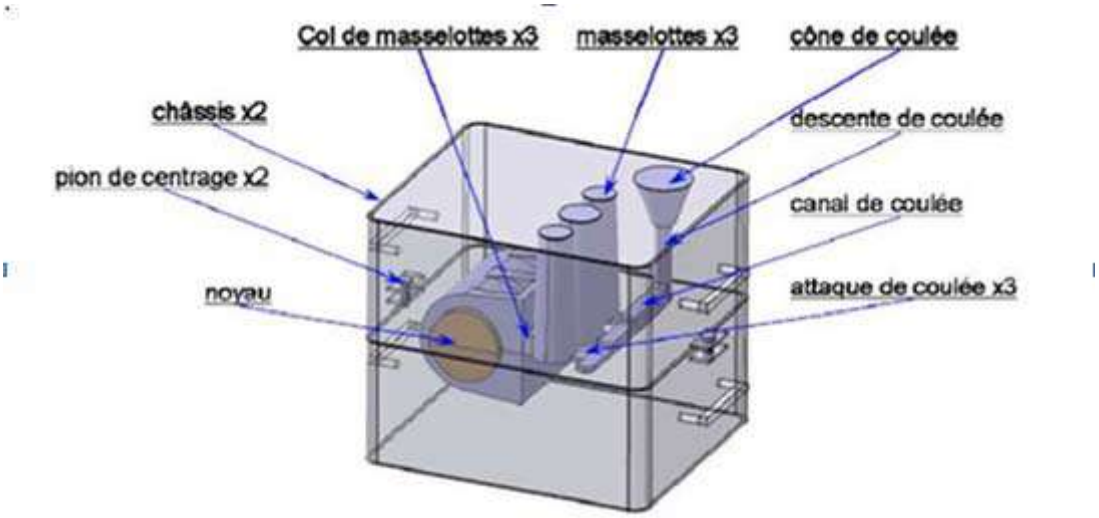


Figure 10: principe du moulage en sable **[1]**

II.2.1.1.2- Les étapes Principales du procédée du moulage en sable

Le moulage en sable (Figure. II.3) 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]

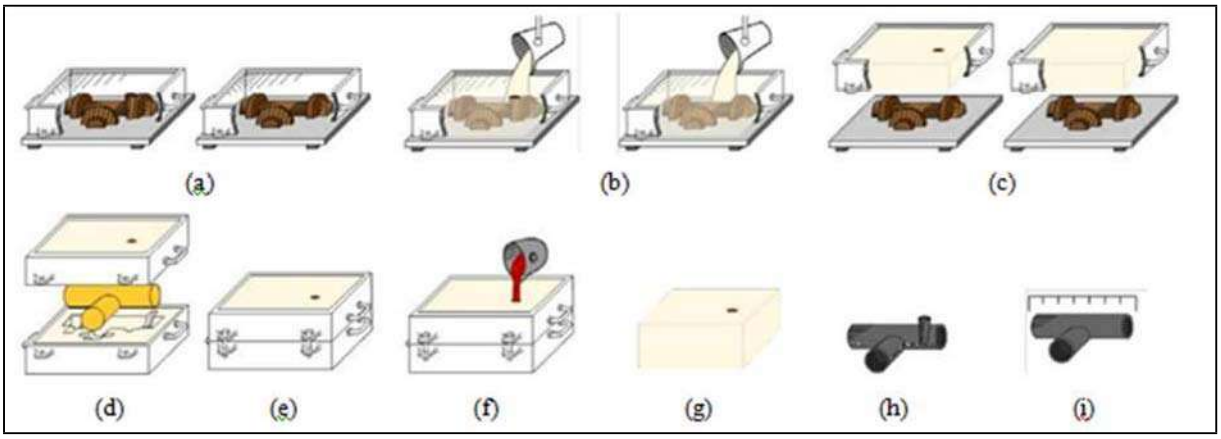


Figure 11: principales étapes du procédé de moulage au sable, (a): châssis métalliques,(b): remplissage de châssis,(c): séparation de modèle,(d): insertion de noyaux de sable,(e): mise en position des châssis : La réalisation de la coulée,(g): détruisant le sable du moule,(h): récupération de la grappe,(i): pièce. **[2]**

II.2.1.2-Moulage en cire perdue

II.2.1.2.1-Définition

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].**

II.2.1.2.2-Principe de moulage à la cire perdue

Le moulage à la cire perdue (Figure. II.4) est un procédé de fonderie utilisant un moule céramique destructible et une coulée par gravité. C'est le procédé le plus complexe dans sa mise en œuvre et celui qui est utilisé en général pour les séries de pièces plutôt de petite taille et/ou de formes très complexes. La variété des formes qu'il autorise en fait le procédé de prédilection des artistes. Son coût de revient est élevé mais est contrebalancé par le fait qu'il puisse donner des pièces, c'est-à-dire finies et ne nécessitant pas (ou peu) d'opérations d'usinages supplémentaires.

Le procédé se décompose comme suit : dans une matrice d'injection préalablement réalisée, on injecte de la cire liquide (a) qui, une fois solidifiée donnera le modèle de la future pièce. Plusieurs modèles sont en général coulés simultanément sur une grappe. On constitue donc au préalable la grappe en soudant les modèles en cire sur le dispositif de coulée (b). Les grappes sont d'abord trempées dans la barbotine, (liquide base de silice colloïdale, solution hydrolysée de silicate d'éthyle) (c) puis le sable réfractaire est pulvérisé sur les grappes encore humides (d). Après séchage, les opérations (c) et (d) sont recommencées plusieurs fois constituant une carapace céramique autour de la grappe. La cire des modèles est éliminée par fusion dans une étuve (e) Les carapaces sont cuites (f) dans un four à haute température (+ 1 000°C) afin de leur donner des caractéristiques mécaniques leur permettant de résister aux sollicitations lors de la coulée.

La carapace chaude est placée sous le creuset et le métal est coulé (g). Après refroidissement, la carapace en céramique est détruite par vibrations et grenaillage (h). Les pièces sont séparées des barreaux d'alimentation par tronçonnage (i). Les attaques de coulée sont supprimées par meulage (j). La qualité des surfaces de la pièce est généralement telle, qu'elle est directement utilisable.

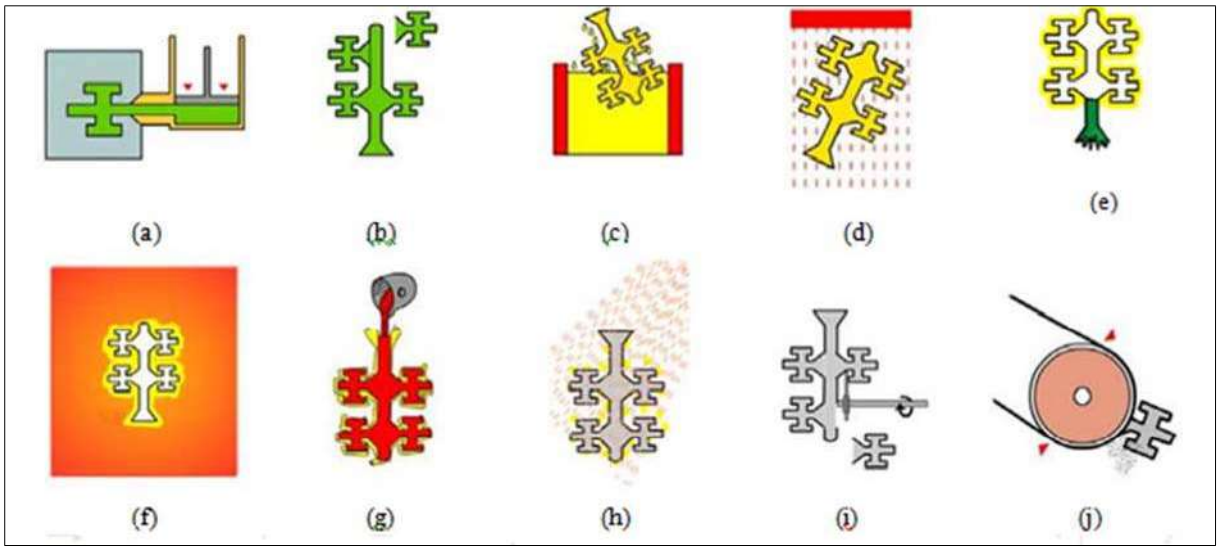


Figure 12:principales étapes du procédé de moulage à la cire perdue, (a) :injection de la cire liquide, (b) :soudé les modèles, (c) :les grappes trempée dans le sable, (d) : pulvérisé le sable réfractaire, (e) :fusion dans une étuve, (f) :les carapaces sont cuites, (g) :placement les carapaces sous le creuset , (h) :refroidissement et détruire les carapaces, (i) :séparation des pièces :supprimer les attaque de coulée. [2]

II.2.2-Moulages en moules permanents

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**. [3]**

II.2.2.1-Moulage en coulée continue

II.2.2.1.1-Définition

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 (**figure13). [1]**

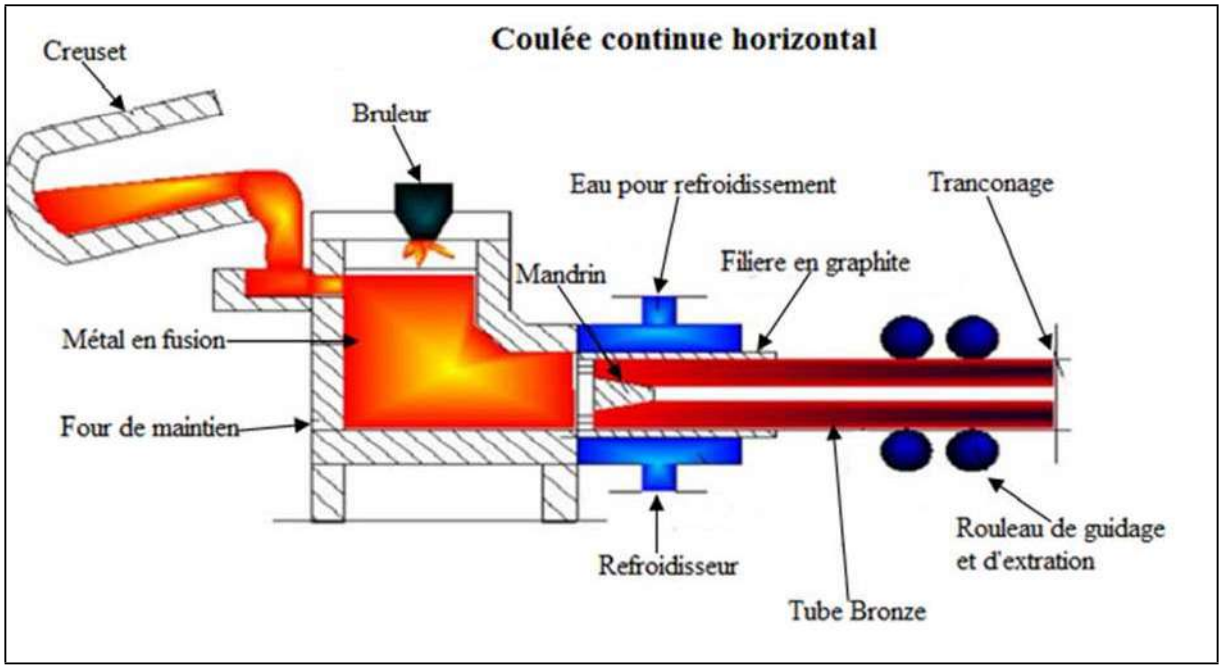


Figure 13:schéma de machine de coulée continue horizontale[1]

II.2.2.1.2-Caractéristiques du procédé [1]

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.

II.2.2.2- Moulage basse pression

II.2.2.2.1-Définition

Le moule est placé directement sur le four de coulé. L'alliage liquide contenu dans un creuset étanche en graphite est refoulé dans le moule par une pression d'air comprimé ou d'azote appliquée sur la surface du métal. Le métal monte dans le tube d'injection réfractaire et pénètre dans le moule par un trou de coulée situé à la partie inférieure du moule. La pression est maintenue pendant tout le temps de la solidification de la pièce puis, au moment où l'on relâche la pression, tout le métal resté liquide dans le tube d'injection redescend dans le four, Les moules sont généralement métalliques, mais les faibles pressions qui ne dépassent pas 0,1 MPa, et qui sont de l'ordre de 40 à 60 KPa pour des pièces en aluminium par exemple, autorisent l'emploi de moules et de noyaux en sable aggloméré. **[1]**

II.2.2.2.2-Les Caractéristiques du procédé

Ce procédé permet :

- de supprimer pratiquement la nécessité des masselottes ;
- des cadences peuvent être plus élevées (de l'ordre du double des cadences de moulage en coquille par gravité), d'où une plus grande productivité ;
- des caractéristiques des alliages sont améliorées de 10% environ et on peut traiter thermiquement les pièces ;
- une précision dimensionnelle des pièces est très bonne.

Une automatisation facile, en mécanisant tous les déplacements et toutes les opérations, et qui résout de façon élégante la mécanisation de la coulée, toujours difficile à réaliser en coquille par gravité. **[1]**

Exemple de pièces moulées à basse pression :



Figure 14:pièces moulées à basse pression[1]

II.2.2.3-Moulage en coquille par gravité

II.2.2.3.1-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.

II.2.2.3.2-Le procédé de moulage en coquille : [12]

- 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).



Figure 15:exemple de coquille**[12]**

II.2.2.3.3-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.

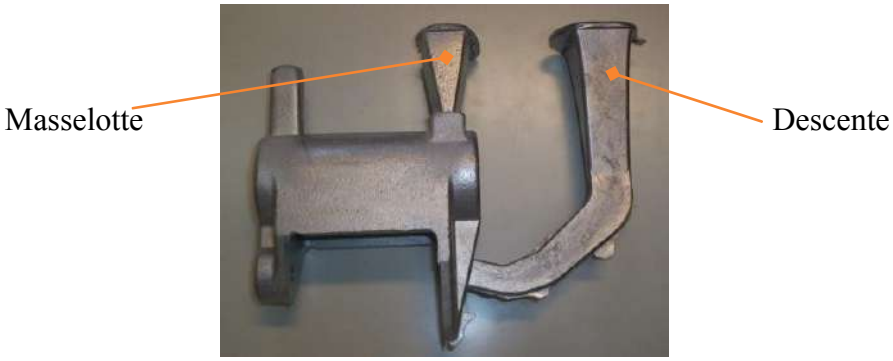
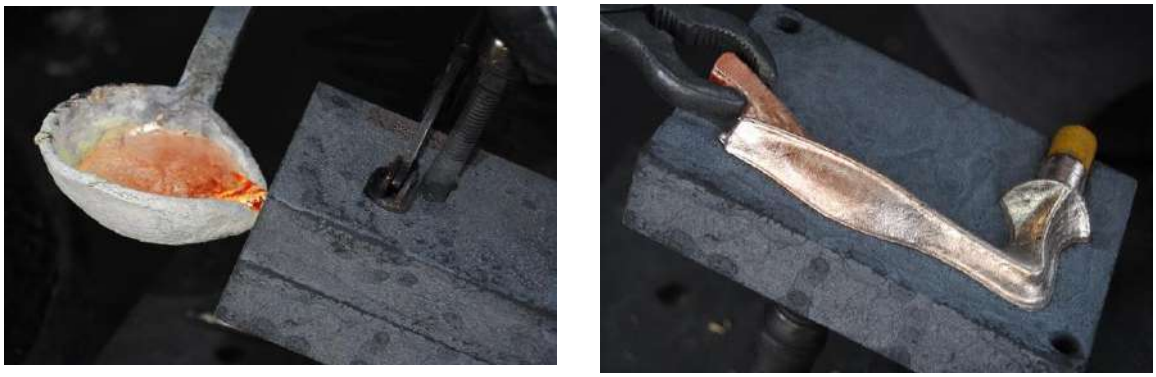


Figure 16:pièce en alliage d'aluminium (Al Si9 Cu3 Mg) moulée encoquille**[12]**

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 » [12]



(a) *(b)*

Figure 17:*moulage par gravité en coquille (a) coulée, (b) pièce, images* ***SECODIR Sarl*** **[11]**

II.2.2.3.4-Technologie de la coquille : [13]

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

II.2.2.3.4.1-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.

II.2.2.3.4.1.1-Type de remplissage

- **Coulée en chute** : elle s'adresse en priorité aux pièces de faibles hauteurs

  -elle favoris une solidification correcte du métal.la pièce après l'arrêt de la coulée continue à être approvisionnée par le métal par sa descente par gravité

  -les masselottes sont de petites dimensions

  -le métal tend à s'oxyder pendant la coulée

  -l'évacuation de l'air n'pas optimale

  -turbulences du métal

- **Coulée sur coté** : elle s'adresse aux pièces de hauteur moyenne ou important, le remplissage de l'empreinte est assez clame peu turbulences et l'alimentation suffisante

  D'air sont prévus à la construction du moule

- **coulée en source :** elle s'adresse de préférence aux pièces moulées avec des noyaux en sable.

  Le remplissage de l'empreinte se fait progressivement, sans turbulences.

  La remontée du métal dans l'empreinte facilite l'évacuateur de coulée plus élevée.

  Le métal, au cours de sa remontée dans l »empreinte, refroidit, cela nécessite une température de coulée plus élevée

II.2.2.3.4.2-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.

