

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République démocratique populaire algérienne

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Mohamed Boudiaf University of M'Sila

Faculty of Technology



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي جامعة المسيلة

جامعة محمد بوضياف المسيلة

كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Présenté par

Gaoudi Mouhamed Elarbi et Hamani Salah-Eddine El Ayyoubi

Thème

**Contribution à l'étude d'un système de coulée pour le moulage d'une
jante de roue de moto**

Présentée devant le jury composé de :

Nom Prénom	Grade	Qualité
MAKRI HOCINE	Pr	Encadrant
DJERAD Adelkader	Dr	Président
MOSTAPHA Hocine	Dr	Examineur

Année Universitaire 2025/ 2026

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie tout particulièrement notre encadrant, Pr. MAKRI Hocine, pour son encadrement et ses conseils pertinents, sa disponibilité ainsi que son soutien tout au long de ce projet. Ses orientations ont été déterminantes pour l'aboutissement de ce travail.

Je remercie également mon camarade de travail Hamani Salah Eddine el Ayyoubi, pour sa collaboration, son sérieux et son aide constante durant toutes les étapes de ce projet.

J'adresse aussi mes remerciements les plus sincères à mes parents pour leur soutien inconditionnel, leurs sacrifices et leurs encouragements permanents tout au long de mon parcours universitaire.

Je tiens à exprimer une reconnaissance toute particulière à ma mère, dont l'amour, la patience et les prières ont été une source essentielle de motivation et de force pour moi.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à ma famille et à toutes les personnes qui m'ont soutenu moralement et encouragé tout au long de mon parcours universitaire.

Gaoudi Mouhamed El Arbi

DÉDICACES

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents, en témoignage de ma profonde gratitude pour leur amour, leur soutien indéfectible, leurs sacrifices et leurs prières qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours. Que ce travail soit le reflet de ma reconnaissance envers eux.

À ma mère, qui représente pour moi une source inépuisable de tendresse, de patience et de motivation. Son amour et ses encouragements m'ont toujours donné la force de continuer.

À mon père, pour ses efforts, ses conseils et son soutien moral et matériel.

À mon camarade et binôme Hamani Salah eddine el ayyoubi, en reconnaissance de sa collaboration, de son sérieux et de son aide précieuse durant la réalisation de ce projet.

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin durant mes études.

Gaoudi Mouhamed El Arbi

Abstract: The determination of a sand casting system is based on the design of a network allowing for laminar filling (without turbulence), progressive and without mold defects by the molten metal. Key principles include sizing according to the metallostatic charge, choosing the type of sand (green or chemical-setting sand), the position of the part, and optimizing attacks and weights to control solidification. This master's thesis is part of a scientific and technical contribution to the study, design and sizing of a casting system for sand molding a motorcycle wheel rim in aluminum alloy A356. The main objective of this work was to develop a rigorous methodology for designing all the components of the foundry system, including the model, the footprint, the core, the feeder system and the weights, while respecting the technological, metallurgical and industrial constraints specific to the sand moulding process. To achieve this objective, the thesis has been structured around two complementary parts: an in-depth bibliographic study devoted to foundry processes and a practical study on sizing calculations and analysis of casting parameters.

Keywords: Sand moulding - motorcycle rim - casting system - alloy rim

يعتمد تحديد نظام صب الرمل على تصميم شبكة تسمح بالملء الصفحي (بدون اضطراب) والتدريجي وبدون عيوب القالب بواسطة المعدن المنصهر. تتضمن المبادئ الأساسية تحديد الحجم وفقاً للشحنة المعدنية الساكنة، واختيار نوع الرمل (الرمل الأخضر أو الرمل الكيميائي)، وموضع الجزء، وتحسين الهجمات والأوزان للتحكم في التصلب. تعد أطروحة الماجستير هذه جزءاً من مساهمة علمية وتقنية في دراسة وتصميم وتحديد حجم نظام الصب لقولبة حافة عجلة دراجة نارية بالرمل من سبائك الألومنيوم A356. كان الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تطوير منهجية صارمة لتصميم جميع مكونات نظام المسبك، بما في ذلك النموذج والبصمة والنواة ونظام التغذية والأوزان، مع احترام القيود التكنولوجية والمعدنية والصناعية الخاصة بعملية صب الرمل. ولتحقيق هذا الهدف، تم تنظيم الأطروحة حول جزأين متكاملتين: دراسة بيبليوغرافية متعمقة مخصصة لعمليات المسبك ودراسة عملية حول حسابات الحجم وتحليل معلمات الصب.

الكلمات المفتاحية: صب الرمل - إطار الدراجة النارية - نظام الصب - إطار السبائك

Resume: La détermination d'un système de coulée en sable repose sur la conception d'un réseau permettant un remplissage laminaire (sans turbulences), progressif et sans défauts du moule par le métal en fusion. Les bases clés incluent le dimensionnement selon la charge métalostatique, le choix du type de sable (sable vert ou à prise chimique), la position de la pièce, et l'optimisation des attaques et masselottes pour maîtriser la solidification. Le présent mémoire de Master s'inscrit dans le cadre d'une contribution scientifique et technique à l'étude, à la conception et au dimensionnement d'un système de coulée destiné au moulage en sable d'une jante de roue de moto en alliage d'aluminium A356. L'objectif principal de ce travail consistait à développer une méthodologie rigoureuse permettant de concevoir l'ensemble des éléments constitutifs du système de fonderie, notamment le modèle, l'empreinte, le noyau, le système d'alimentation et les masselottes, tout en respectant les contraintes technologiques, métallurgiques et industrielles propres au procédé de moulage en sable. Pour atteindre cet objectif, le mémoire a été structuré autour de deux volets complémentaires : une étude bibliographique approfondie consacrée aux procédés de fonderie et une étude pratique portant sur les calculs de dimensionnement et l'analyse des paramètres de coulée.

Mots clés : Moulage en sable- jante de moto – système de coulée – jante en alliage

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Classement des procédés de moulage	16
Figure I.2. Les éléments d'un moule au sable	17
Figure I.3. Ordre d'exécution d'un moulage au sable	18
Figure I.4. Moulage en coquille (Shell molding)	20
Figure I.5. Moulage sous pression (Die casting)	22
Figure I.6. Moulage à la cire perdue (Investment casting)	23
Figure I.7. Moulage centrifuge	25
Figure I.8. Moulage en moule métallique (Permanent mold casting)	26
Figure I.9. Moulage continu	27
Figure I.10. Châssis de moulage	34
Figure I.11. Moule monobloc	35
Figure I.12. Moule en 2 parties	35
Figure I.13. Moule en 3 parties	36
Figure I.14. Classement des modèles	36
Figure I.15. Dimensionnement du modèle	37
Figure I.16. Préparation de l'empreinte et mise en place du noyau	41
Figure I.17. Portées de noyaux dans le cas d'un noyau vertical et horizontal	42
Figure I.18. Jeux pour portées de noyaux	42
Figure I.19. Système de coulée	44
Figure I.20. Différentes positions des systèmes de coulée	45
Figure I.21. Caractéristiques dimensionnelles du trou de coulée	46
Figure I.22. Position du canal de coulée en haut par rapport à la cavité	46
Figure I.23. Position du canal de coulée en dessous par rapport à la cavité	46
Figure I.24. Position de part et d'autre du canal de coulée par rapport à la cavité	47
Figure I.25. Identification des sections du système de coulée	47
Figure I.26. Critères de sélection des parois	47
Figure I.27. Abaque reliant les raccordements aux épaisseurs des parois	48
Figure I.28. Définition des raccordements des parois	48
Figure I.29. Définition des raccordements en Y	51
Figure I.30. Définition des raccordements en X	51
Figure I.31. Critères de choix des nervures sur les moules	53
Figure I.32. Abaques de détermination des alésages sur les moules cas des cylindres	54
Figure I.33. Abaques de détermination des alésages sur les moules cas des plaques	54
Figure I.34. Adoption des formes de renfort des alésages sur les moules	54
Figure I.35. Formes des bossages à adopter sur les moules	55
Figure I.36. Différents types de masselottes	57
Figure II.1. Marquage des jantes en alliage [34].	64
Figure II.2. Liste des profils de coupe d'une jante avec une inclinaison de la paroi de 5° [37]. ...	64

Figure II.3. Principaux pays producteurs d'aluminium en fonderie dans le monde, de 2013 à 2022 (en milliers de tonnes) [42].....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.4. Découpage de la tôle en acier [53].	68
Figure II.5. Conception d'une plaque d'acier conformée à la forme d'une jante [54].	69
Figure II.6. Conception de tôles d'acier soudées et conformées [54].	69
Figure II.7. Tronçonnage et rabotage de la tôle [54].	70
Figure II.8. Premier évasement [54].	70
Figure II.9. Trois formes de rouleaux de la jante [53].	71
Figure II.10. Formage final par laminage [54].	71
Figure II.11. Poinçonnage du trou de la valve [54].	72
Figure III.8. Disque estampé [53].	73
Figure III.9. Perçage des disques [53].	73
Figure III.10. Presse d'assemblage [54].	Erreur ! Signet non défini.
Figure III.11. Pressage du disque sur la jante [54].	74
Figure III.12. Soudage Mig-Mag du disque à la jante [53].	75
Figure III.13. Processus de phosphatation [53].	75
Figure III.14. Processus de fusion [55].	76
Figure III.15. Remplissage du creuset par le laitier de coulée [56].	77
Figure III.16. Opération de coulée d'alliages de jantes [4].	76
Figure III.17. Schéma du processus LPDC [57].	78
Figure III.18. Schéma du processus d'extrusion [58].	79
Figure III.19. Opérations d'usinage des jantes en alliage [56].	80
Figure III.20. Ébavurage et finition de la jante [55].	80
Figure III.21. Contrôle de la qualité des jantes en alliage [55].	81
Figure III.1. La roue de moto	83
Figure III.2. La jante de moto	83
Figure III.3. Dessin de définition de la jante	84
Figure III.4. Conception du modèle et du système de coulée sous SolidWorks	85
Figure III.5. Création du moule 3D dans Solidworks	86
Figure III.6. Visualisation de l'intérieur du moule	87
Figure III.7. noyau du la jante de moto	89
Figure III.8. Volume des rayons.....	89
Figure III.9. Roue de moto – moulage en aluminium.....	93
Figure III.10. système de moulage Selon la pression	94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I 1.Composition et propriétés des sables pour moulage des aciers	31
Tableau 2Composition et propriétés des sables pour moulage des alliages non ferreux.....	31
Tableau I 3.Valeurs de retrait pour les matériaux (en mm/mm de long)	39
Tableau I 4. Valeurs des dépouilles pour modèles selon la matière et selon l'usage.....	40
Tableau I 5.Valeurs des surépaisseurs d'usinage pour modèles	41
Tableau I 6. Longueurs de supports de noyaux	43
Tableau I 7. Angles de dépouille pour les supports de noyaux.....	43
Tableau I 8. Valeurs des coefficients de perte de charge pour le dispositif de coulée	44
Tableau I 9. Caractéristiques dimensionnelles des parois	48
Tableau I 10. Caractéristiques dimensionnelles raccordements	49
Tableau I 11.Caractéristiques dimensionnelles raccordements en T	50
Tableau I 12. Caractéristiques dimensionnelles raccordements en V	50
Tableau I 13.Caractéristiques dimensionnelles raccordements en Y	51
Tableau I 14. Caractéristiques dimensionnelles raccordements en X.....	52
Tableau I 15. Le retrait dans les masselottess.....	58
Tableau I 16. Tableau des approximations V/Scontact.....	59
Tableau II 1.Compositions des alliages Al-Si commerciaux les plus utilisés [40].....	66

SOMMAIRE

CHAPITRE I LE MOULAGE

I.1.Introduction	15
I.2.Classification des procédés de fonderie.....	15
I.3. Etude comparative des procédés de moulage	16
I.4. Le moulage en sable	16
I.4.1. Terminologie du moulage en sable.....	17
I.5.Moulage en sable manuel	19
I.6.Moulage mécanique (à la machine)	19
I.6.1. Avantages du moulage en sable.....	19
I.6.2. Inconvénients du moulage en sable	20
I.7. Moulage en coquille (Shell molding)	20
I.7.1. Avantages du moulage en coquille	20
I.7.2. Inconvénients du moulage en coquille.....	21
I.8. Moulage sous pression (Die casting).....	21
I.8.1. Avantages du moulage sous pression	22
I.9. Moulage à la cire perdue (Investment casting).....	23
I.9.1. Avantages du moulage à la cire perdue	23
I.9.2. Inconvénients du moulage à la cire perdue	24
I.10. Moulage centrifuge	24
I.10.1. Avantages du moulage centrifuge	25
I.10.2. Inconvénients du moulage centrifuge.....	25
I.11. Moulage en moule métallique (Permanent mold casting)	26
I.11.1. Avantages du moulage en moule métallique	26

I.11.2. Inconvénients du moulage en moule métallique.....	27
I.12. Moulage continu.....	27
I.12.1. Avantages du moulage continu.....	28
I.12.2. Inconvénients du moulage continu	28
I.13. Le sable de fonderie	28
I.13.1. Composition du sable de moulage	29
I.13.2. Sable à noyaux.....	32
I.13.3. Taille des grains :.....	33
I.13.4. Indice de finesse AFS :	33
I.13.5. Uniformité.....	33
I.14. Le châssis	33
I.15. Le moule.....	34
I.15.1. Moule à un élément.....	35
I.15.2. Moule à deux éléments.....	35
I.15.3. Moule à plusieurs éléments	35
I.16. Le modèle (gabarit).....	36
I.17. Le retrait	37
I.17.1. Retrait en pipe :.....	38
I.17.2. Retrait uniforme.....	38
I.17.3. Retrait en cavité interne	38
I.17.4. Retrait en micro porosités	38
I.18. Les dépouilles.....	39
I.19. Surépaisseurs d'usinage	40
I.20.1. Les portées de noyau.....	41

I.21. Dépouilles pour les noyaux.....	43
I.22. Le système de coulée	43
I.23. Le cône de coulée.....	44
I.23.1. Selon la position.....	46
I.24. Les parois	47
I.25. Les raccords	49
I.26. Les nervures.....	52
I.28. Les bossages.....	54
I.29. Le débit de coulée.....	55
I.30. La vitesse de coulée	55
I.31. L'aire de choc.....	56
I.32. Masse totale de métal à considérer	56
I.33. La masselotte	56
I.34. Temps de solidification du riser	58
I.35. Temps de remplissage	59
I.36. Le temps de coulage	59

CHAPITRE II. LES JANTES DES ROUES

II.1. Introduction	61
II.2. Types de jantes	61
II.2.1. Jantes en aluminium.....	61
II.2.2. Jantes en métal.....	62
II.2.3. Jantes en alliage	62
II.3. Dimensions des jantes.....	63

II.4.1. Pays exportateurs de l'aluminium et des alliages d'aluminium.....	Erreur ! Signet non défini.
II.4.2. Fournisseurs algériens de la matière première	Erreur ! Signet non défini.
II.5.1. Leaders mondiaux des jantes	Erreur ! Signet non défini.
II.5.2. Fabricants chinois des jantes	Erreur ! Signet non défini.
II.5.3. Fabricants indiens des jantes.....	Erreur ! Signet non défini.
II.5.4. Fabricants turcs	Erreur ! Signet non défini.
II.5.5. Fabricants italiens	Erreur ! Signet non défini.
II.6. Conclusion	67
II.7. 1. Introduction	68
II.7.2. Procédés de fabrication des jantes en métal.....	68
II.7.3. Procédés de fabrication des jantes en alliage	75
II.7.4. Conclusion	81

CHAPITE III. DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE COULEE

III.1.Conception de la roue de moto.	83
III.2. Conception 3D de la jante.	83
III.4.Conception du modèle et du système de coulée sous SolidWorks	85
III.5.Création du moule 3D dans Solidworks.....	86
III.6.Visualisation de l'intérieur du moule	87
III.7. Détermination du modèle de moulage.....	88
CONCLUSION GENERALE.....	101

Introduction générale

Le moulage est l'un des procédés de production de pièces mécanique complexes le plus utilisé, outre la complexité de la forme il permet d'obtenir en grande série à un coût optimisé, des pièces de différentes formes, tailles et matériaux, résistantes, fidèles aux dessins. Il permet de réduire le gaspillage, offrant une liberté de conception pour des structures internes impossibles à usiner.