II.2.2.3.4.3-Les évents :

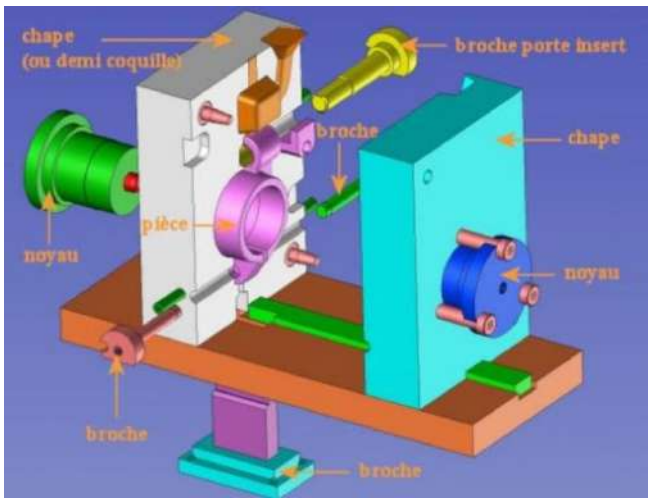
Ces trous généralement fins dans la coquille permettent l'échappement de l'air lors du remplissage et évitent ainsi les incomplets et les bulles d'air diminuant les propriétés mécaniques de la pièce coulée.

II.2.2.3.4.4-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)

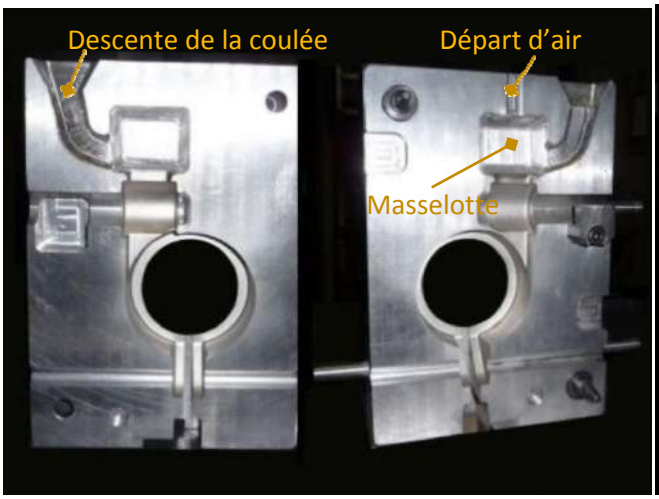
II.2.2.3.4.5-Mise en position des chapes :

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.





(a) *(b)*





(c) *(d)*



(e)

Figure 18: *exemple d'un outillage coquille pour fonderie aluminium, (a) modèle 3D, (b) outillage réalisé,*

(c) les deux chapes, (d) les noyaux, (e) les broches.
Images Fonderie Roux et Gallois[13]

II.2.2.3.4.6-Le poteyage : [14]

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 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.

II.2.2.3.4.6.1-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.

II.2.2.3.4.6.2-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 refusions), 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.

II.2.2.3.4.6.3-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.

II.2.2.3.4.6.4-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.

II.2.2.3.4.6.5-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.

II.2.2.3.4.6.6-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.

II.2.2.3.5-Avantages et Inconvénients de procédée de moulage en coquille :

II.2.2.3.5.1-Avantage :

Un tel procédé fournit des pièces propres, de beaux aspects, lisses, étanches et compacts, aux cotes très proches des dimensions finales.

La précision des pièces est améliorée par rapport à celle des moulages au sable, d'où économie de matière, usinage réduit, tolérances des cotes plus serrées facilitant l'usinage sur machines-outils automatiques. Les pièces peuvent présenter des formes extérieures compliquées. Le refroidissement rapide leur donne une structure plus fine du métal donc à de meilleures caractéristiques mécaniques.

II.2.2.3.5.2-Inconvénients :

Par contre, il faut noter que ce procédé nécessite l'emploi de masselottes nombreuses et importantes, parfois difficiles à positionner dans le moule. Le temps de solidification des masselottes est long et le coût de transformation du métal liquide est assez élevé. Les outillages sont chers.

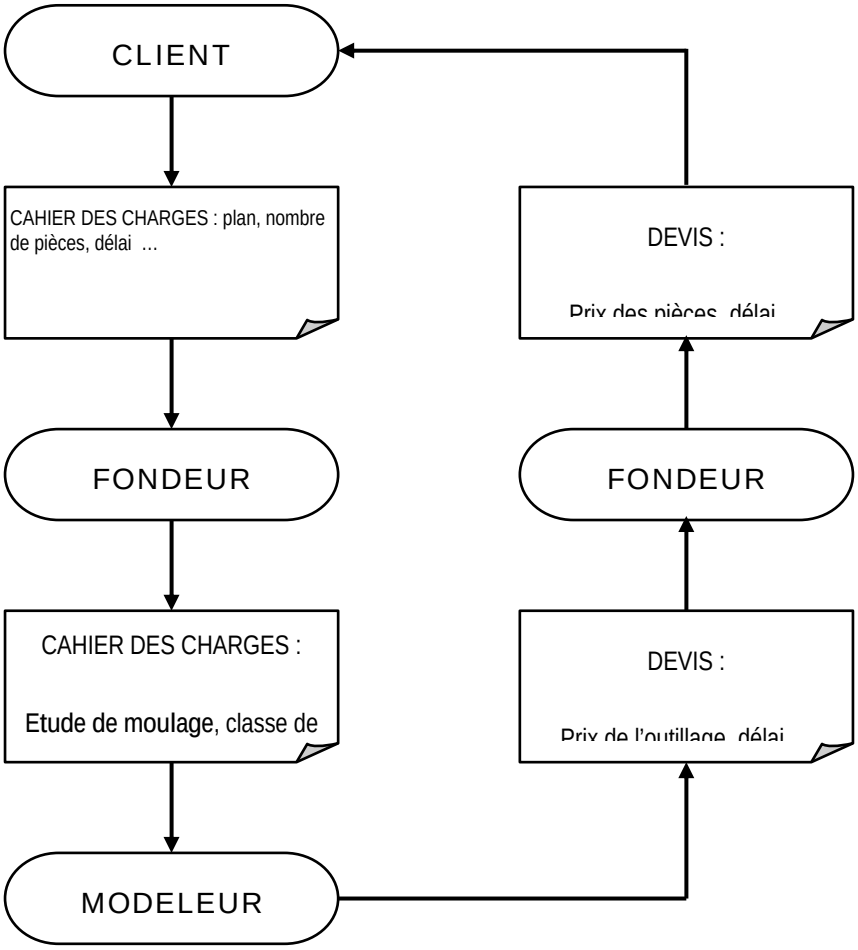
II faut également noter que les installations de coulée en coquille par gravité sont nettement moins polluantes que les installations de moulage au sable.

Chapitre 3

III-TECHNIQUE DE MOULAGE

III.1-SITUATION DE DEPART

La fabrication d'une pièce moulée répond à l'organisation type suivante :



On voit que l'étude moulage faite par le fondeur est au centre de la fabrication. Si cette pièce est usinée par la suite, l'usineur utilisera lui aussi l'étude de moulage pour tenir compte des surépaisseurs d'usinage prévues par le fondeur, de la dépouille …

Souvent, le fondeur donne au modeleur des indications succinctes voire tout simplement le plan de la pièce. Il est donc nécessaire que le modeleur sache lui aussi faire cette étude de moulage. Pour cela il lui faut connaître au minimum la classe de l'outillage et/ou le nombre de pièces à produire ainsi que le type de moulage : manuel ou mécanique.

La méthode proposée s'applique à un travail fait sur des plans papier. Cependant, la démarche reste valable pour des documents informatiques, notamment en ce qui concerne la recherche du plan de joint.

La méthode de travail proposée suit, dans l'ordre, les étapes suivantes

Lecture du plan

► Comprendre les formes de la pièce

► S'informer de l'échelle du plan

► Vérifier s'il y a des erreurs de représentation

Recherche du plan de joint et du sens de moulage

►Nombre de pièces ►Position des parties creuses

►Contre-dépouilles ►Déformation due à la dépouille

►Nombre de joints ►Bavures à éliminer

►Forme du plan de joint ►Parties de moule fragiles

►Position du plan de joint ►Dimensions des châssis

► Nombre/forme des noyaux ►Position des parties massives

Tracé des surépaisseurs d'usinage

►En rouge et à l'échelle du plan

►En plein ou hachurées si traversées par un plan de coupe

Tracé du plan de joint

►Un trait fort bleu foncé avec symboles, dans toutes les vues

Dessin des noyaux

►Hachurés quand ils sont traversés par un plan de coupe

►Indication de l'ordre de remmoulage et respect des couleurs

Dessin du système de coulée et des châssis

►En noir et à l'échelle du plan

►Système de coulée avec sa cotation

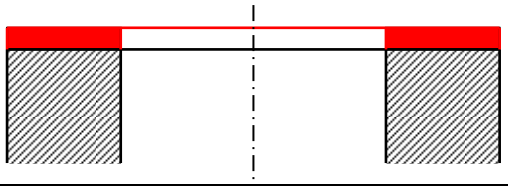
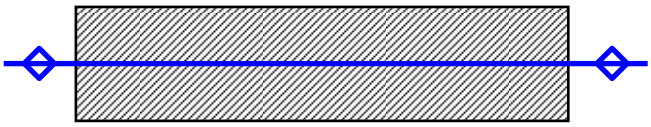
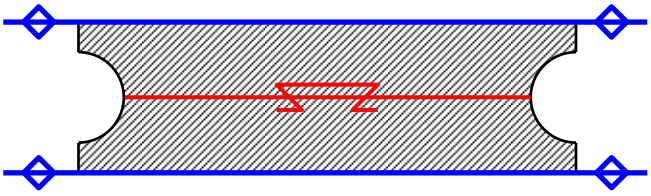
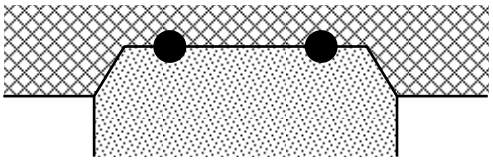
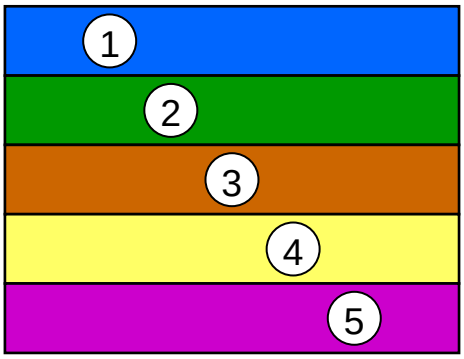
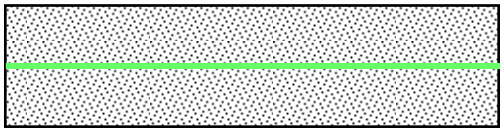
►Dimensions des châssis

Dessin du sable du moule

►Hachures noires

►Orientation différente dessous/dessus

Le Tracé d'une étude de moulage doit respecter certaines conventions :

Surépaisseurs d'usinage En ROUGE et à l'échelle du plan	
Joints de moulage trait fort et symboles en **BLEU**	
Démontabilités de l'outillage En **ROUGE** avec un trait de Jupiter	
Etanchéités des noyaux Des cercles **NOIRS**	
Ordre de remmoulage des noyaux Respecter les **COULEURS**	
Armatures (moule et noyaux) En **NOIR**	
Tirages d'air (moule et noyaux) En **VERT CLAIR**	
Sable du moule Hachures **NOIRES**	

III.2-Le Retrait

III.2.1-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 ;
- -10 millimètres par mètre (soit 1,5%) pour le cuivre et ses alliages ;
- -10 millimètres par mètre (soit 2%) pour les aciers.

III.2.2-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 mmdivisés en 350 parties égales, c'est-à-dire que chaque division vaut 1,02 mm.

III.2.3-Solutions pour applications :

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

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

III.2.4- Défauts engendrés par le retrait :

III.2.4.1- Retassure :

III.2.4.1.1- 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.

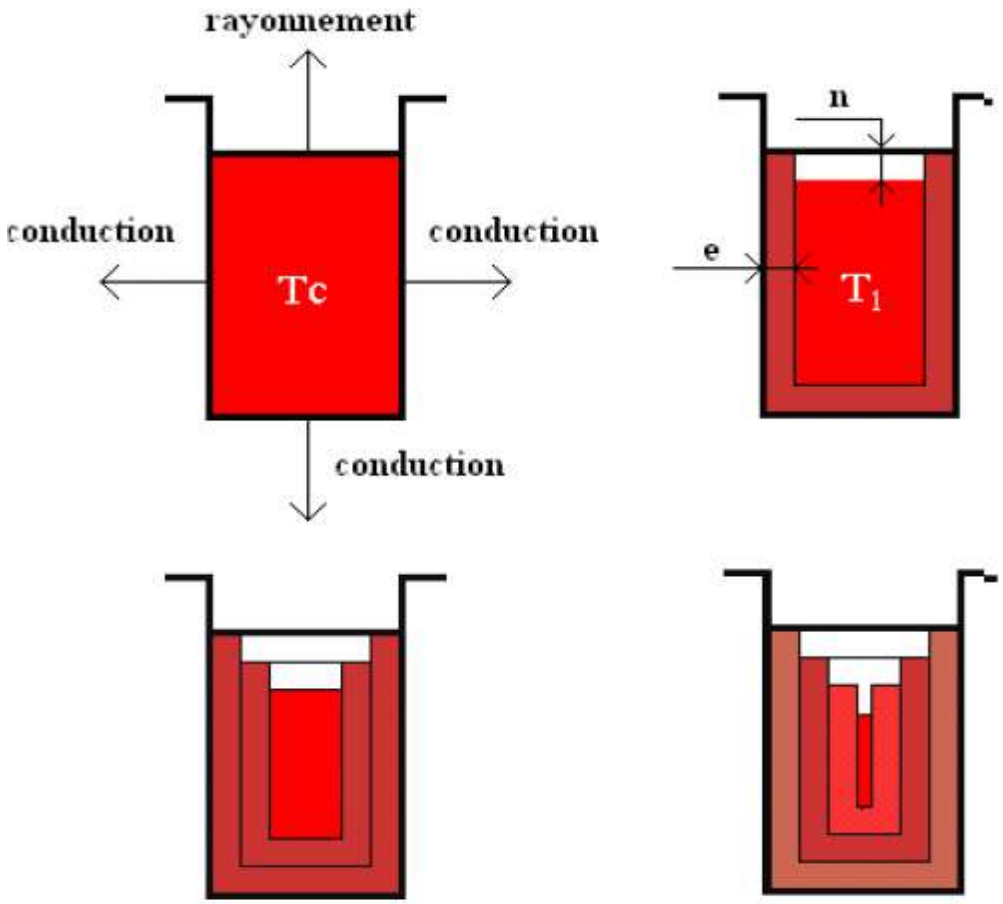


Figure 19:*mécanisme de formation de retassure*.**[14]**

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 (V0 – V1) de l'alliage formant la carapace.
- Du début de contraction à l'état liquide dont la température (T1< T0).

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 2).

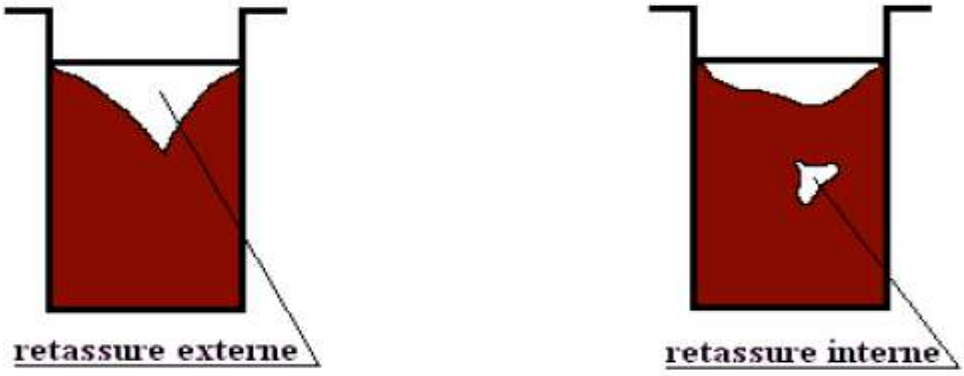


Figure 20:*les différents types de retassures.* **.[14]**

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 figure3).

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.

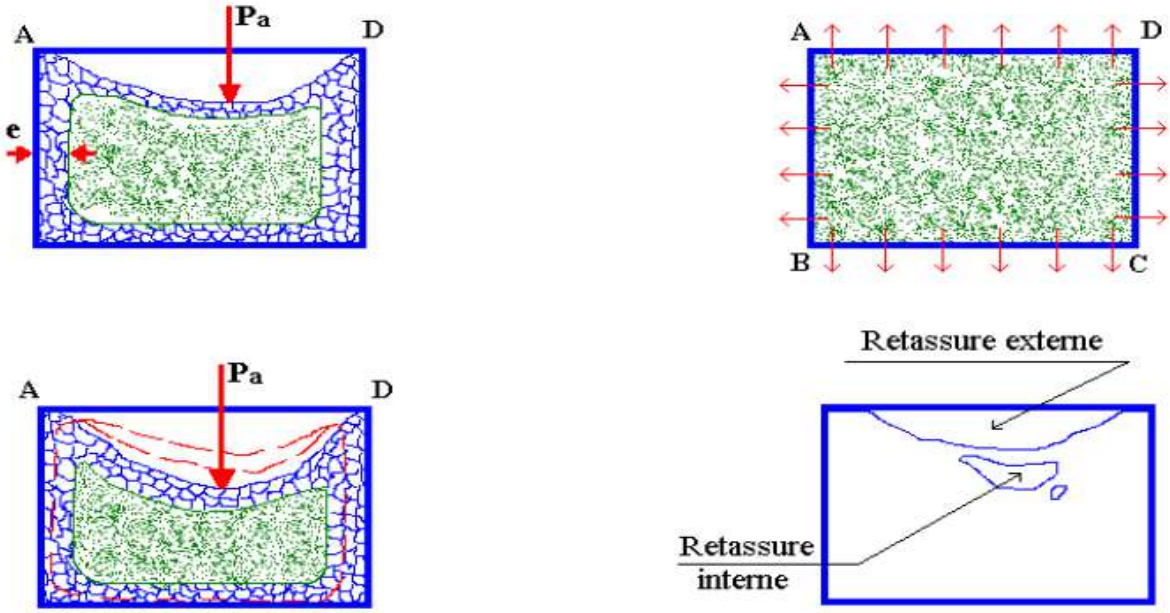


Figure 21:*mécanisme de formation de retassure en moule fermé*.**[14]**

III.2.4.1.2-Comment éviter la retassure :

III.2.4.1.2.1-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.