L'avantage du moulage réside dans sa capacité à produire des formes internes et externes complexes, incluant des détails fins, en un seul cycle. Ce qui lui permet de se présenter comme un procédé idéal pour les grandes séries grâce à des temps de cycle courts (notamment le moulage sous pression), réduisant le besoin de finitions. De plus, il est adapté à une large gamme d'alliages métalliques (fonte, acier, aluminium, etc.), offrant une haute résistance. Produit des pièces « proches de la forme finale » (near-net-shape), minimisant les chutes de matière.

Puisque les procédés de moulage incluent le moulage en sable destiné aux pièces de grande taille, moins précises et le moulage sous pression pour pièces de haute précision, en alliages non ferreux, Il est devenu indispensable dans divers domaines de l'industrie mécanique, notamment ; l'automobile, l'aérospatiale et la fabrication de machines en général.

Le matériel utilisé en moulage conditionne la réussite du procédé de moulage, surtout pour le cas du moulage en sable. Ce matériel est constitué en premier lieu du modèle qui est la réplique de la pièce à obtenir, il doit être fidèle à la forme et aux dimensions de la pièce à couler. En deuxième lieu le sable de moulage, qui compose le moule autrement dit le négatif du modèle et en dernier lieu, le système de coulée formé par les conduits et ouvertures permettant l'acheminement du métal en fusion vers l'empreinte créée dans le sable.

La détermination d'un système de coulée en sable repose sur la conception d'un réseau permettant un remplissage laminaire (sans turbulences), progressif et sans défauts du moule par le métal en fusion. Les bases clés incluent le dimensionnement selon la charge métallostatique, le choix du type de sable (sable vert ou à prise chimique), la position de la pièce, et l'optimisation des attaques et masselottes pour maîtriser la solidification.

Tout au long du processus de fonderie, des phénomènes physiques et chimiques à l'ambiante ou à chaud – souvent complexes – agissent en permanence sur les éléments constituant le moule ; sur le sable, sur les noyaux et les enduits de protection (polymérisation, condensation, échauffement, refroidissement, pollution du sable par une matière intégrée involontairement, ...) et peuvent modifier ou dégrader leur comportement d'usage. Le succès du procédé de moulage dépend donc du matériel et des conditions opératoires, c'est dans cette optique que nous avons bien voulu apporter notre contribution par ce modeste travail.

Notre mémoire se compose de trois chapitres relatifs au procédé de moulage en sable

et à la conception du moule. Dans le premier chapitre, nous présentons les sables de moulage à cause de son importance du point de vue, nature, constitution, les caractéristiques spécifiques et les différentes additions. Nous évoquons aussi les propriétés essentielles d'un sable de moulage à savoir, les propriétés mécaniques telles que la compressibilité, la perméabilité aux gaz qui revêt une importance capitale pour cette étude.

Le deuxième chapitre est dédié aux jantes, nous avons présenté dans ce dernier les types, caractéristiques et les dimensions des jantes en alliage d'aluminium, quant au troisième chapitre est réservé aux calculs du système de coulée.

Le 3eme chapitre traite la conception de la jante sous SolidWorks et le calcul du système de coulée.

Nous terminons bien sûr par une conclusion

CHAPITRE I. LE MOULAGE

I.1.Introduction

La fonderie est un procédé de fabrication qui englobe l'ensemble des techniques de mise en œuvre pour obtenir un objet par coulée d'un métal en fusion dans une empreinte appelée moule qui peut être en sable ou métallique.

La fabrication d'une pièce par fonderie consiste donc à verser un métal ou un alliage à l'état liquide (par gravité, par pression ou forces centrifuges) dans une empreinte (sable, métal,).

Après solidification le matériau conserve la forme de l'empreinte. Cette technique est souvent la plus économique pour l'obtention des pièces identiques ou pour des pièces massives pleines ou creuses, finis ou semi-finis pouvant présenter des formes très compliquées, on réalise ainsi une économie sensible de matière et on réduit considérablement les frais d'usinage. [1].

Un moule est l'ensemble des éléments appropriés, délimitant l'empreinte, et recevant le métal liquide qui après solidification donnera la pièce. Le moule comprend une ou plusieurs parties qui peuvent être séparées l'une de l'autre (châssis, chapes, coquilles). La surface commune aux deux demi moules porte le nom de plan de joint même si cette surface ne forme pas un plan. On distingue deux types de moules, à savoir les moules non permanents et les moules permanents.

I.2.Classification des procédés de fonderie.

Les procédés de fonderie peuvent être classés selon plusieurs critères liés à la nature du matériau, à la destination des pièces produites ainsi qu'à la technique de moulage utilisée.

Selon la nature des matériaux employés, on distingue principalement la fonderie de fonte, la fonderie d'acier, la fonderie des alliages d'aluminium ainsi que la fonderie des alliages de cuivre tels que les bronzes et les laitons.

En fonction de l'usage des pièces fabriquées, la fonderie peut être destinée à des applications artistiques et décoratives, à la fabrication de bijoux et d'ornements, ou encore à la production industrielle de pièces mécaniques.

Par ailleurs, les procédés de moulage se différencient selon la méthode de réalisation du moule. Les techniques les plus utilisées sont le moulage en sable, le moulage en carapace, le moulage à la cire perdue ainsi que le moulage en coquille utilisant des moules permanents [1]

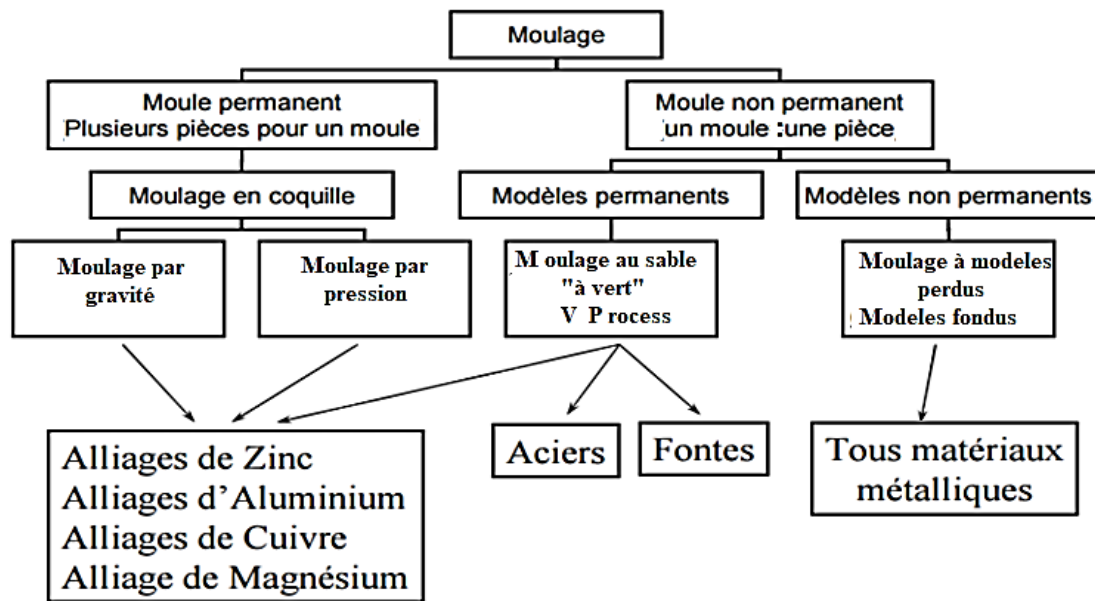


Figure I.1 .Classement des procédés de moulage

I.3. Etude comparative des procédés de moulage

I.4. Le moulage en sable

Le moulage en sable est un procédé de mise en forme des métaux reposant sur l'utilisation d'un moule élaboré à partir d'un mélange de sable siliceux, d'argile et d'eau, compacté autour d'un modèle représentant la géométrie de la pièce à fabriquer. Après extraction du modèle, le métal liquide est introduit dans l'empreinte obtenue, puis laissé à refroidir jusqu'à sa solidification complète. Ce procédé demeure largement employé dans l'industrie grâce à son coût relativement faible, sa simplicité de mise en œuvre et sa capacité à produire des pièces de géométries complexes et de grandes dimensions. Néanmoins, le moulage en sable présente certaines limites, notamment une précision dimensionnelle modérée et un état de surface moins performant comparativement aux procédés utilisant des moules métalliques permanents [2]

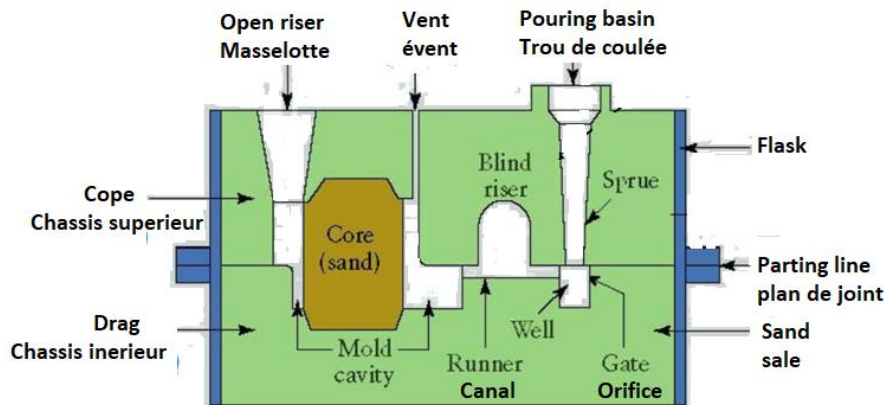


Figure I.2. les éléments d'un moule au sable

I.4.1. Terminologie du moulage en sable.

Le Moule : est un corps suffisamment solide et façonné pour recevoir un métal ou un alliage en fusion (fonderie en moule permanent).

Le Châssis : c'est le cadre en métal destiné à maintenir le sable comprimé autour du modèle (fonderie en moule non permanent).

La Dépouille : Elle est prévue sur le modèle afin de l'extraire sans provoquer l'effritement du sable lors de sa sortie.

La Masselotte : c'est l'excédent de matière qui permet de déplacer la retassure hors de la pièce.

Joint de moule (plan de joint) : Séparation entre les châssis. Une pièce peut être réalisée avec plusieurs châssis donc plusieurs plans de joint.

Noyau : Réalisé en sable, il permet d'obtenir les formes intérieures. Il est réalisé dans une boîte à noyau (fonderie en moule non permanent).

Event : Canal destiné à faciliter l'échappement des gaz formés au moment où le métal chaud entre en contact avec la surface de l'empreinte (en incluant l'air présent dans le moule).

Ebarbage : Opération qui permet d'enlever les différentes parties superflues (canaux d'alimentation, masselottes, événements ...) pour obtenir la pièce brute.

Chape : Tout châssis intermédiaire entre le châssis supérieur et le châssis inférieur

Décochage : Opération qui consiste à libérer la pièce du moule lorsque le métal est solidifié.

Retassure : Principal défaut de fonderie dont la cause est due à la contraction de l'alliage lors de sa solidification.

La réalisation d'une pièce de fonderie nécessite une succession d'opérations :

- Le modelage : confection des modèles,
- Le moulage : confection des empreintes,
- La fusion : obtention du métal liquide à partir de minerais et de lingots dans des fours,
- La coulée : remplissage des moules à l'aide du métal liquide recueilli dans des poches de coulée,
- Le décochage : extraction de la pièce par destruction du moule par vibrations,
- Le dessablage : nettoyage des pièces par brosse métallique, par jets de sable ou de grenailles etc...,
- L'ébarbage : enlèvement des parties supplémentaires de métal : bavures, jets de coulée, etc... à l'aide de burin manuel, pneumatique, de meule à découper, etc...

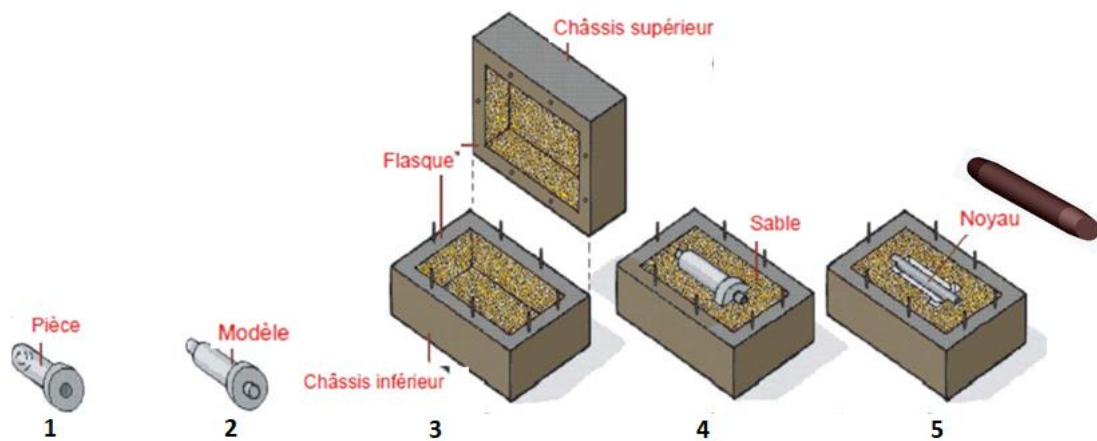


Figure I 3. Ordre d'exécution d'un moulage au sable

La pièce obtenue doit répondre à quelques critères, en particulier, elle doit :

- Saine. Etre exempte de défauts apparents ou cachés ;
- Précise : Présenter la forme et les dimensions requises pour son utilisation ;
- Usinable : Etre susceptible de se laisser façonner à l'aide des outils courants ;
- Résistance mécanique : Présenter une résistance suffisante vis-à-vis des diverses sollicitations auxquelles elle sera soumise afin d'assurer une tenue en service acceptable ;

Dans le moulage en sable on distingue deux types de moulages :

- Le moulage manuel.
- Le moulage mécanique.

I.5.Moulage en sable manuel

Le moulage en sable manuel est principalement destiné à la fabrication de pièces unitaires ou de grandes dimensions difficilement réalisables à l'aide des machines de moulage. Dans ce procédé, le compactage du sable est effectué manuellement, ce qui nécessite un effort important et un temps de préparation relativement élevé. De plus, la qualité du serrage peut varier selon l'opérateur, influençant ainsi la précision du moule obtenu. L'opération de démoulage reste également délicate, car une extraction incorrecte du modèle peut provoquer des arrachements du sable et entraîner des défauts nécessitant des retouches, voire la détérioration complète du moule

I.6.Moulage mécanique (à la machine)

Le moulage mécanique permet de pallier tous les inconvénients du moulage manuel. L'empreinte de la pièce n'est plus donnée par un modèle ordinaire, mais par un modèle fixe sur un support dont l'ensemble est appelé plaque modèle, d'où les pièces obtenues par moulage mécanique sont limitées en dimension par la grandeur des châssis. Le compactage du sable est réalisé mécaniquement selon plusieurs méthodes :

- par pression ;
- par secousses ;
- Le plus souvent par combinaison des deux procédés (pression et secousses).
- Par projection.