III.2.4.1.2.1.1-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 4).

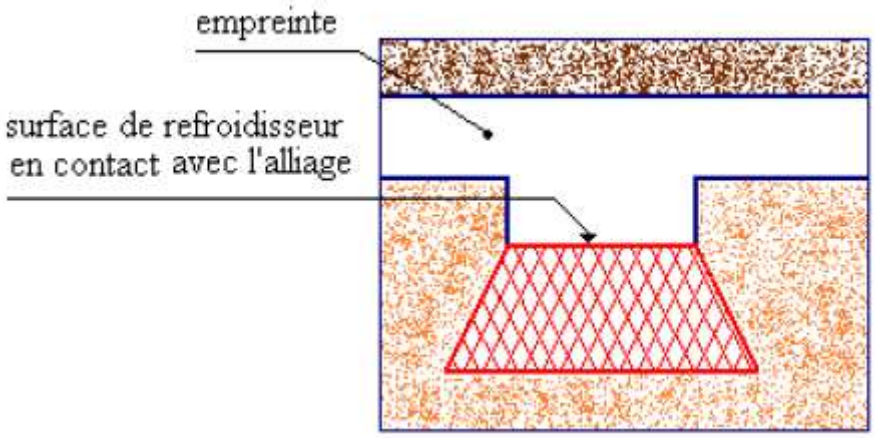


Figure 22:*refroidisseur externe*.**[14]**

III.2.4.1.2.1.2-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.

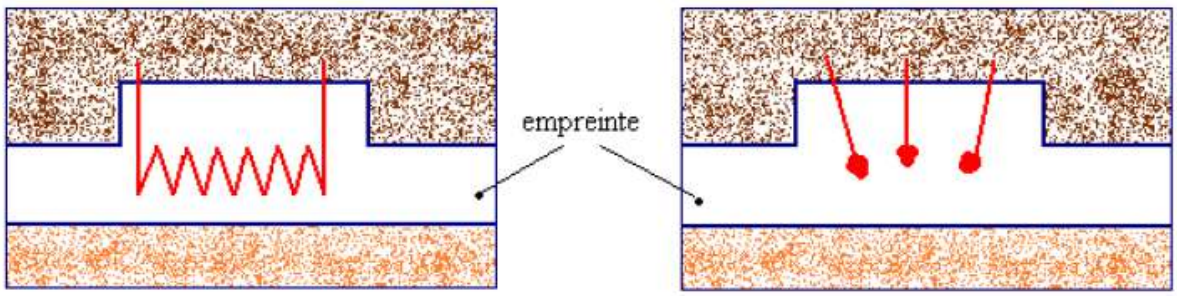


Figure 23:*refroidisseur interne*.**[14]**

III.2.4.1.2.2- 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.

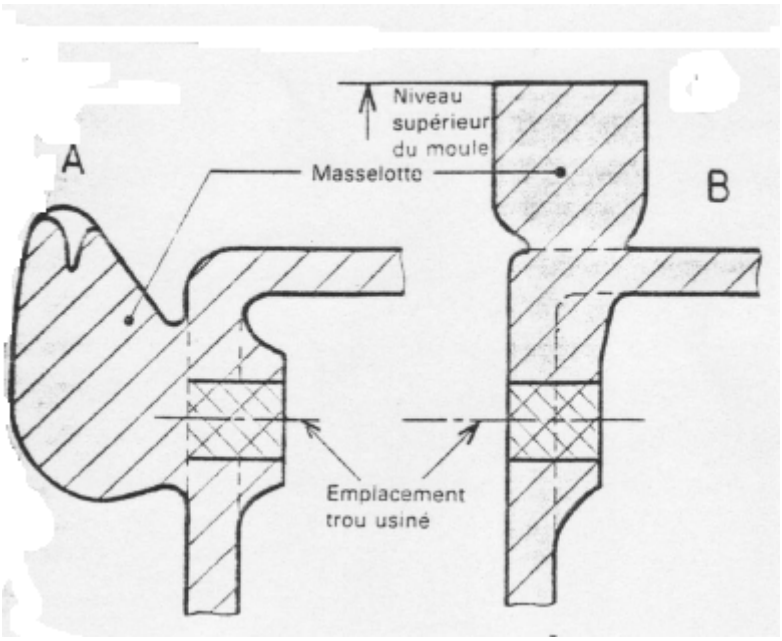


Figure 24:*masselotte***.[14]**

III.2.5-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.

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 **ébranlage,** 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…..

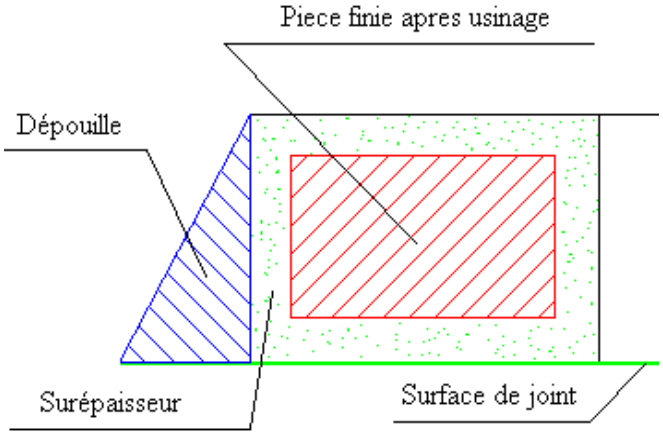


Figure 25:*pièce brute*.[14]

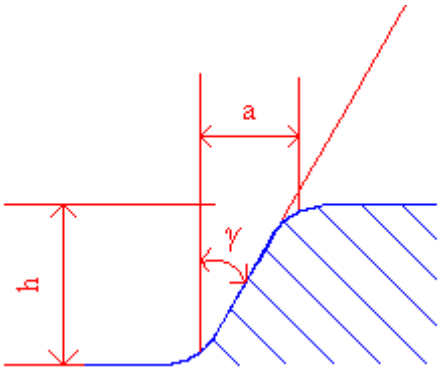


Figure 26:*la dépouille*.[14]

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'	-	-

Tableau 4:*valeurs de dépouille*.[14]

III.2.6-Surépaisseurs d'usinage

La pièce brute prévoit par rapport à la pièce finie une surépaisseur d'usinage.

Le dessin de la pièce brute doit donc tenir compte de la surépaisseur prévue par l'usinage.

Les valeurs des surépaisseurs d'usinage dépendent de la méthode du moulage, de l'alliage à couler, des dimensions d'une pièce coulée, de la position de la surface usinée dans le moule (voir tableau).

Quand prévoir une surépaisseur

❶Les trous de petit diamètre (par rapport à la pièce)

❷Les filetages

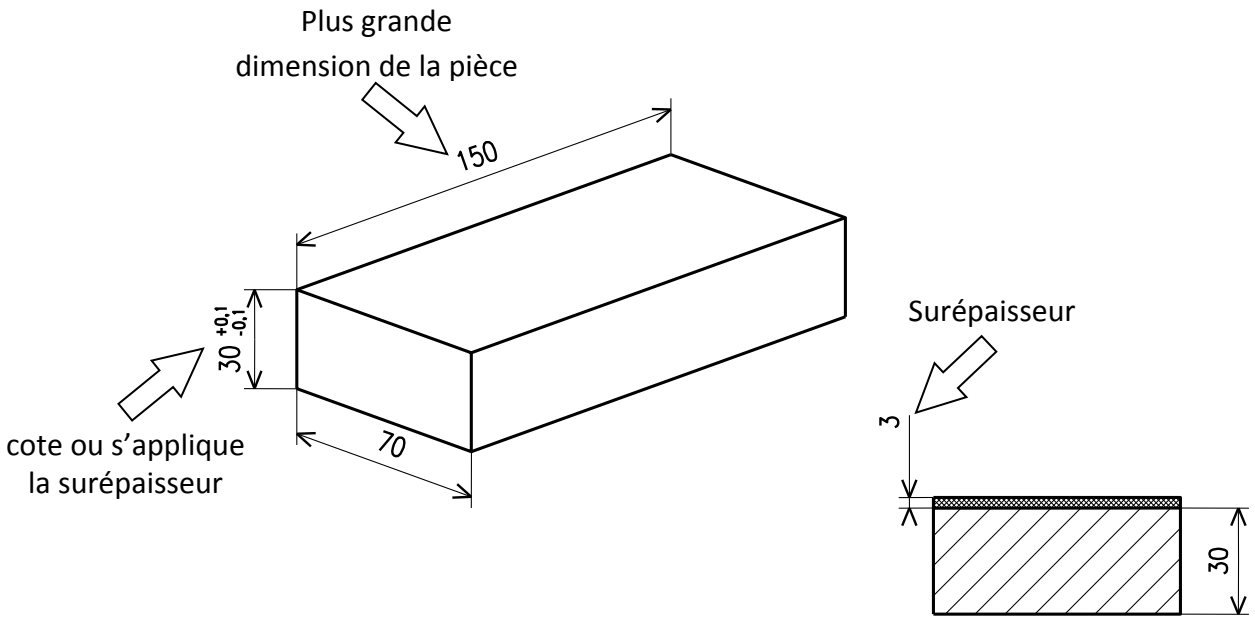
❸Les cotes tolérances

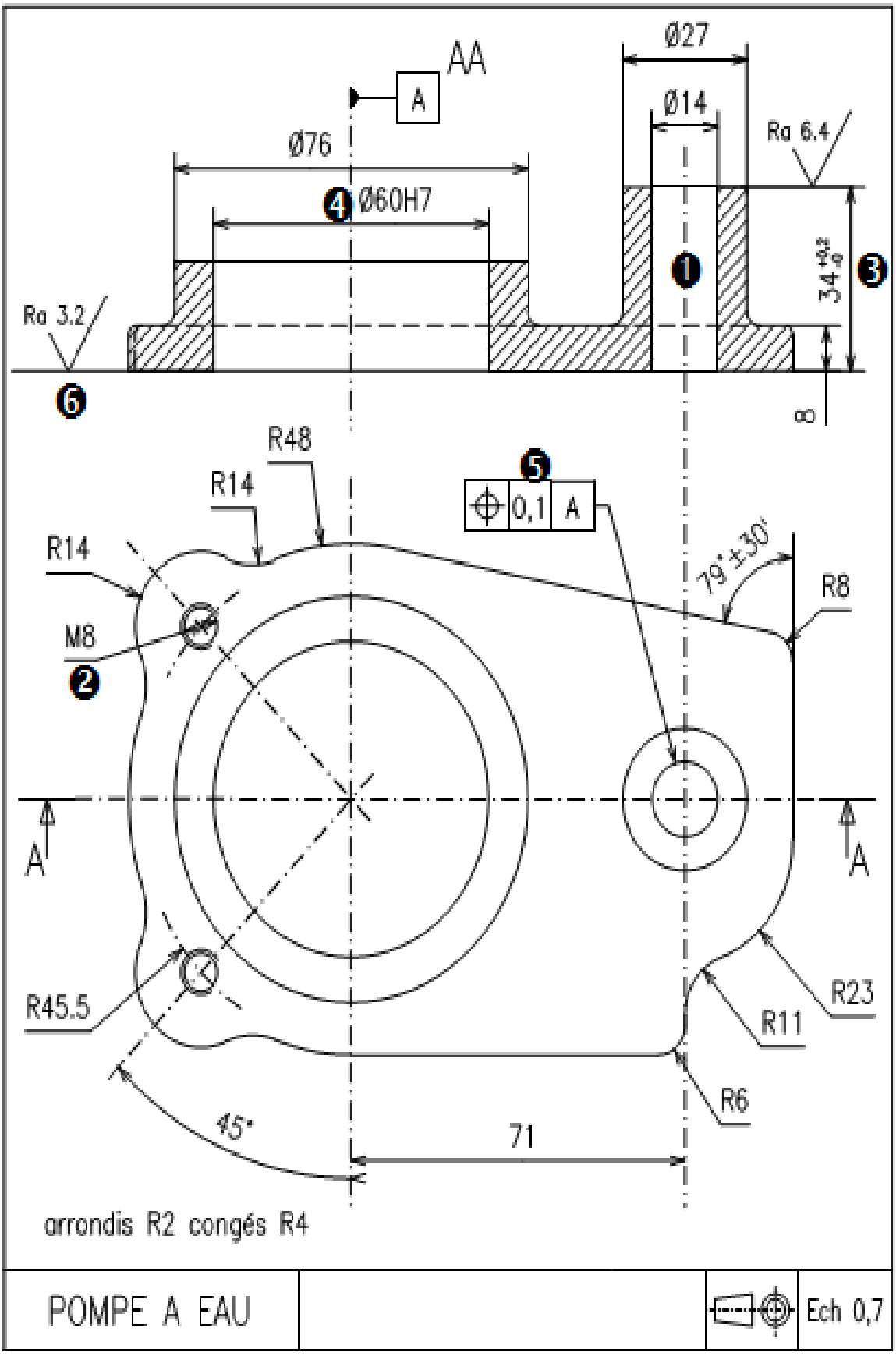
❹Les ajustements

❺Les tolérances de forme et de position

❻Les états de surface < 25

Exemple




AA
A
Ø27
Ø14
Ø76
4 Ø60H7
Ra 6.4
Ra 3.2
1
3
34 +0,2
8
6
R48
R14
5
0,1 A
R14
79°±30'
R8
M8
2
A
A
R45.5
R23
R11
R6
45°
71
arrondis R2 congés R4
POMPE A EAU
Ech 0,7

III.2.7-Joint de moulage

- 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.**
- En général, le démoulage s'effectue **perpendiculairement** au plan de joint.
- L'emplacement du plan de joint dépend de la forme de la pièce. (Voir l'exemple d'une bague).
- Il existe six façons différentes de concevoir le joint de moulage d'une simple bague.
- Le joint représenté à la figure **f** exige que les faces aient une certaine conicité, pour assurer la dépouille nécessaire, et il impose l'utilisation d'un noyau.

Ce tracé peut être adopté si aucune dépouille n'est admise soit à l'intérieur de l'alésage, soit à la périphérie de la pièce.

Dans le cas des figures **c** et **e**, pour l'usinage de la bague, la quantité de métal à enlever est très faible, ce qui constitue un avantage.

III.2.8-plan de joint

Le plan de joint est le plan de séparation des deux châssis: c'est une surface qui contient la plus grande section ou le plan de symétrie de la pièce. On emploie des chapes s'il y a plus d'une surface de joint. Il faut choisir un nombre minimal de joints, de préférence plans et perpendiculaires au sens de démoulage.

Ce choix dépend aussi des contre dépouilles, des dimensions des châssis, des positions des usinages, etc. Il doit limiter le nombre de noyaux.

III.2.9-Tirage d'air (moulage en coquille)

L'air emprisonné dans l'empreinte doit être évacué du moule pendant le remplissage en métal de celui-ci. Le gaz provenant du métal en fusion est évacué en même temps que l'air. Au cours de la construction du moule, il faut prévoir des tirages d'air aux joints, entre les chapes. Dans le plan de joint, des canaux plats de 10mm de largeur et de 0,3mm de profondeur sont usinés.

III.2.10-Stabilité des Noyaux Remoulés

III.2.10.1-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.

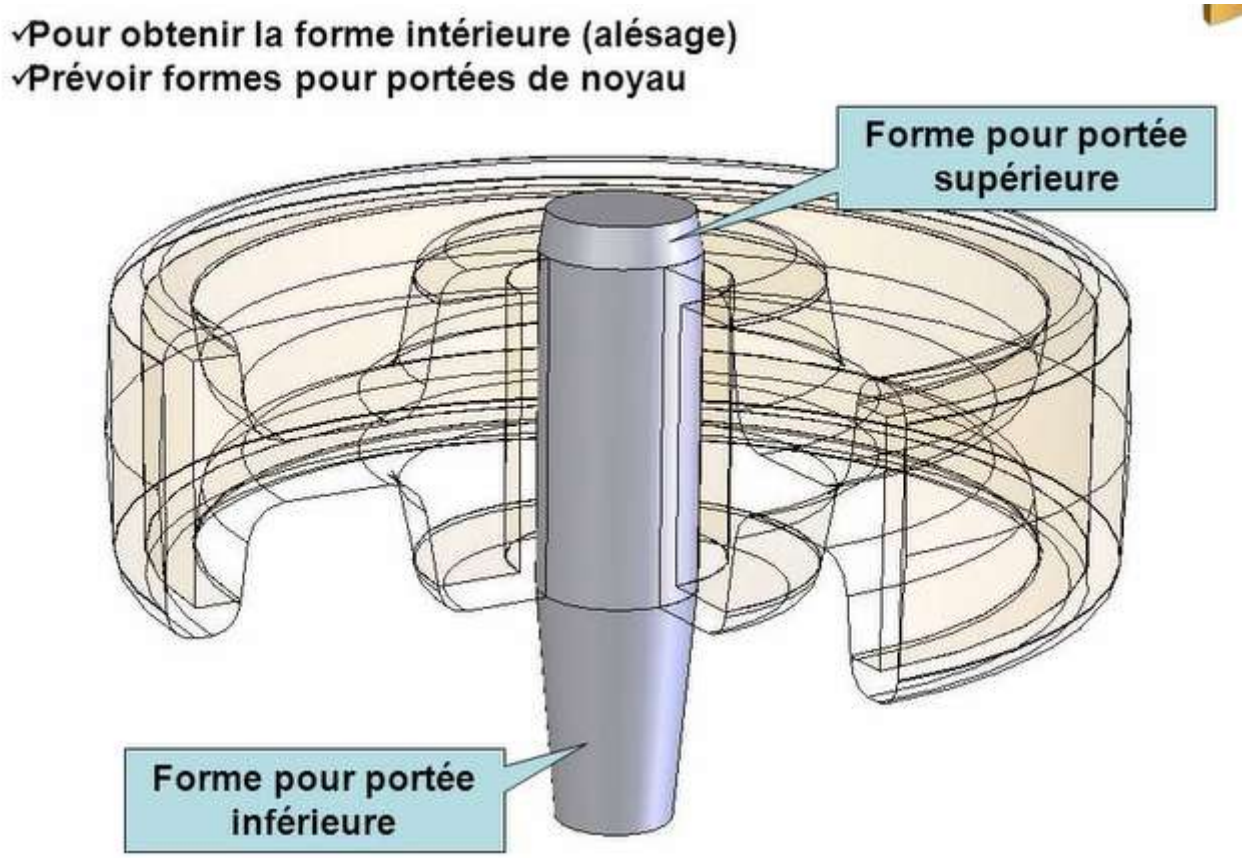


Figure 27: *portées de noyau [13]*

Chapitre 4

IV-Simulation

IV.1-Logiciel SOLIDWORKS :

Le logiciel SolidWorks est une application de conception mécanique qui tire parti de l'interface utilisateur graphique de Microsoft Windows. Grâce à ce logiciel, les concepteurs peuvent esquisser rapidement une idée, expérimenter avec des fonctions et des côtes et produire des modèles et des mises en plan précis.

IV.1.1-Pièce choisis

IV.1.1.1-La forme de piéce générale

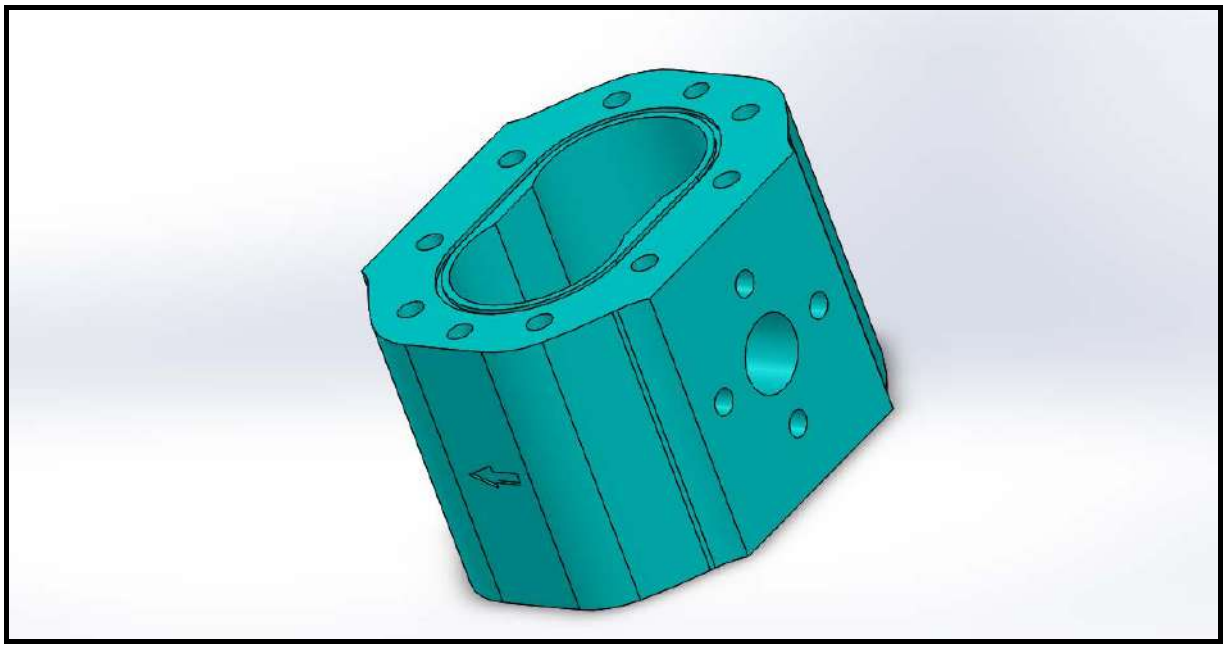


Figure 28:*forme de piéce*

IV.1.1.2- Conception de la pièce sur solidworks

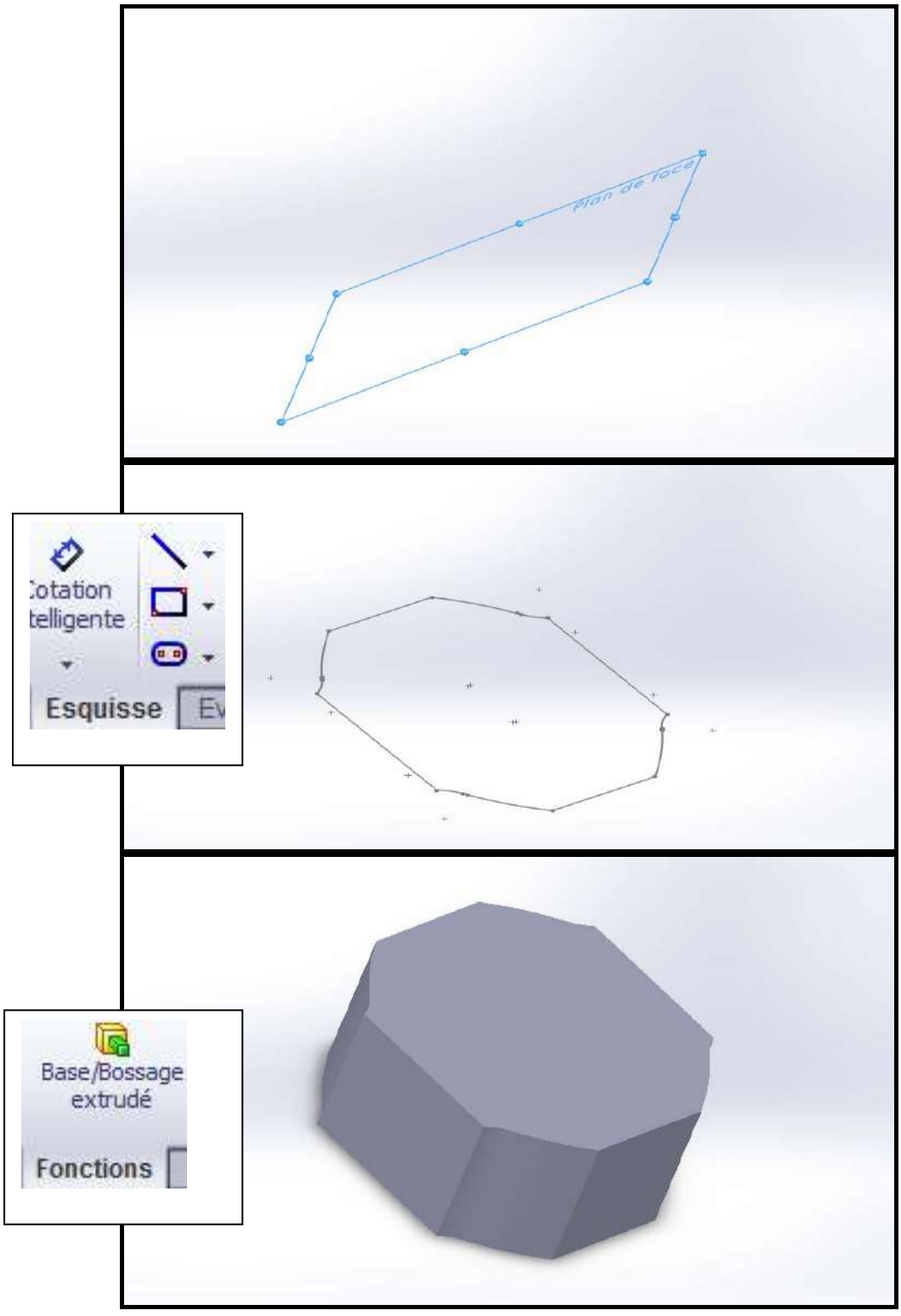


Figure 29: *extrude plane de piéce*

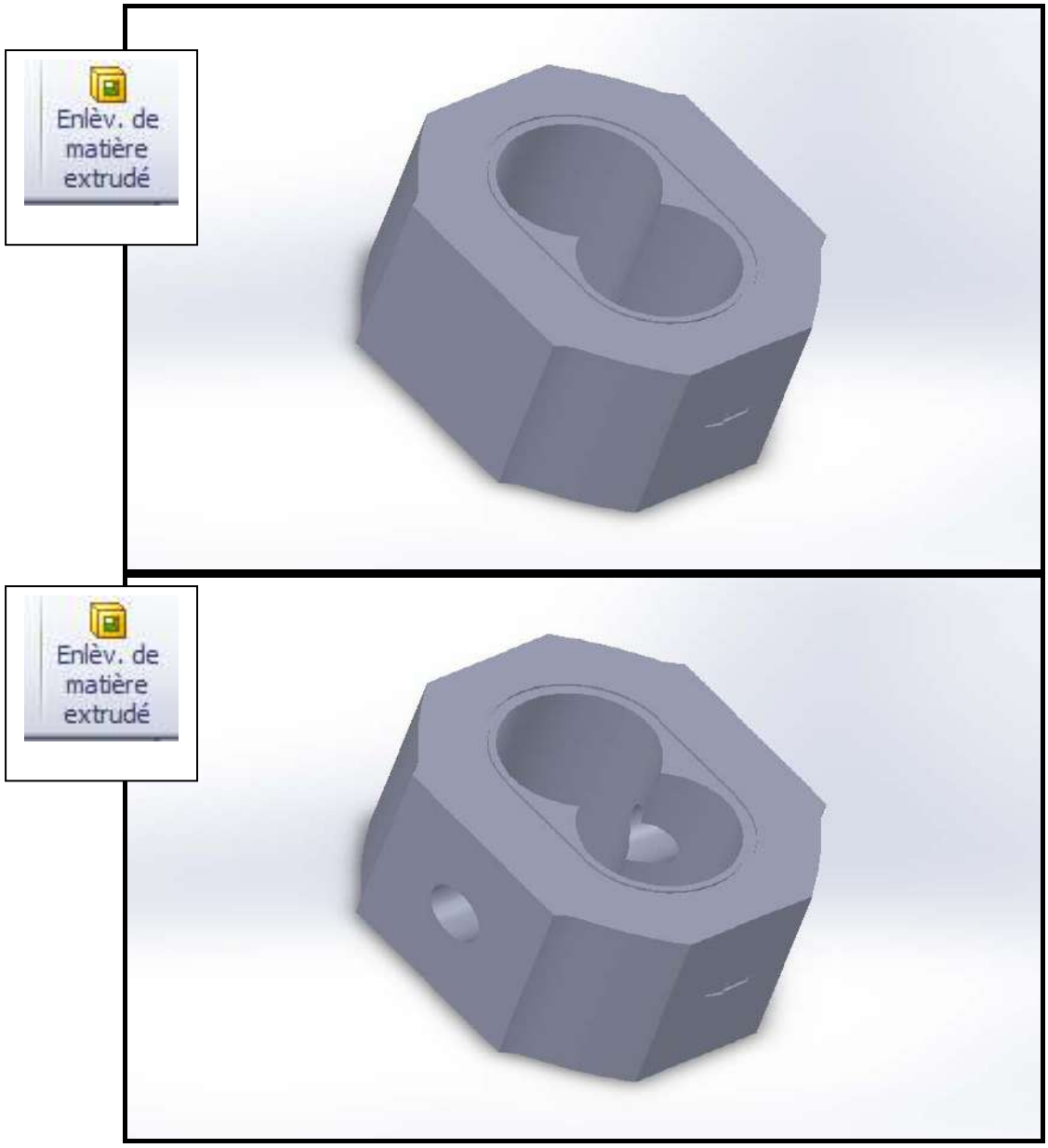


Figure 30: *enlév de matiére extrude de la piéce*

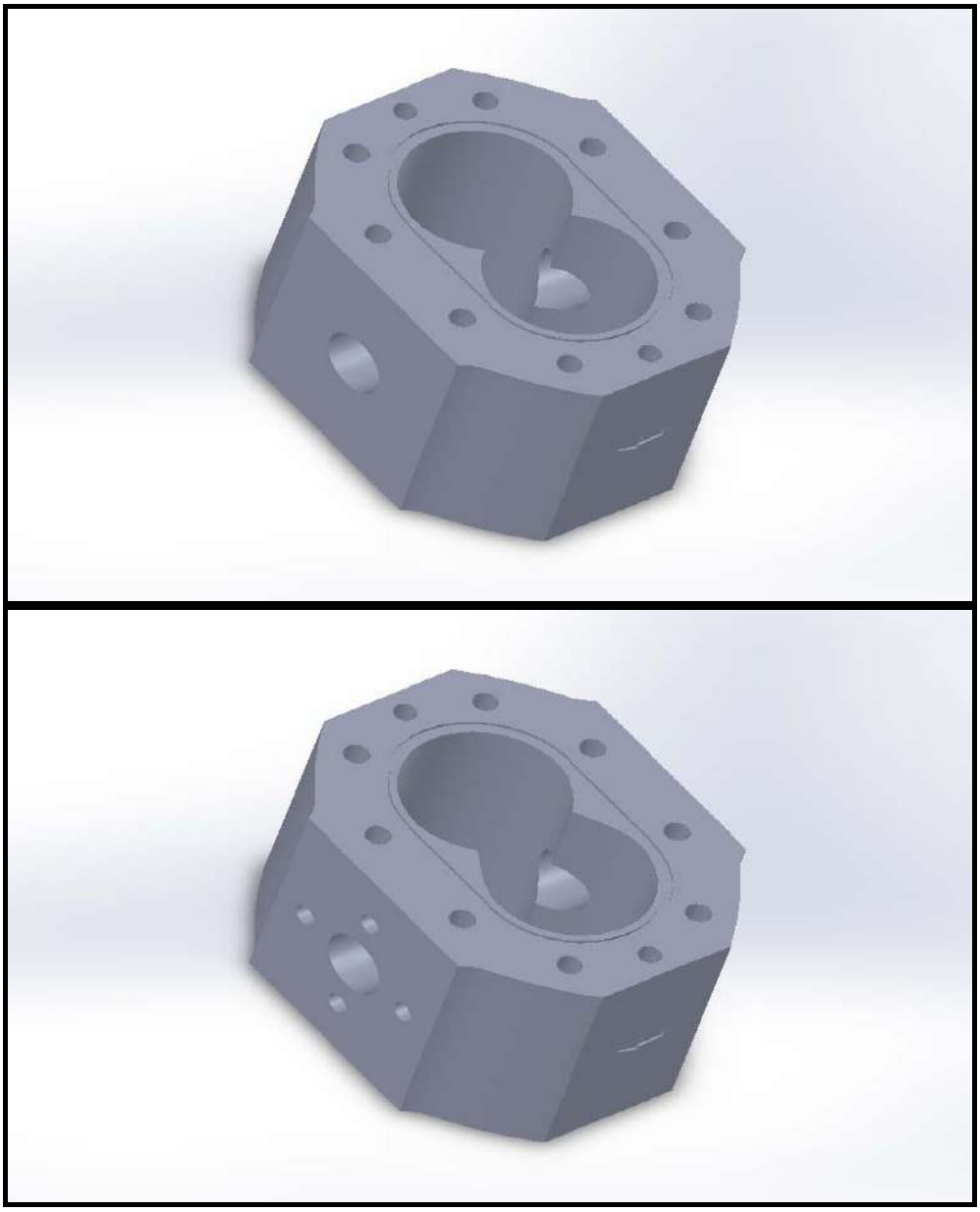
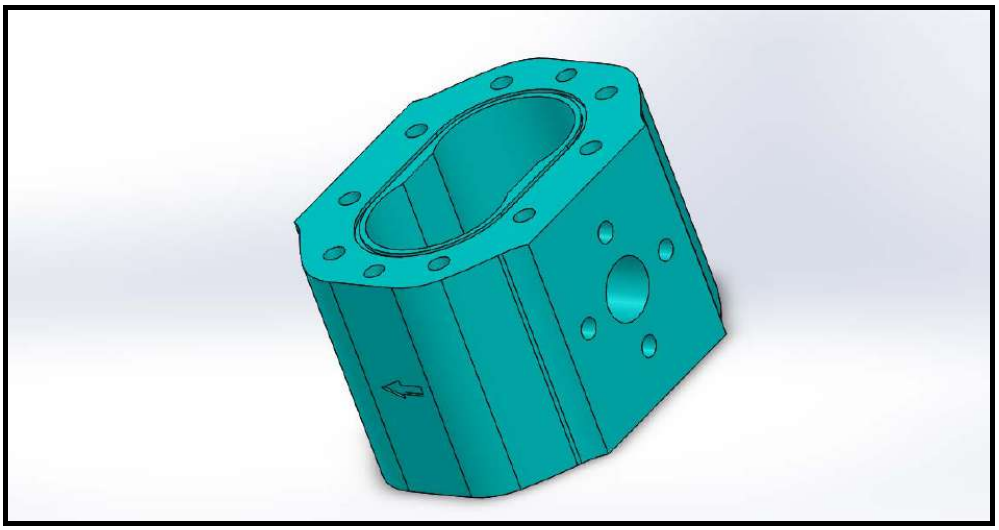