I.6.1. Avantages du moulage en sable

- Faible coût de fabrication du moule grâce à l'utilisation du sable, matériau économique et facile à préparer.
- Possibilité de produire des pièces de grandes dimensions telles que les blocs moteurs et les bâtis de machines.
- Grande liberté de conception permettant l'obtention de formes complexes à l'aide des noyaux.
- Compatibilité avec la majorité des métaux et alliages, notamment les aciers, les alliages d'aluminium et les alliages de cuivre.
- Procédé adapté à la fabrication unitaire ainsi qu'aux petites et moyennes séries de production [3].

I.6.2. Inconvénients du moulage en sable

Précision dimensionnelle relativement limitée par rapport aux procédés utilisant des moules métalliques permanents.

- État de surface souvent rugueux, nécessitant des opérations d'usinage complémentaires.
- Faible cadence de production due à la destruction du moule après chaque coulée.
- Propriétés mécaniques parfois inférieures en raison du refroidissement lent du métal.
- Consommation importante de sable durant le processus de moulage [3].

I.7. Moulage en coquille (Shell molding)

Le moulage en coquille est un procédé dérivé du moulage en sable dans lequel le moule est formé par une fine couche rigide obtenue à partir d'un mélange de sable siliceux et de résine thermodurcissable appliqué sur un modèle métallique chauffé. Cette technique permet d'améliorer la précision dimensionnelle des pièces produites ainsi que leur état de surface, tout en assurant une bonne reproductibilité en série. Le moulage en coquille est principalement utilisé pour la fabrication de pièces mécaniques de dimensions petites à moyennes nécessitant une qualité supérieure par rapport au moulage en sable traditionnel [4].

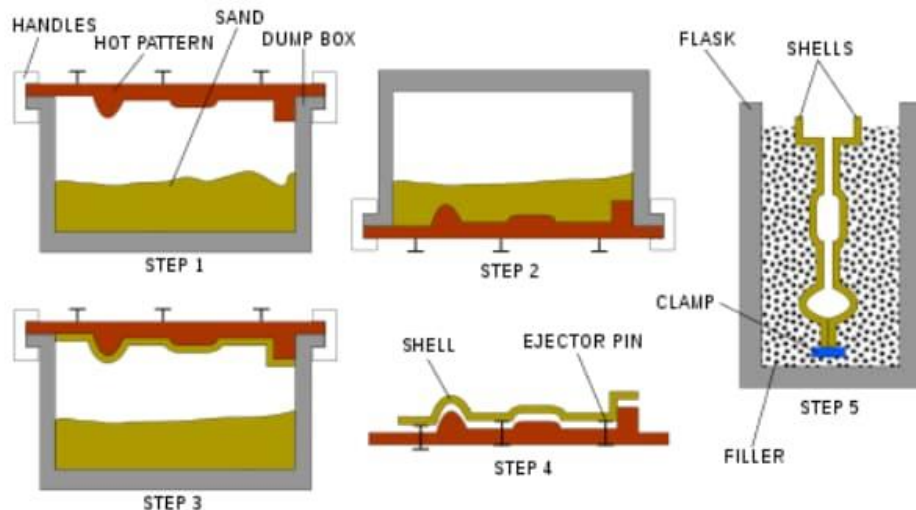


Figure I.4. Moulage en coquille (Shell molding)

I.7.1. Avantages du moulage en coquille

- Excellente précision dimensionnelle permettant d'obtenir des tolérances plus réduites que dans le moulage en sable traditionnel.

- Très bon état de surface des pièces moulées, ce qui diminue les opérations d'usinage et de finition.
- Bonne répétabilité du procédé, le rendant adapté à la production en moyenne et grande série.
- Amélioration des propriétés mécaniques grâce à un refroidissement plus rapide favorisant une structure métallurgique plus fine.
- Possibilité d'automatisation du procédé dans les chaînes de production industrielles.
- Compatibilité avec différents alliages métalliques tels que les aciers, les alliages d'aluminium et les alliages légers [5].

I.7.2. Inconvénients du moulage en coquille

- Coût de production plus élevé que le moulage en sable en raison de l'utilisation des résines et des modèles métalliques.
- Procédé généralement limité à la fabrication de pièces de petites ou moyennes dimensions.
- Investissement initial important lié à la conception et à la fabrication des outillages métalliques.
- Rentabilité réduite pour les faibles cadences de production ou les séries limitées.
- Dégagement de gaz lors du chauffage des résines, nécessitant des systèmes de ventilation et de contrôle environnemental adaptés [5]

I.8. Moulage sous pression (Die casting)

Le moulage sous pression est un procédé de fonderie dans lequel le métal liquide est injecté à grande vitesse et sous haute pression à l'intérieur d'un moule métallique permanent. Cette technique permet un remplissage rapide et homogène de l'empreinte, conduisant à l'obtention de pièces caractérisées par une grande précision dimensionnelle, un excellent état de surface et une réduction significative des opérations d'usinage après moulage. Grâce à sa productivité élevée et à sa bonne répétabilité, le moulage sous pression est particulièrement adapté à la fabrication en grande série de composants réalisés à partir d'alliages légers tels que l'aluminium, le zinc et le magnésium [6].

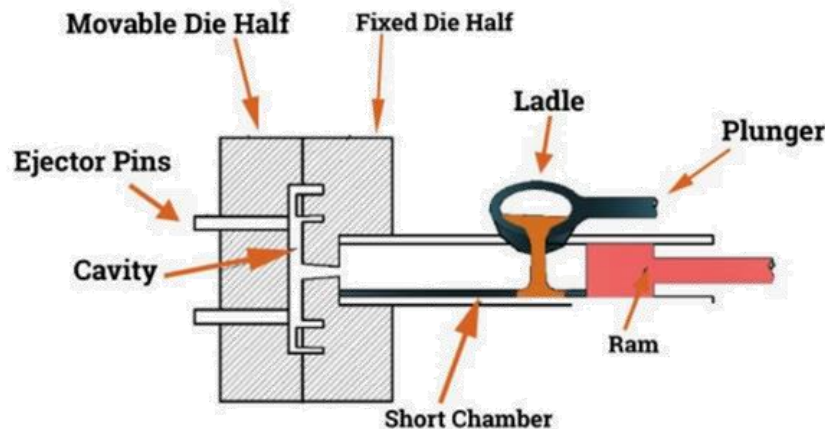


Figure I 5. Moulage sous pression (Die casting)

I.8.1. Avantages du moulage sous pression

- Très haute précision dimensionnelle permettant de réduire, voire d'éliminer, les opérations d'usinage après moulage.
- Excellent état de surface offrant des pièces lisses et de bonne qualité esthétique.
- Productivité élevée grâce à des temps de cycle courts adaptés à la fabrication en grande série.
- Possibilité de produire des géométries complexes comportant des parois minces, des nervures fines et des détails précis.
- Bonne répétabilité du procédé garantissant une qualité constante des pièces produites.
- Facilité d'intégration dans des lignes de production entièrement automatisées.
- Procédé particulièrement adapté aux alliages non ferreux tels que l'aluminium, le zinc et le magnésium [6].

I.8.2. Inconvénients du moulage sous pression

- Investissement initial élevé dû au coût important des moules métalliques et des équipements de production.
- Procédé économiquement rentable principalement pour les productions en grande série.
- Utilisation limitée essentiellement aux alliages à faible température de fusion.
- Risque de formation de porosités internes provoquées par l'injection rapide du métal liquide.
- Difficulté de fabrication des pièces de très grandes dimensions en raison des contraintes liées aux machines et aux matrices [6].

I.9. Moulage à la cire perdue (Investment casting)

Le moulage à la cire perdue est un procédé de fonderie de précision basé sur l'utilisation d'un modèle en cire reproduisant fidèlement la géométrie de la pièce à fabriquer. Ce modèle est recouvert d'un matériau réfractaire afin de former une coque céramique résistante aux hautes températures. Après durcissement, l'ensemble est chauffé pour éliminer la cire, créant ainsi une cavité destinée à recevoir le métal liquide. Ce procédé permet d'obtenir des pièces présentant une très grande précision dimensionnelle, des formes complexes et un excellent état de surface. Grâce à ces performances, le moulage à la cire perdue est largement utilisé dans les domaines aéronautique, médical, automobile ainsi que dans l'industrie de la bijouterie [7].