Figure 31: *Figuer assistance pour le parcage de piéce*

IV.1.1.2.1-piéce fini



IV.1.1.2.2-Conception Moule de la pièce

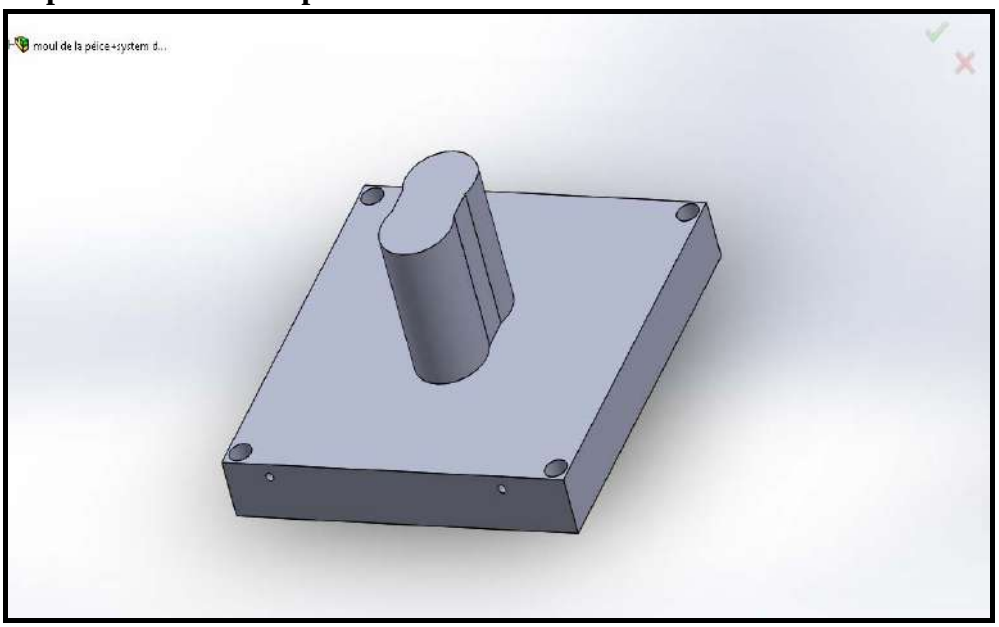


Figure 32:*patrie a + noyau*

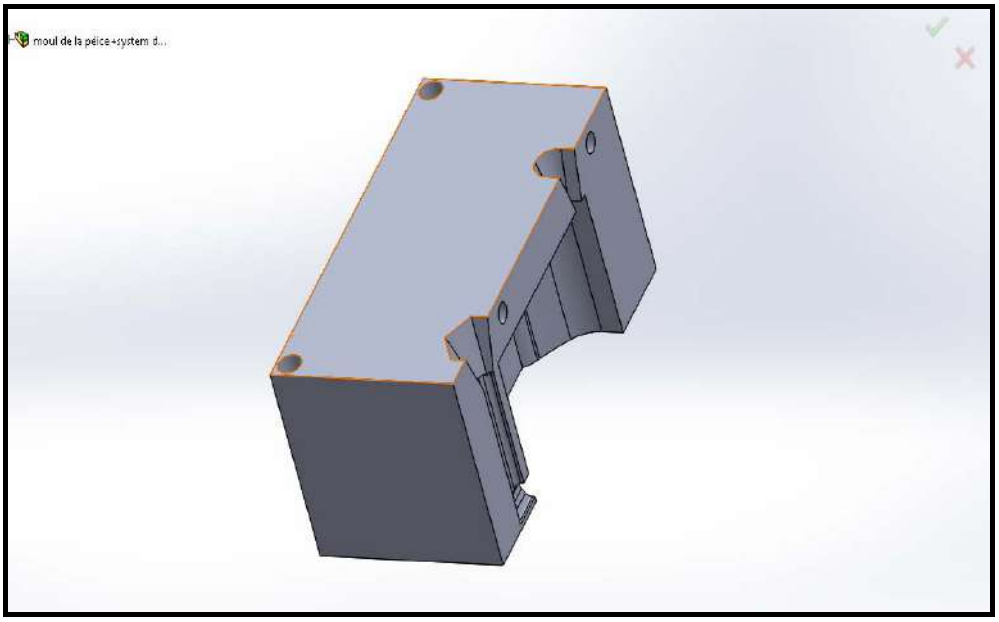


Figure 33: *partie B*

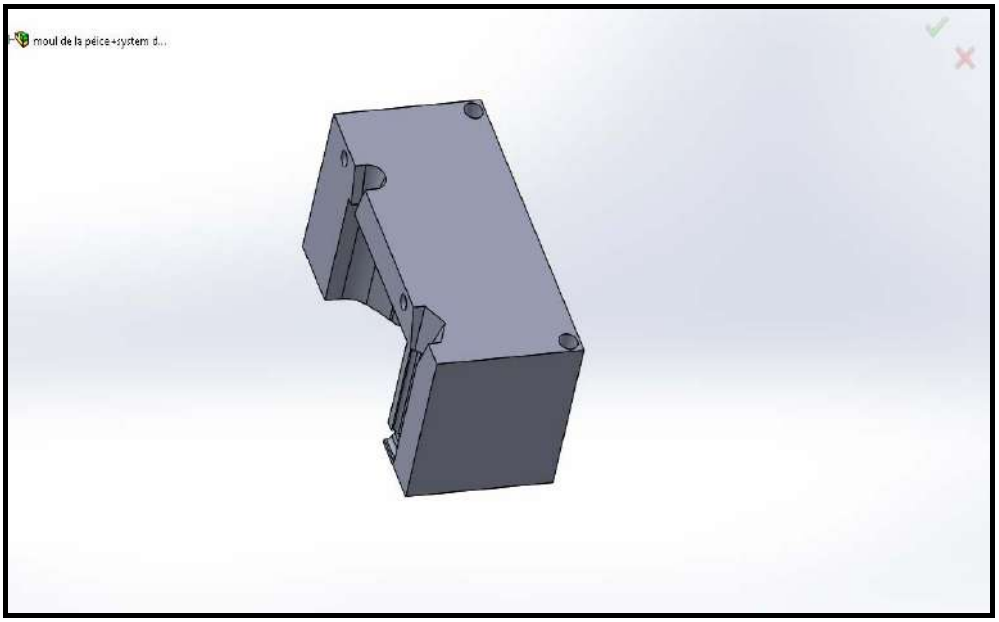


Figure 34*:partie C*

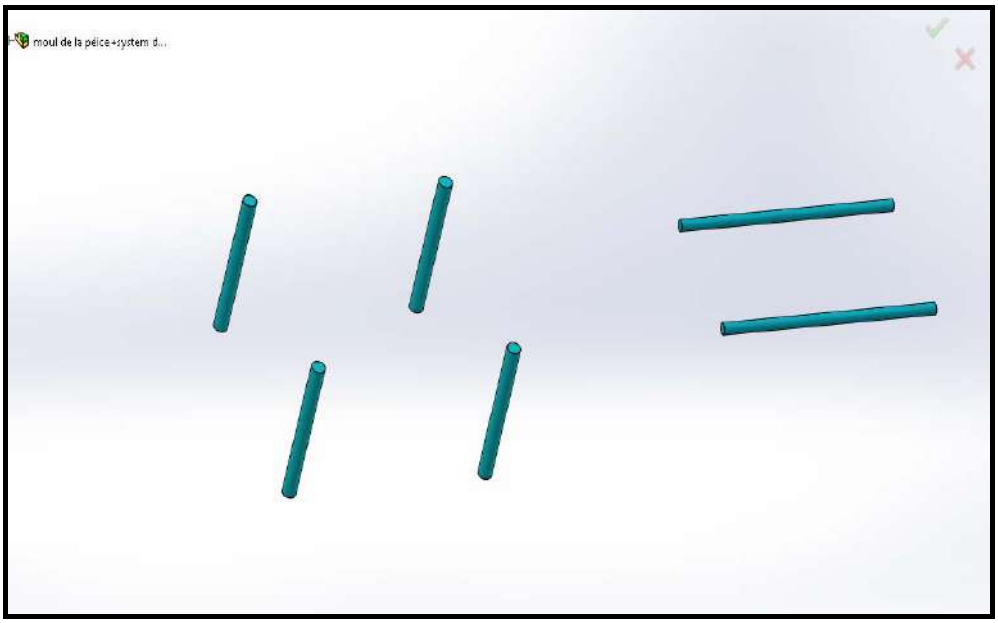


Figure 35: *les broches*

IV.1.1.2.3-Système de refroidissement

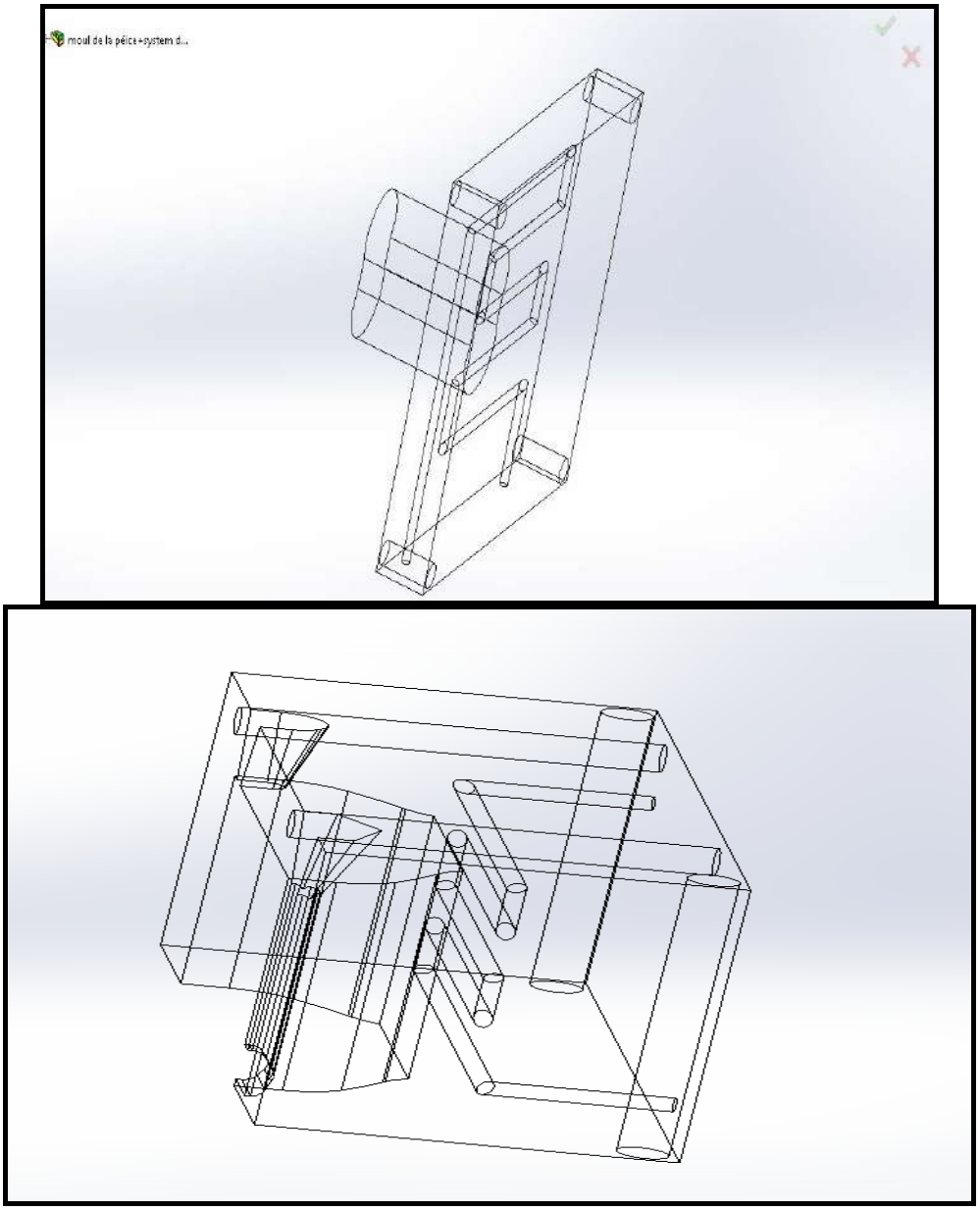


Figure 36: *Système de refroidissement*

IV.1.1.2.4-Moule fermé

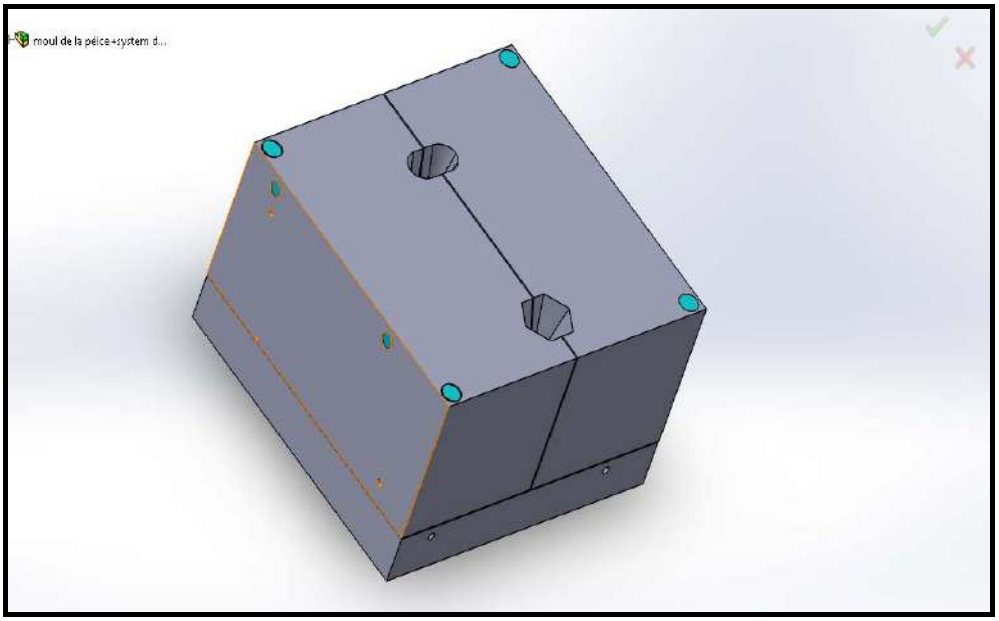


Figure 37: *Moule fermé*

IV.1.1.2.5-Moule ouvert

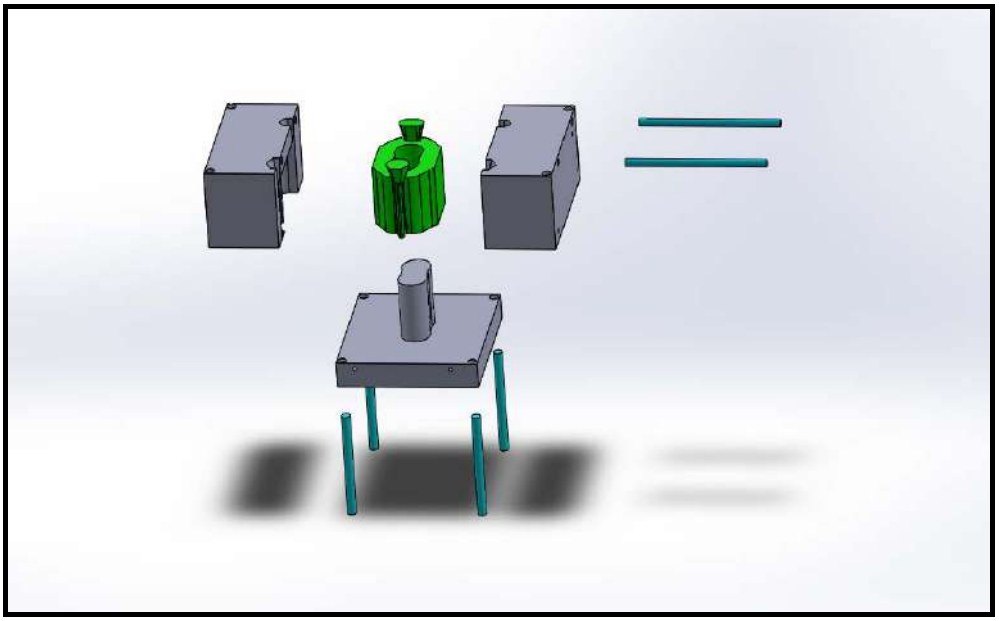


Figure 38: *Moule ouvert*

IV.2-ANALYSE SUR PROCAST

Expérimentalement, il est impossible de mesurer directement le coefficient de transfert de chaleur à l'interface pour les raisons suivantes :

L'interface est composée de plusieurs milieux distincts ayant des caractéristiques propres ;

Il se crée un interstice entre le moule et l'échantillon d'aluminium durant la solidification sous l'action du retrait linéaire (différence de densité solide/liquide).

D'où l'utilisation de PROCAST, afin de modéliser le moule étudié.

IV.2.1-INTRODUCTION

PROCAST est un logiciel de simulation qui présente une solution rapide et efficace pour l'évaluation complète du processus de fonderie. L'outil aborde les notions de base de tout processus de moulage, remplissage, solidification et la prédiction des retassures.

L'utilisation de ce logiciel sur un fichier pièce CAT.PRT Permet :

- -De simuler le remplissage du moule ;
- -De simuler la solidification des pièces ;
- -De visualiser l'évolution des températures ;
- -De valider la conception des systèmes de coulée ;
- -De valider le dimensionnement des masselottes ;
- -D'analyser la qualité de la pièce obtenue.

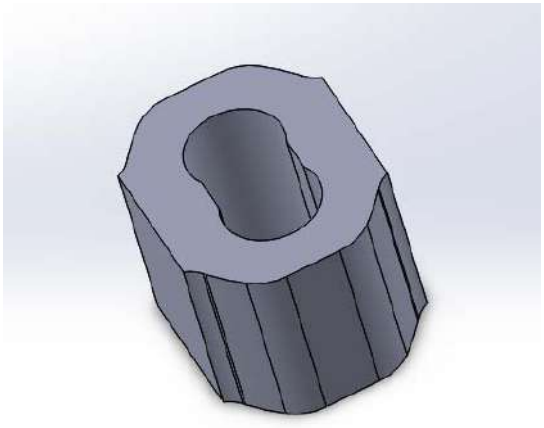


Figure 39: *la pièce sous CATIA*

IV.2.2-LES ÉTAPES DE L'UTILISATION DE PROCAST

- **La géométrie :**

Le fichier source à utiliser, accès au module, limitations.

- **La mise en donnée :**

Le choix des procédés, matériaux, pièce et moule, définition des conditions d'entrée du métal, le maillage, conditions initiales de pression et de température, définition de la gravité, paramètres de calcul.

- **Exécution du solveur :**

Déroulement du calcul.

- **Résultats :**

Analyse

IV.2.2.1-GÉOMÉTRIE

La géométrie doit être composée d'un seul solide et comprendre tous les attributs du procédé de fonderie (Figure 40) :

- **Système d'alimentation ;**
- **Pièce ;**
- **Masselottes ;**
- **Accès au module :**

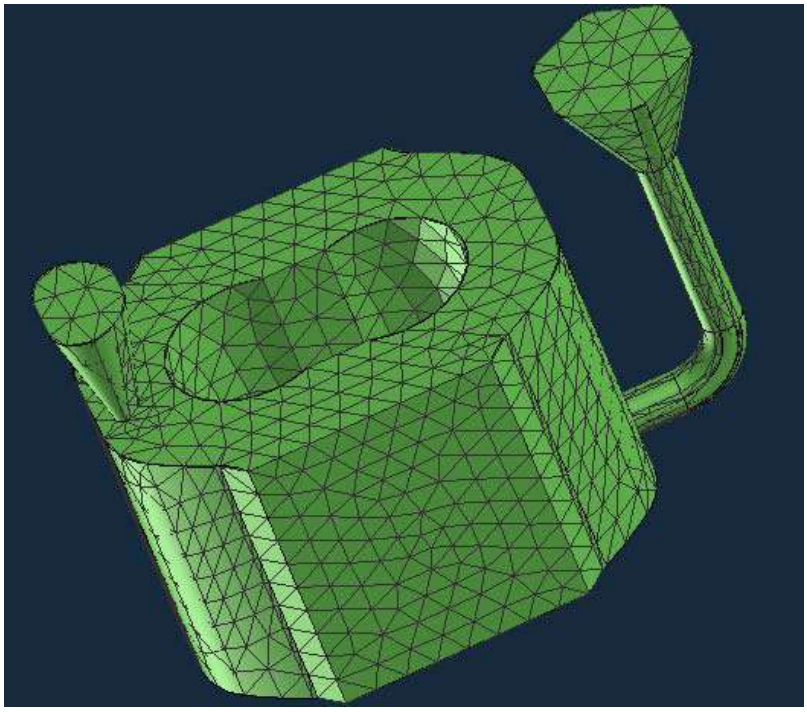


Figure 40: *Les attributs du procédé de fonderie*

- **Limitation :**

Il n'est pas possible de prendre en compte l'outillage (moule, noyaux,..).

IV.2.2.2-LA MISE EN DONNÉE

IV.2.2.2.1-CHOIX DU PROCÉDÉ

Choix du type de moulage :

- **Moulage permanent (en coquille) ;**
- **Moulage non permanent (sable….).**

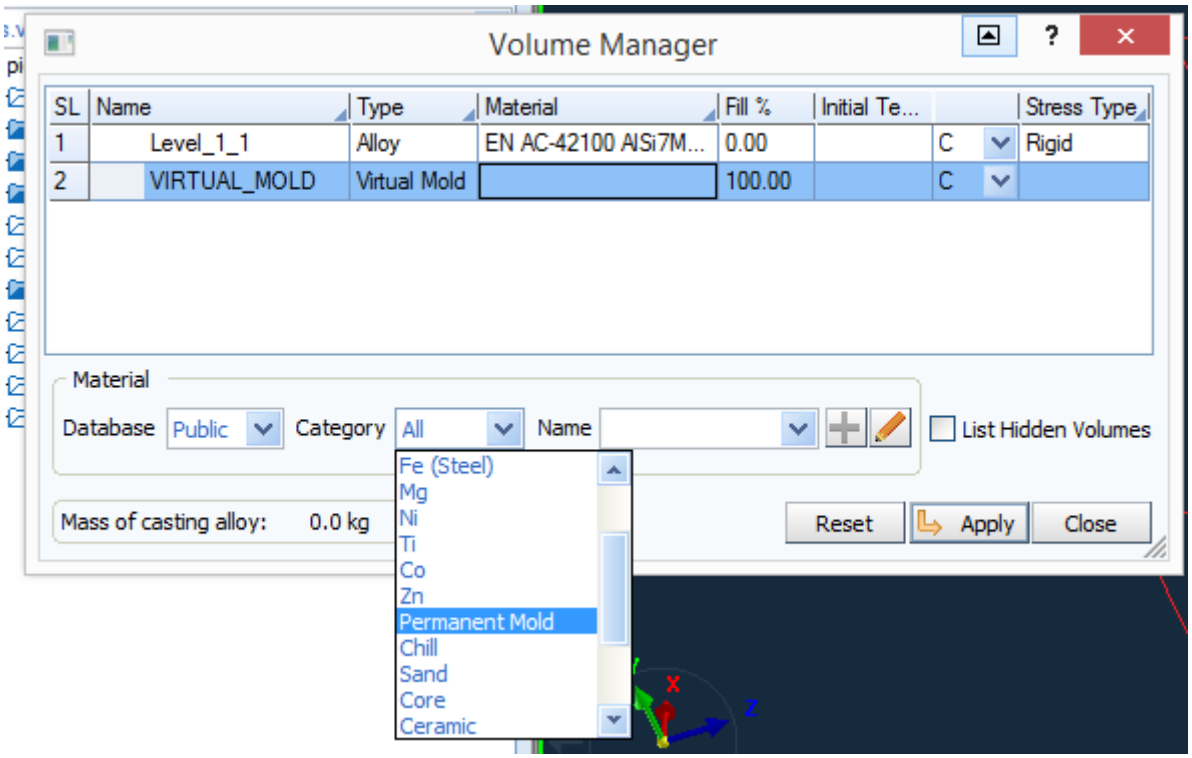


Figure 41: *Type de moulage*

IV.2.2.2.2-CHOIX DES MATÉRIAUX

- Pour la pièce à couler Alliage d'Aluminium EN AC-42100Al Si Mg 0.3;
- Pour le moule Graphite.

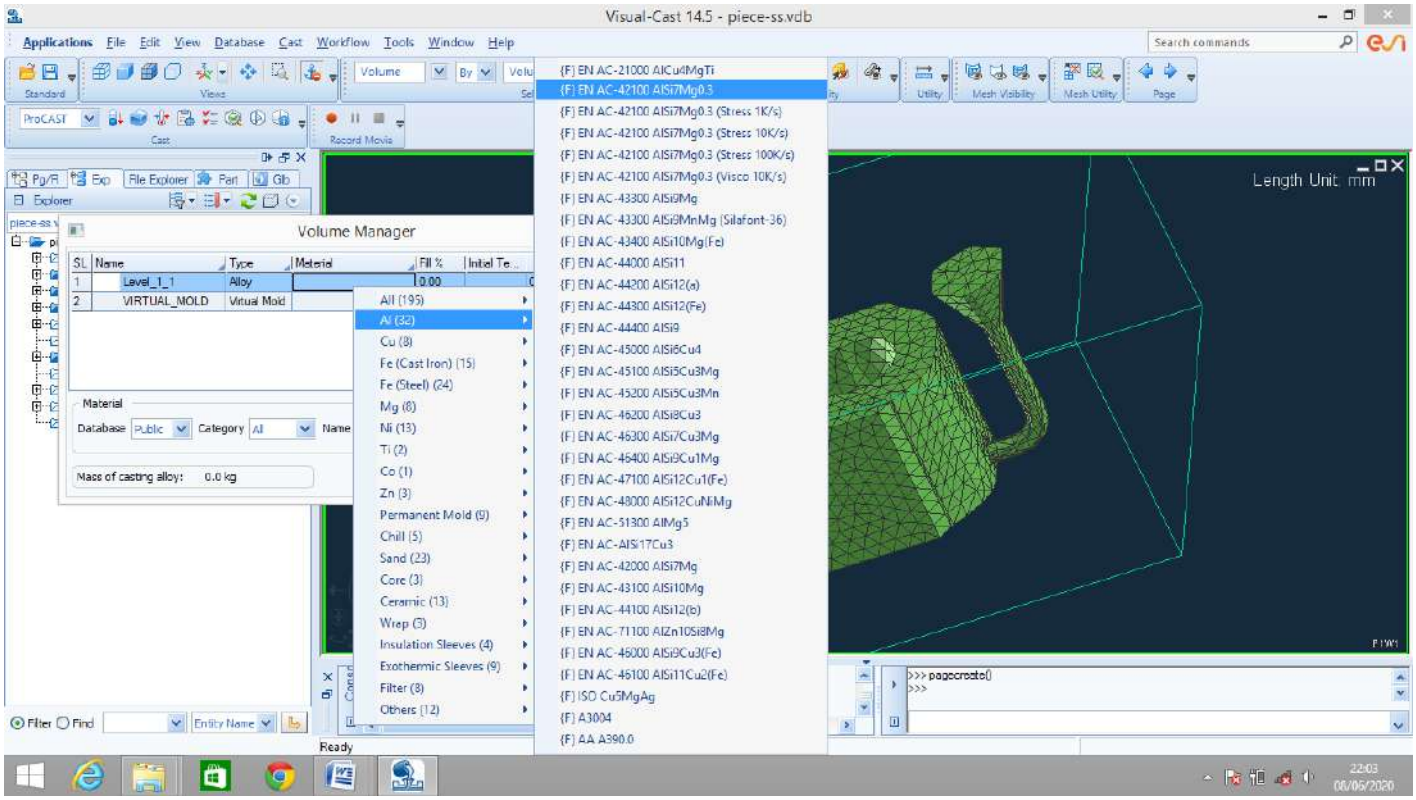


Figure 42: *Le jet de coulée*

IV.2.2.2.3-DÉFINITION DES CONDITIONS D'ENTRÉE DU MÉTAL

Il sert à définir les conditions d'entrée du métal à l'intérieur du moule. Pour cela il est nécessaire de créer un volume d'entrée (de forme parallélépipédique voir figure 43) qui correspond à la taille et à l'emplacement du jet de métal.