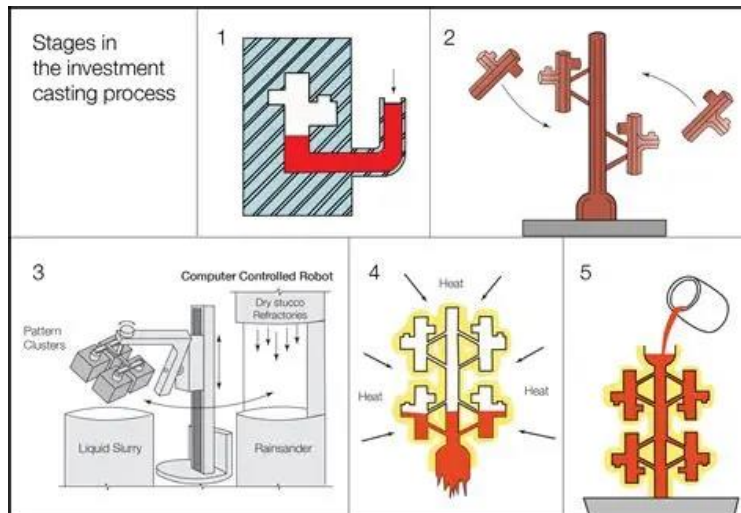


Figure I 6. Moulage à la cire perdue (Investment casting)

I.9.1. Avantages du moulage à la cire perdue

- Très haute précision dimensionnelle permettant d'obtenir des tolérances serrées et de réduire considérablement les opérations d'usinage après moulage.
- Excellent état de surface caractérisé par une faible rugosité, limitant les traitements de finition supplémentaires.
- Possibilité de réaliser des géométries complexes comportant des détails fins et des cavités internes difficiles à obtenir avec d'autres procédés de fonderie.
- Absence de plan de joint visible, améliorant à la fois l'aspect esthétique et les

performances mécaniques des pièces produites.

- Compatibilité avec une large gamme de matériaux tels que les aciers alliés, les aciers inoxydables, les superalliages, l'aluminium et le titane.
- Bonne répétabilité du procédé, particulièrement adaptée à la fabrication de pièces techniques en petites et moyennes séries [8].

I.9.2. Inconvénients du moulage à la cire perdue

- Coût de fabrication relativement élevé en raison de la réalisation des modèles en cire et de la complexité du procédé.
- Temps de production important lié aux différentes étapes de fabrication, notamment l'injection de la cire, l'enrobage céramique, le séchage, le décirage et la coulée.
- Limitation concernant la fabrication de pièces de très grandes dimensions ou de masses élevées.
- Fragilité des moules céramiques pouvant entraîner des fissurations avant l'opération de coulée.
- Rentabilité réduite pour les productions massives de pièces simples, où des procédés comme le moulage sous pression sont généralement plus économiques [8].

I.10. Moulage centrifuge

Le moulage centrifuge est un procédé de fonderie dans lequel le métal liquide est versé dans un moule animé d'un mouvement de rotation à grande vitesse. Sous l'action de la force centrifuge, le métal est réparti uniformément contre les parois internes du moule, favorisant ainsi une meilleure compacité et une diminution des défauts internes tels que les porosités et les inclusions gazeuses. Ce procédé permet d'obtenir des pièces présentant de bonnes propriétés mécaniques et une structure métallurgique homogène. Le moulage centrifuge est principalement utilisé pour la fabrication de pièces de révolution telles que les tubes, les bagues, les chemises et certains composants cylindriques destinés aux applications industrielles [9].

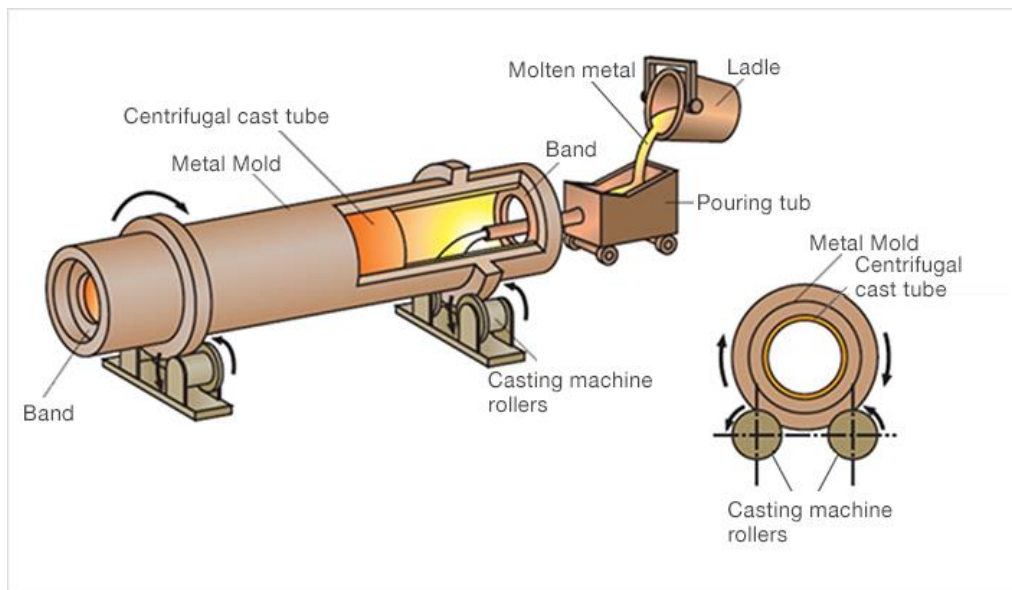


Figure I 7. Moulage centrifuge

I.10.1. Avantages du moulage centrifuge

- Excellente qualité métallurgique grâce à la concentration des impuretés vers la partie interne de la pièce, facilitant leur élimination après usinage.
- Structure dense et faible taux de porosité résultant de l'action de la force centrifuge durant la solidification.
- Amélioration des propriétés mécaniques des pièces obtenues grâce à une solidification dirigée et homogène.
- Absence de noyaux dans de nombreuses applications, le vide central étant formé naturellement sous l'effet de la rotation.
- Réduction des pertes de matière et meilleure utilisation du métal liquide.
- Bonne précision dimensionnelle pour les pièces de géométrie cylindrique ou annulaire [9].

I.10.2. Inconvénients du moulage centrifuge

- Procédé principalement limité à la fabrication de pièces axisymétriques telles que les tubes, bagues et cylindres.
- Coût relativement élevé des équipements de rotation et des systèmes de contrôle associés.

- Nécessité d'un contrôle précis de la vitesse de rotation afin d'éviter l'apparition de défauts de moulage.
- Risque de variations d'épaisseur lorsque la vitesse de rotation ou l'alimentation du métal n'est pas uniforme [9].

I.11. Moulage en moule métallique (Permanent mold casting)

Le moulage en moule métallique utilise un moule permanent, généralement en acier ou en fonte, réutilisable pour un grand nombre de cycles de production. Le métal fondu est introduit par gravité ou sous faible pression. Ce procédé offre une bonne précision dimensionnelle, une meilleure qualité de surface et des propriétés mécaniques supérieures à celles obtenues par moulage en sable. Toutefois, l'investissement initial est relativement élevé [10].

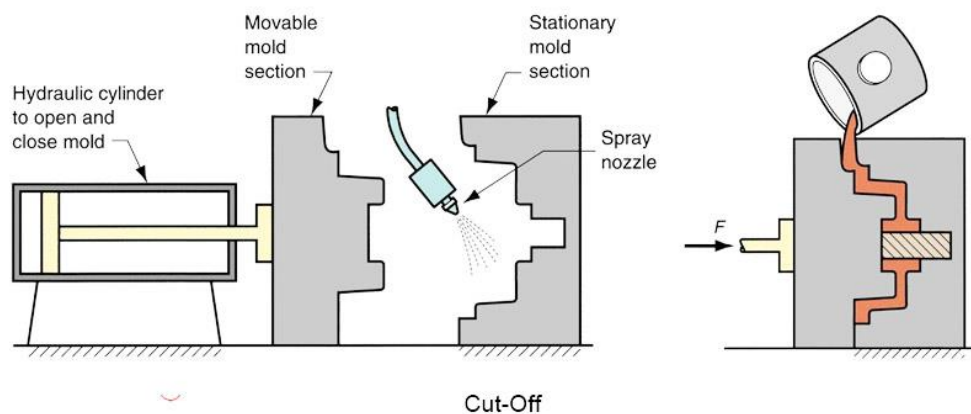


Figure I 8. Moulage en moule métallique (Permanent mold casting)

I.11.1. Avantages du moulage en moule métallique

- Productivité élevée grâce à la réutilisation des moules métalliques, permettant la réalisation d'un grand nombre de cycles de production avec une bonne rentabilité industrielle.
- Amélioration de la qualité des pièces obtenues, notamment en termes d'état de surface et de précision dimensionnelle par rapport au moulage en sable.
- Meilleures propriétés mécaniques dues à une vitesse de refroidissement plus importante favorisant une structure métallurgique plus fine et plus homogène.
- Réduction des opérations d'usinage puisque les pièces produites sont proches des dimensions finales souhaitées.
- Bonne répétabilité du procédé, adaptée aux productions en moyenne et grande série [10].

I.11.2. Inconvénients du moulage en moule métallique

- Coût initial élevé lié à la fabrication des moules métalliques et des équipements associés.
- Utilisation principalement limitée aux alliages non ferreux à faible température de fusion, tels que l'aluminium, le zinc, le magnésium et certains alliages de cuivre.
- Difficulté de fabrication des pièces très grandes ou présentant des géométries extrêmement complexes en raison des contraintes de démoulage.
- Usure progressive des moules métalliques sous l'effet des cycles thermiques répétés pouvant entraîner des fissurations et une diminution de leur durée de vie [10].

I.12. Moulage continu

Le moulage continu est un procédé de fabrication dans lequel le métal liquide est versé en continu dans un moule métallique refroidi par circulation d'eau. Au cours de son déplacement, le métal se solidifie progressivement avant d'être extrait sous forme de produits semi-finis tels que les brames, les blooms, les billettes et les plaques. Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie sidérurgique en raison de sa productivité élevée, de l'amélioration de la qualité métallurgique des produits obtenus ainsi que de la réduction des pertes de matière et des opérations de transformation ultérieures [11].

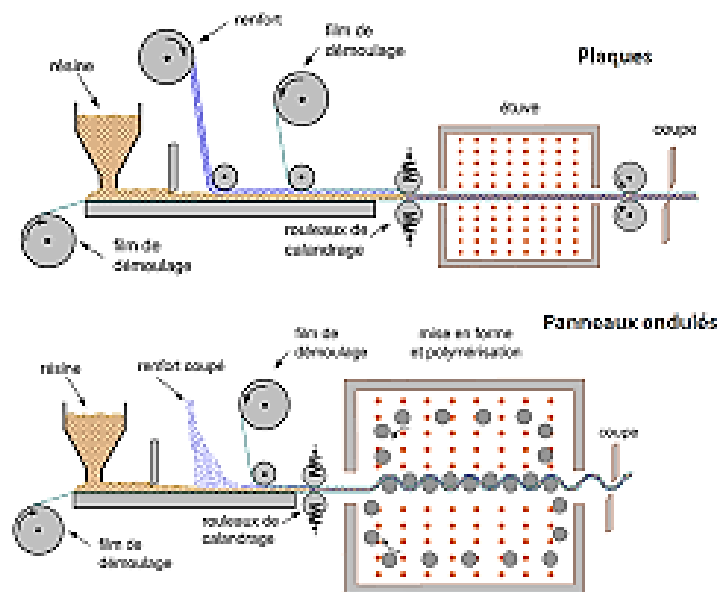


Figure I 9. Moulage continu

I.12.1. Avantages du moulage continu

- Procédé de production continu facilement intégrable dans des chaînes de fabrication automatisées, permettant une réduction des besoins en main-d'œuvre.
- Gain important en temps et en énergie grâce à la suppression des étapes intermédiaires telles que la coulée en lingots, le réchauffage et certaines opérations de transformation.
- Amélioration de la qualité métallurgique et de l'uniformité structurelle des produits obtenus.
- Réduction des pertes de matière et amélioration du rendement métallique grâce à l'absence de masselottes et à une meilleure utilisation du métal liquide.
- Productivité élevée et meilleure compétitivité industrielle, particulièrement dans l'industrie sidérurgique [11].

I.12.2. Inconvénients du moulage continu

- Investissement initial très important en raison du coût élevé des installations et des équipements de coulée continue.
- Flexibilité limitée pour la fabrication de pièces très complexes ou produites en faibles séries.
- Risque d'apparition de certains défauts métallurgiques tels que les porosités ou les fissurations en cas de mauvais contrôle des paramètres de coulée.
- Nécessité d'une maintenance régulière et d'un contrôle rigoureux du procédé en raison de la complexité des équipements industriels [11].

I.13. Le sable de fonderie

Le sable de moulage constitue l'un des éléments essentiels du procédé de moulage en sable. Il doit présenter plusieurs propriétés fondamentales telles qu'une bonne réfractarité afin de résister aux températures élevées du métal liquide, une résistance mécanique suffisante pour supporter les contraintes durant la coulée, ainsi qu'une perméabilité adéquate permettant l'évacuation des gaz générés pendant la solidification.

Le sable de fonderie est généralement composé principalement de sable siliceux, représentant la plus grande proportion du mélange, assurant la stabilité thermique du moule. Des liants tels que l'argile bentonitique ou certaines résines synthétiques sont ajoutés afin d'améliorer la cohésion entre les grains de sable et de maintenir la forme de l'empreinte après le retrait du modèle. D'autres additifs, notamment le noir de fonderie ou le graphite pulvérisé, sont incorporés pour améliorer la perméabilité du moule et limiter certains défauts liés aux gaz lors de la coulée. Dans certains procédés modernes, des résines furanniques associées à des catalyseurs sont également utilisées afin de provoquer un durcissement rapide du moule à température ambiante [12].

Un sable de moulage performant doit satisfaire plusieurs exigences techniques importantes :

- Assurer une reproduction fidèle des détails du modèle.
- Conserver la stabilité de l'empreinte jusqu'à la solidification complète du métal.
- Présenter une température de fusion supérieure à celle de l'alliage coulé.
- Posséder une bonne perméabilité pour permettre l'évacuation des gaz.
- Limiter les réactions chimiques entre le moule et le métal liquide afin d'éviter les défauts métallurgiques.
- Faciliter l'opération de décochage après solidification de la pièce [12].

I.13.1. Composition du sable de moulage

Pour obtenir la satisfaction de l'ensemble des exigences ci-dessus, le sable de fonderie est composé de trois catégories de matériaux qui sont :

- Un matériau granuleux ou sable de base qui en constitue la masse principale, en quelque sorte son squelette réfractaire,
- Un liant organique ou minéral destiné à agglomérer les grains entre eux et qui doit obligatoirement pouvoir évoluer de l'état liquide ou plastique à l'état solide, c'est le phénomène de durcissement,
- Un certain nombre d'adjuvants, sans pouvoir liant mais néanmoins nécessaires à la réussite d'un moulage, destinés à conférer des propriétés secondaires comme l'état de surface ou bien les propriétés de démoulage (du modèle).

Généralement les sables de fonderie contiennent :

- 70 à 80 % de silice ‘ support ‘
- 5 à 15% d’argile ‘ agglutinant ‘
- 7 à 10% d’eau
- 3 à 5% d’impuretés ; oxyde de fer, matière organique. etc.

On distingue les sables :

- **De contact** : qui adhèrent à la surface du modèle et se trouve en contact avec le métal en fusion.
- **De remplissage**. (vieux sable), utilisé pour combler tout le volume du châssis.
- **Unique** : utilisé dans les fonderies mécanisées où l’on a recours au sablage mécanique. On emploie le sable unique pour remplir tout le volume du châssis. Sa cohésion, sa perméabilité et réfractairité sont élevées.