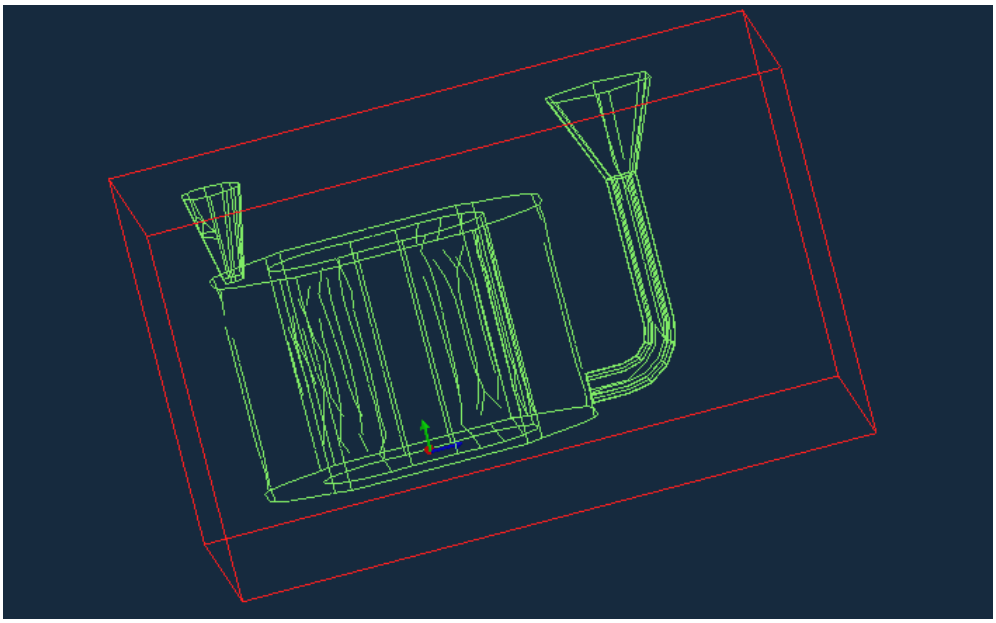


Figure 43: *Volume d'entrée de forme parallélépipédique*

IV.2.2.2.4-Interface HTC manager

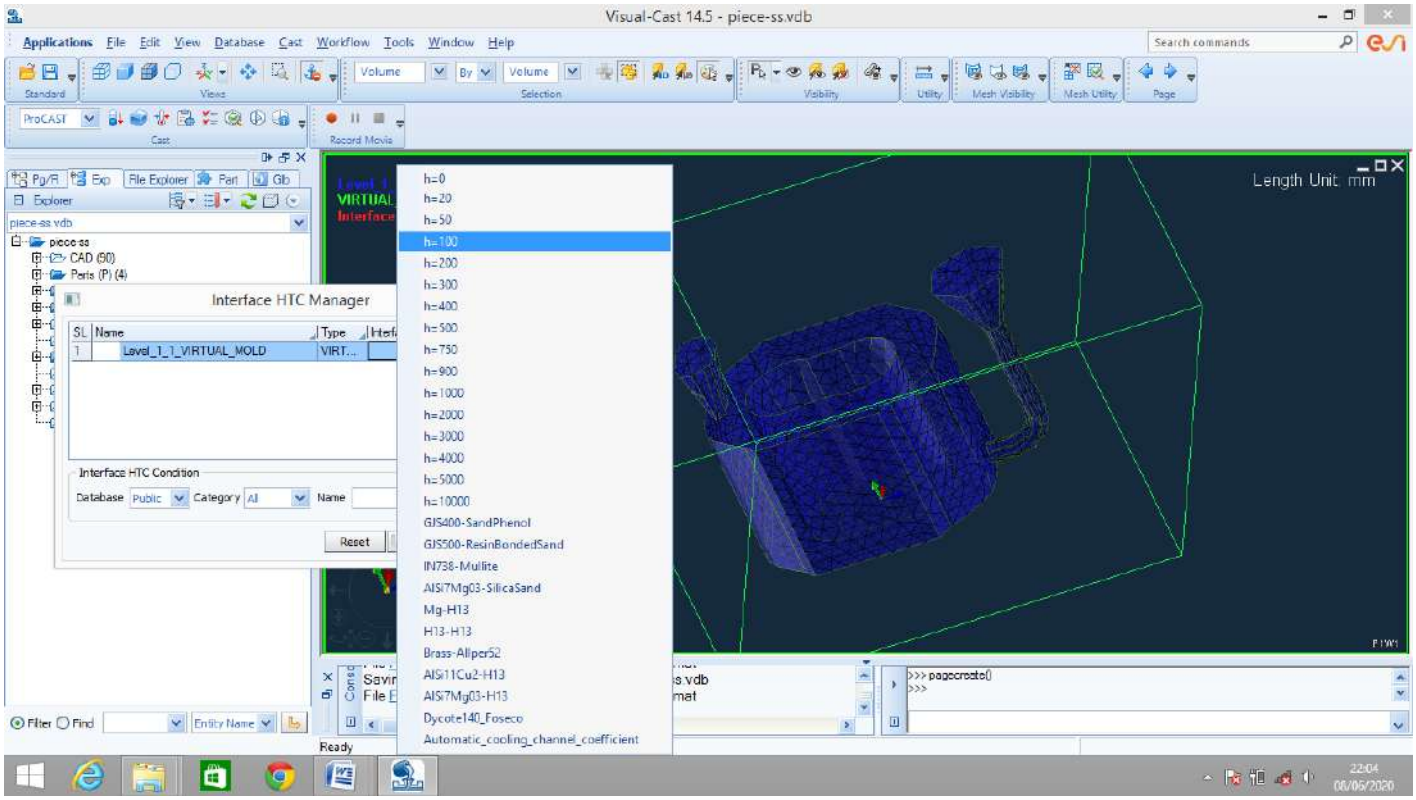


Figure 44: *Interface HTC manager*

IV.2.2.2.5-Simulation paramètres

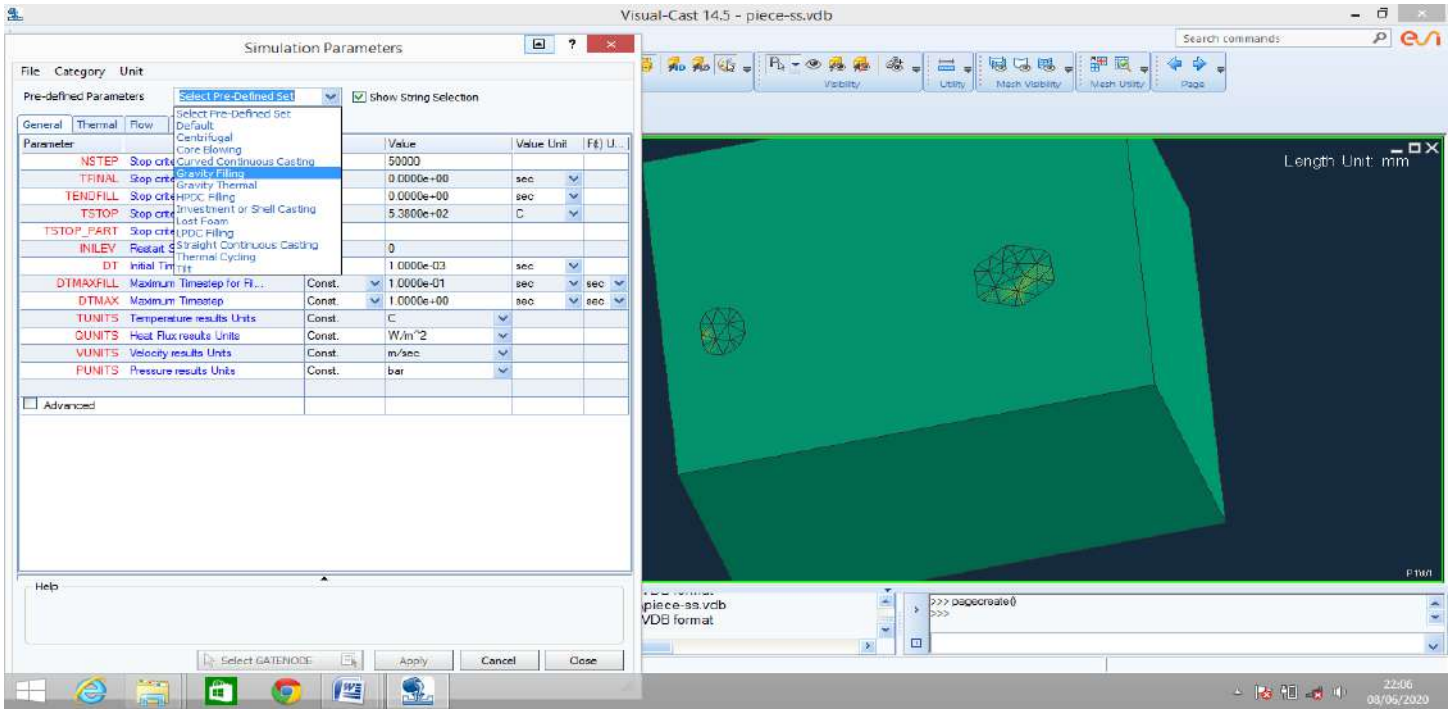


Figure 45*: Simulation paramètres*

IV.2.2.2.6-DÉFINITION DES CONDITIONS INITIALES DES CALCULS

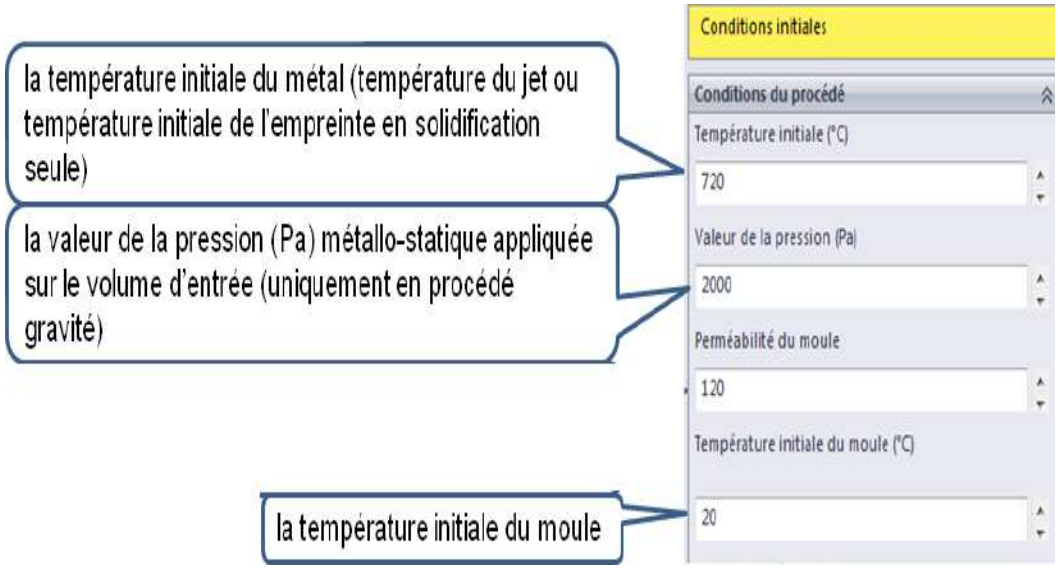


Figure 46: *Des conditions initiales des calculs*

IV.2.2.2.7-vérification des données

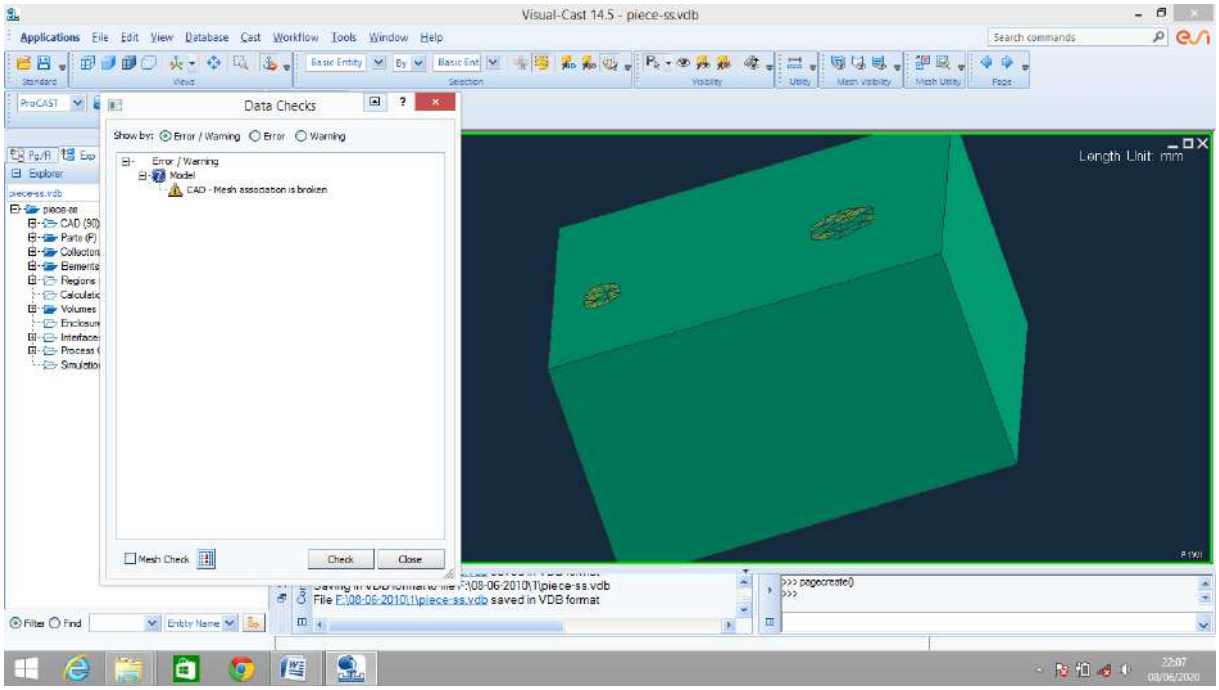


Figure 47: *vérification des données*

REMARQUE

Apres le lancement de la simulation, le programme après un long calcul des dimensions données, il affiche un message d'erreur provenant d'un problème dans le logiciel vu que c'est une version incomplète.

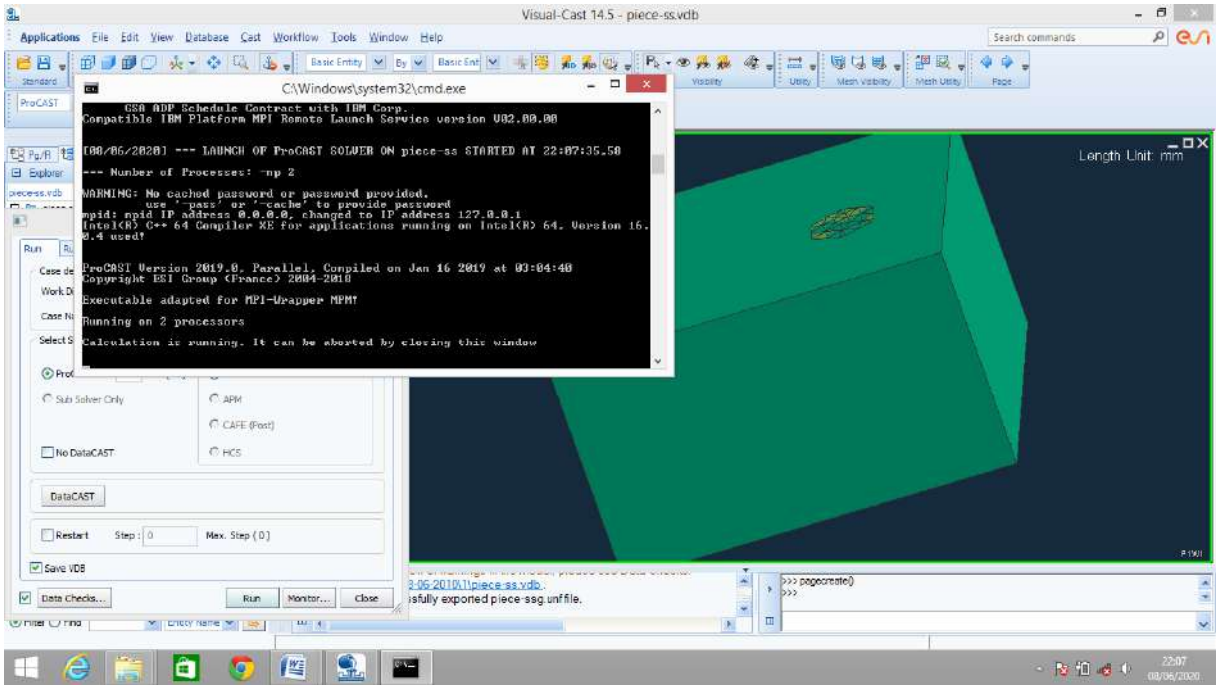


Figure 48: *Message d'erreur*

IV.2.3-Animation

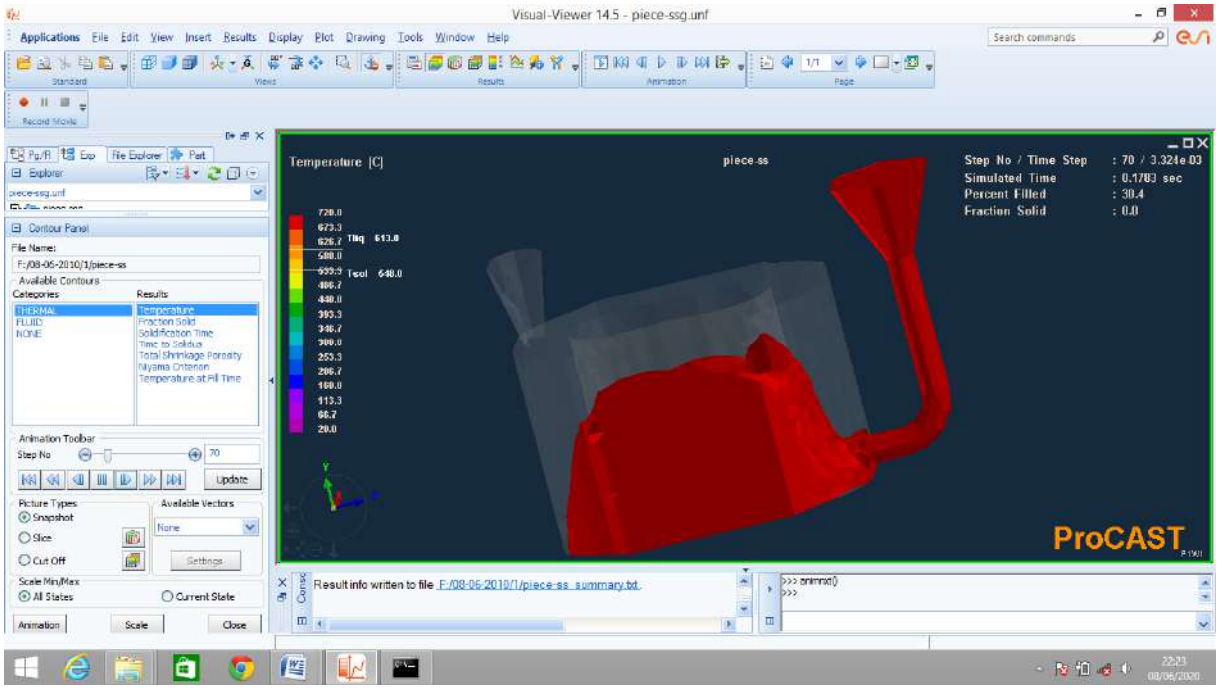


Figure 49:*coulage*

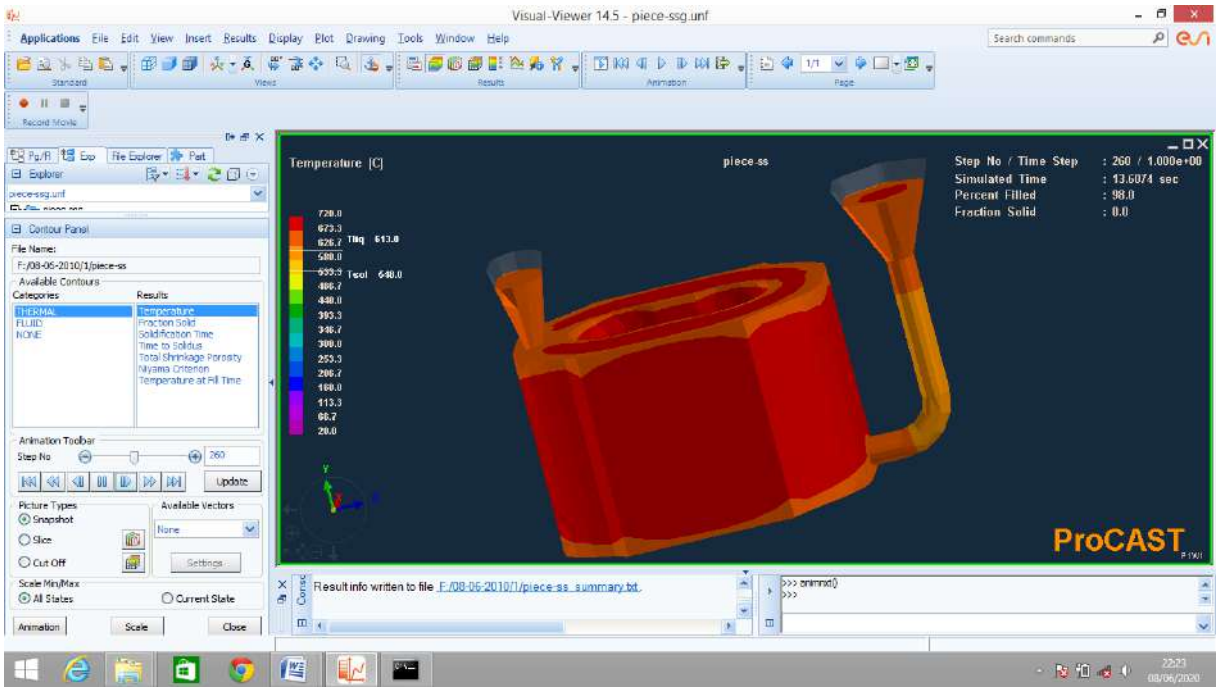


Figure 50: *variation thermique*

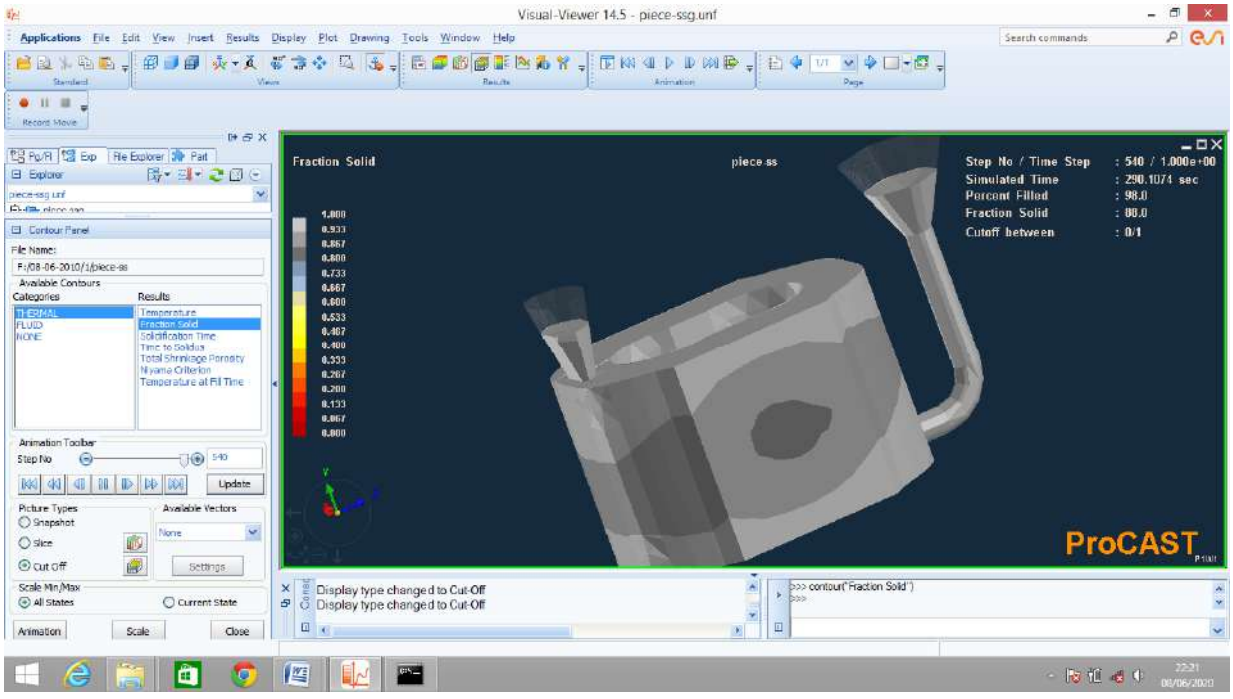


Figure 51:*fraction solide*

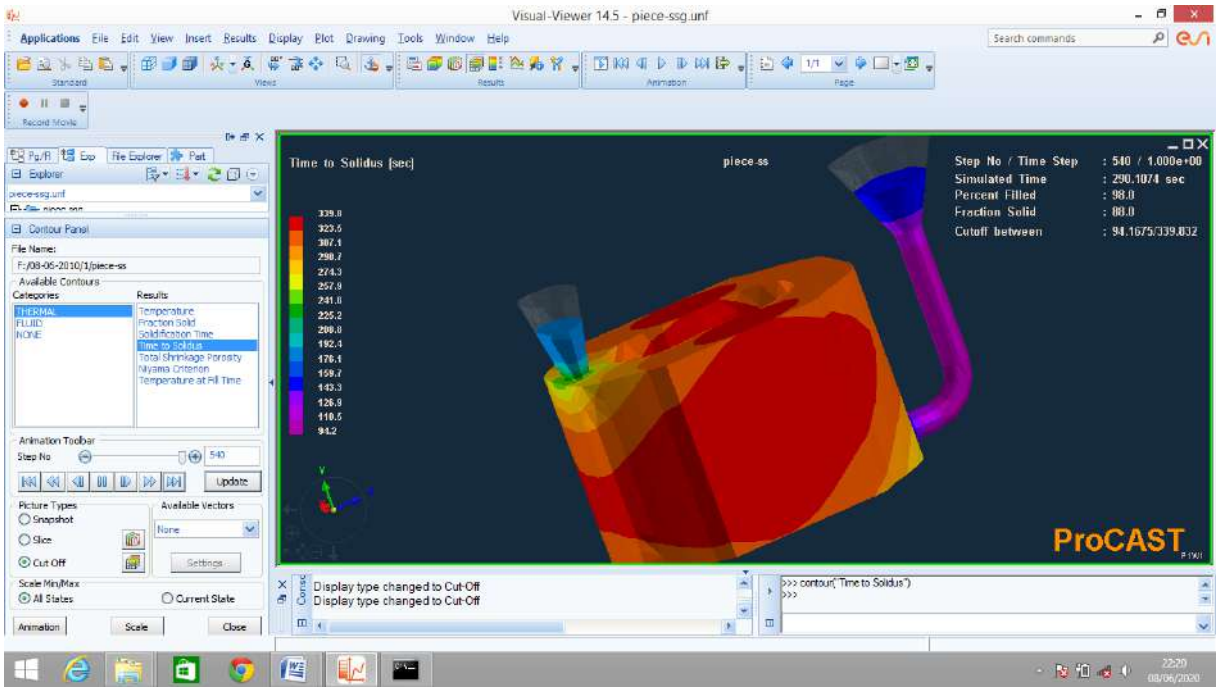


Figure 52:*temps pour solidus*

IV.2.4- Résultat d'analyse

IV.2.4.1-Porosité

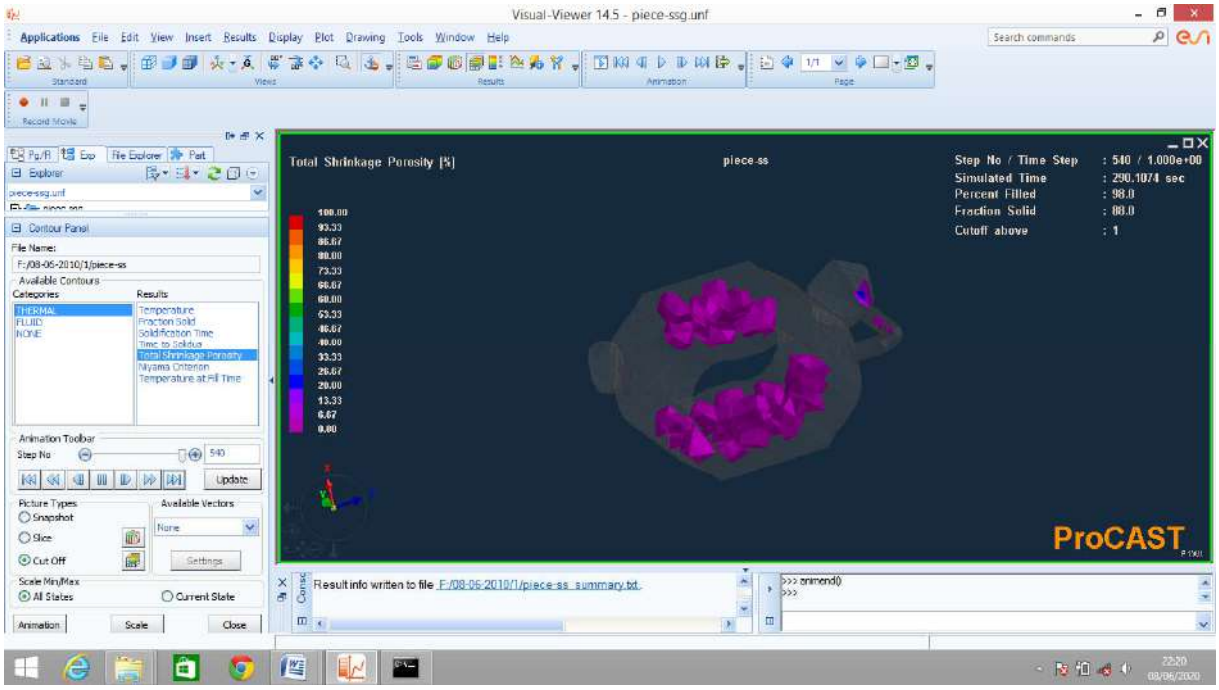


Figure 53:*porosité de retrait*

Bien que les méthodes d'optimisation informatisées pour une application en mécanique structurelle disponibles depuis plusieurs années, ils ne sont pas très populaires. Il y a plusieurs raisons à cela :

1. La modélisation pour l'optimisation informatique est souvent complexe et prend beaucoup de temps
2. Les résultats et la qualité de l'optimisation dépendent fortement des conditions limites et des cas de charge
3. Les modèles optimisés sont parfois difficiles à interpréter et/ou à produire en réalité

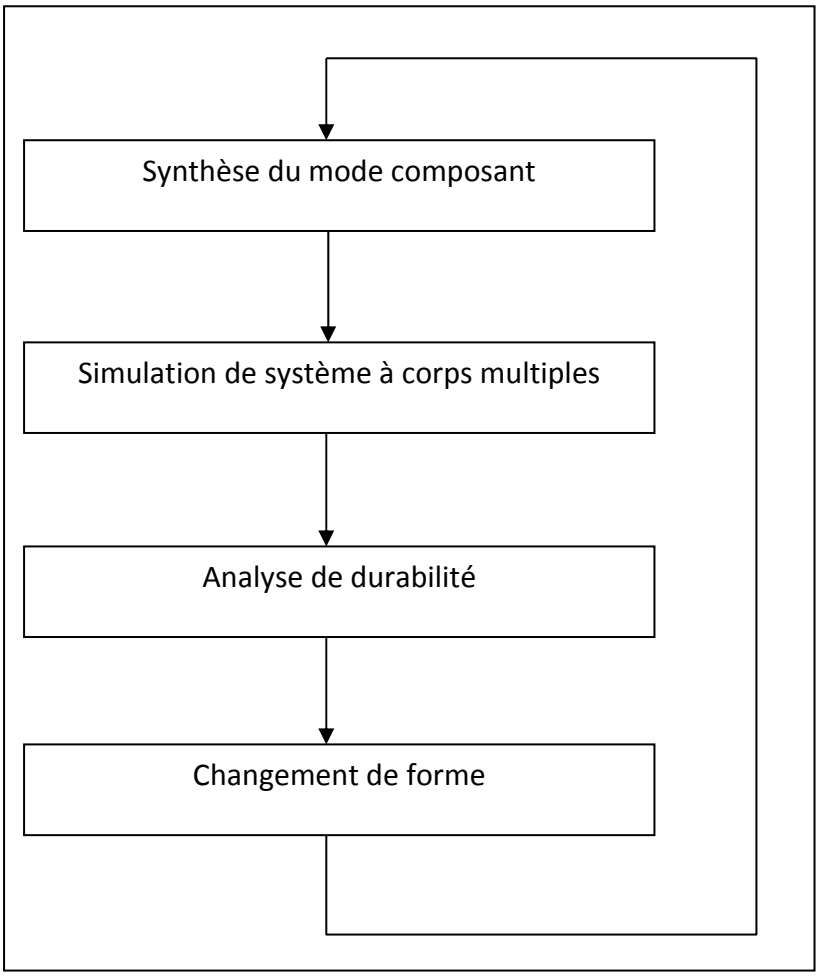


Figure 54: *étapes du processus d'optimisation*

IV.2.4.2-Résultat d'analyse Pro-Cast pour différentes hauteurs de masslotte

Tableau 5:hauteur de masslotte et porosité de retait

hauteur de masslotte(mm)	porosité de retait(%)
140	6.5
150	12.9
160	5.4

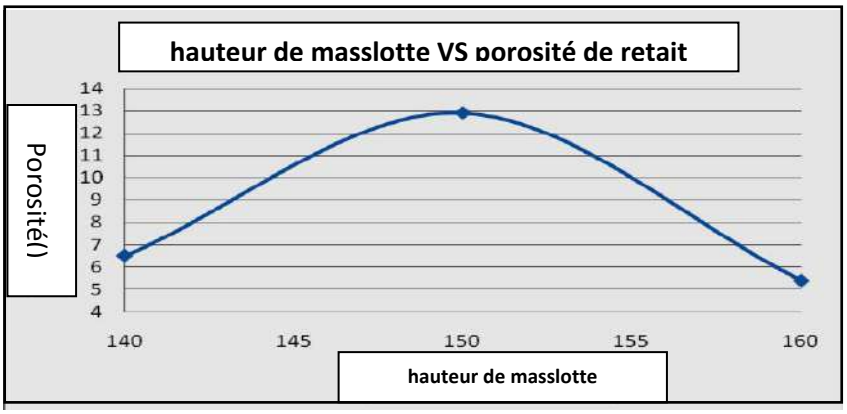


Figure 55: *hauteur de masslotte VS porosité de retait*

IV.2.4.3-Résultat d'analyse Pro-Cast pour différentes hauteurs canal de d'alimentation

Tableau 6: hauteurs canal de d'alimentation et porosité de retrait

hauteur de canal de d'alimentation (mm)	porosité de retait(%)
16	4.78
18	2.43
22	8.2

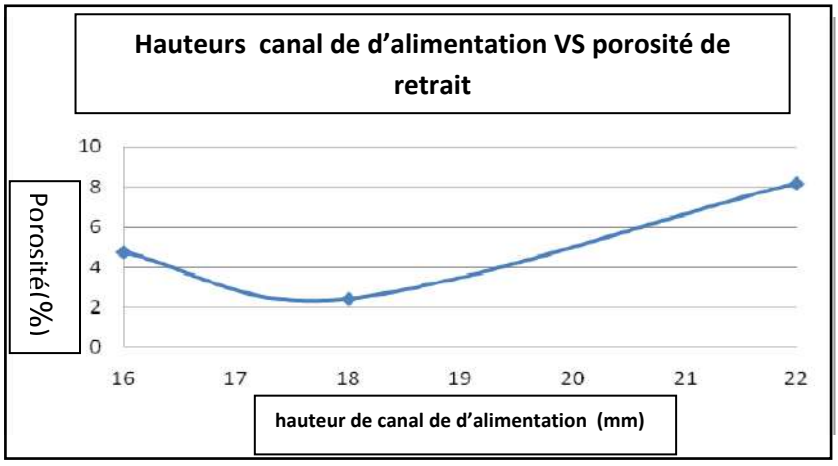


Figure 56: *Hauteurs canal de d'alimentation VS porosité de retrait*

Après avoir trouvé l'effet individuel sur la porosité de rétrécissement , nous avons combiné les deux paramètres comme hauteur masslotte et canal d'alimentation pour trouver un effet combiné sur la porosité de rétrécissement qui montre que 18 mm La hauteur du canal d'alimentation et la combinaison de hauteur de 160 mm donnent une porosité de 6,70 % n'est pas optimal. Hauteur du canal d'alimentation 18 mm - Hauteur de masslotte 160 mm

IV.3-Conclusion

La technologie de simulation de moulage a suffisamment mûri et est devenue un outil essentiel pour dépannage des défauts de coulée et optimisation des méthodes. Il permet l'assurance de la qualité et sans essais en atelier, et réduit considérablement le délai pour le premier bon échantillon Jeter.

En déplaçant le processus d'essais et d'erreurs dans le monde virtuel et en différentes options de conception et de processus. En minimisant les essais et les erreurs du monde réel (et les surprises) faire des castings à droite la première fois.

D'après les travaux de thèse ci-dessus, nous avons constaté que lorsque la hauteur du riser est passée de 130 à 160 La porosité du rétrécissement est augmentée, mais pas en proportion linéaire. Un autre paramètre qui a des effets sur la porosité de rétrécissement est la hauteur du coureur. Nous avons changé la hauteur du coureur de 16 à 22 entre ces valeurs optimales pour la hauteur du coureur est de 18 avec la porosité minimale de rétrécissement 2,43% et réduit le taux de rejet de casting de 30%.

V-Conclusion Générale :

Le moulage en coquille permet d'obtenir une pièce à partir d'un moule métallique, une coquille, constitué de plusieurs éléments assemblés entre eux ; la cavité intérieure ou empreinte a la forme extérieure de la pièce à réaliser. L'alliage en fusion est versé par l'intermédiaire d'un orifice et le remplissage se fait sous la seule action du poids de l'alliage.

Le moulage en coquille par gravité offre plusieurs avantages, comme 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. En respectant des règles de tracé, le procédé de moulage en coquille permet une précision et une constance dans les dimensions des pièces, la simplification et la réduction de l'usinage, la réalisation de pièces aux formes internes complexes.

Concevoir une coquille consiste non seulement à placer l'empreinte et le plan de joint, mais aussi, à positionner et dimensionner les systèmes d'alimentation et de remplissage.

Notre projet de fin d'études consiste à réaliser une coquille métallique pour la coulée une pièceen aluminium par la conception et l'analyse d'un moule permanent d'un corps de pompe en utilisant le logiciel SOLIDWORKS.

Cependant, la durée de ce stage s'avère très courte par rapport à la réalisation d'un projet telle que l'étude et la conception d'un moule permanent.

Une recherche bibliographique approfondie et l'utilisation du logiciel de conception PROCAST nous ont permis d'aborder la conception et la réalisation du moule.

Le logiciel PROCAST est utilisé pour déterminer la conception d'un système de coulée et d'alimentation le plus adapté, gérant la répartition de la chaleur et simuler les procédés de moulage. Les pièces coulées suivant cette configuration sont exempte de tout défaut de fonderie à savoir les retassures et les défauts de gaz.

Pour conclure, ce stage nous a offert la possibilité de mettre en pratique les connaissances acquises lors de nos études et l'opportunité de nous initier dans le monde professionnel.

Liste de références bibliographiques

[1] : Mme BOUGHERARA Ahlem, Etude de la corrélation entre les propriétés mécaniques Et la température des traitements thermiques d'un alliagefer/cuivre. Edition 2013/2014

[2] : Lionel MARTIN, Intégration du métier de la fonderie dans les processus de conception méthodologies et outils associés, L'école nationale supérieure d'arts métiers. Edition 2006

[3] : Adrien Toros, Jorge Zarate, Benoît Denkinger, Méthode de productions Moulage des Métaux, école polytechnique fédérale de Lausanne. Edition 2012

[4] : Fonderie des non ferreux à bas point de fusion, Automatisée et à couler par gravité, 2001

[5] : Asma Haddouche, Caractérisation physico-chimique des alliages d'Aluminium utilisés comme matériau de revêtement mural, Université Med Khider Biskra, Edition 2013/2014

[6] : GUIDE FOR CASTING DIGITAL RADIOGRAPHY, guide pour la radiographie numérique des pièces moulées D. Lavastre 1,

[7] : F.BLANCHARD (cram ile-de France), B.COURTOIS (inrs paris), C.ROBIN (cram) Rhône-Alpes, institut nationale de recherche et de sécurité, consulte en 2016

[8] : Chang Qing Zherng, Étude et évaluation des procédés de fabrication des pièces de Suspension d'automobile en alliage d'aluminium, L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, Edition 2009

[9] : Editions Techniques des Industries de la Fonderie, Maîtrise de l'Energie dans l'Industrie de la Fonderie, **N° ISBN** : 978-2-7119-0277-4, **Dépôt légal** : 4ième trimestre 2013,**Date d'édition** : Octobre 2013

[10] : **commission européenne,** forges et fonderie, ministre de l'écologie de l'énergie de développement durable et de la mer, édition mai 2005

[11] : **Sylvio Quesnel, ING**, université de Montréal, essai sous gradient thermique du corindonage des réfractaire : application aux fours de traitement de l'aluminium, édition décembre 1996

[12] : http://www.secodir.fr/

[13] : http://www.fonderie-aluminium-sesam.fr/

[14] : http://www.fonderie-roux-gallois.com/