Les compositions et différentes propriétés des différents types de sables de moulage sont :

I.13.1.1. Les sables pour le moulage de l'acier

Les sables utilisés pour certaines applications de fonderie doivent présenter une réfractarité plus élevée afin de résister aux températures importantes du métal liquide. Dans ce cas, ils ne contiennent généralement pas de charbon, car celui-ci peut altérer certaines propriétés du moule lors de la coulée. Par ailleurs, la bentonite est souvent utilisée comme liant en remplacement de l’argile classique afin d’améliorer la cohésion et la stabilité du mélange sableux. Afin d’augmenter davantage la résistance thermique du sable de contact, du quartz pulvérisé peut être ajouté au mélange, ce qui permet d’améliorer la réfractarité du moule et de limiter les dégradations provoquées par les hautes températures [13].

Tableau I 1.Composition et propriétés des sables pour moulage des aciers

Molding sand	Composition %				Properties		
	Reclaimed sand	Quartz sand	Clay (bentonite)	Additions	Moisture %	Permeability	Green Compression Strength (kgf/cm ²)
Unique sand	85-90	Moulage de 10-5	La fonte 3 (1-0.5)	Lessive 1-sulfurique 0.5 charbon	4-5	70-80	0.4-0.6
Facing sand	50-60	40-30	6.5-5.0 (2-1.5)	2-lessive sulfurique 3-charbon	4.5-5.5	80-100	0.5-0.6
Backing sand	96-98	3-45	1.0-0.5	-----	5-5.5	60	0.3-0.4
High strength unique sand (for automatic machine)	93-96	3.5-2	----- (2-1.5)	1-charbon 0.1-amidon	3-3.4	120-150	1.5-1.7

I.13.1.2. Les sables pour le moulage des aciers non ferreux

Tableau 2Composition et propriétés des sables pour moulage des alliages non ferreux

Sable unique pour Les alliages d'aluminium	82-87	10-5	10-8	-----	4.5-5.5	20	0.3-0.5
Sable unique pour les bronze	80-85	10-5	12-8	1.5-char.	4.5-5.5	30	0.3-0.5

Les critères pour le choix d'un sable sont :

- Reproduire fidèlement la forme du modèle
- Assurer un décochage aisé du moule
- Etat de surface meilleure possible
- coût et disponibilité : la silice est de loin la moins chère et la plus disponible. C'est aussi le sable qui est le plus largement utilisé en moulage sable à vert.
- Résistance à l'agression du métal liquide lors de la coulée.

I.13.2. Sable à noyaux

La composition des sables de moulage et des sables à noyaux varie selon plusieurs paramètres tels que la nature du métal coulé, la masse de la pièce, l'épaisseur des parois ainsi que la complexité géométrique de la pièce à produire. Les sables destinés à la fabrication des noyaux doivent présenter une réfractarité, une perméabilité et une compressibilité supérieures à celles des sables de moulage classiques, car ils sont entièrement entourés par le métal liquide durant la coulée. Pour cette raison, les noyaux sont généralement élaborés à partir d'un sable siliceux à forte teneur en quartz associé à différents liants et additifs améliorant leurs propriétés thermiques et mécaniques [14].

L'argile naturelle constitue l'un des principaux agglutinants utilisés en fonderie. En présence d'eau, elle acquiert des propriétés plastiques permettant d'assurer la cohésion entre les grains de silice. Les agglomérants, quant à eux, sont utilisés afin d'augmenter la résistance mécanique du noyau après séchage ou cuisson. Parmi les produits les plus utilisés figurent la dextrine, l'huile de lin, les huiles cuites, certains dérivés pétroliers ainsi que les solutions sulfurées. Ces liants sont généralement incorporés dans des proportions comprises entre 1 et 5 % afin de former une couche résistante autour des grains de sable après séchage [14].

Dans la fabrication des pièces en alliages non ferreux, des sables argileux spécifiques sont souvent employés. Pour les alliages à base de magnésium, certains additifs tels que le soufre ou l'acide borique peuvent être ajoutés afin de limiter les réactions d'oxydation durant la coulée. Par ailleurs, certains sables spéciaux, notamment les sables au silicate de sodium durcis au dioxyde de carbone (procédé CO₂), permettent un durcissement rapide du moule grâce à l'utilisation de verre soluble et d'additifs favorisant la prise du mélange sableux [14].

Granulométries des sables de fonderie

La granulométrie des sables de fonderie représente un paramètre essentiel influençant directement la qualité du moule et des pièces obtenues. Elle correspond à la distribution dimensionnelle des grains de sable, généralement comprise entre 0,063 mm et 2 mm. Dans la pratique industrielle, une granulométrie moyenne située entre 200 et 400 µm est souvent privilégiée afin d'assurer un compromis optimal entre la perméabilité du moule et la qualité de l'état de surface des pièces moulées.

La finesse des sables est habituellement caractérisée par l'indice de finesse AFS (American

Foundry Society)), largement utilisé dans l'industrie de la fonderie. Une valeur élevée de l'indice AFS indique un sable plus fin, favorisant un meilleur état de surface mais réduisant généralement la perméabilité du moule. À l'inverse, des grains plus grossiers améliorent l'évacuation des gaz mais peuvent entraîner une augmentation de la rugosité superficielle des pièces produites [15].

Les Caractéristiques Granulométriques des sables de fonderie sont :

I.13.3. Taille des grains :

Sable silicieux, de forme généralement arrondie, avec une répartition granulométrique contrôlée pour assurer la cohésion et la finesse de surface du moule car la finesse du grain de sable de moulage améliore la finition de surface de la pièce moulée. Il ne faut pas perdre d'esprit que la forme et la taille des grains influencent la résistance à la compression du moule et permet l'évacuation des gaz lors de la coulée.

I.13.4. Indice de finesse AFS :

Échelle normalisée où un indice faible (ex: 35 AFS) désigne un sable grossier, et un indice fort (ex: 120 AFS) un sable fin.

I.13.5. Uniformité :

La distribution des tailles est surveillée pour éviter la pénétration du métal fondu (sable trop grossier) ou une mauvaise perméabilité aux gaz (sable trop fin).

I.14. Le châssis

C'est un cadre rigide fabriqué en fonte, en acier ou en aluminium parfois en bois, sans fond, destiné à contenir et à soutenir le sable constituant le moule il doit posséder un système de repérage de mise en position et de fixation. Un châssis complet comprend au moins deux parties ; une partie supérieure (châssis de dessus).et partie inférieure (châssis de dessous).

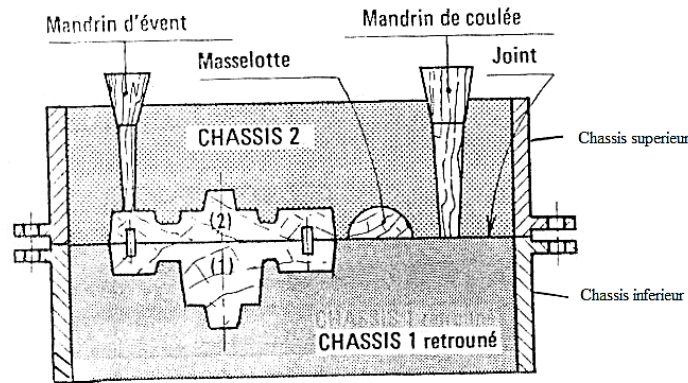


Figure I. 10. Châssis de moule

Les châssis sont nervurés intérieurement et dans le cas échéant, quand les conditions de moulage l'exigent, on ajoute une partie intermédiaire appelée chape (partie du moule intercalée entre le dessous et le dessus). Les châssis portent des oreilles percées permettant un repérage précis à l'aide de broches ou de goujons. On trouve également sur les cadres, des poignées de manœuvres et de pattes de crampons servant à placer des serre-joints ou des étriers destinés à empêcher la partie du moule de s'écraser sous la pression du métal liquide lors de la coulée (dans le cas des châssis en bois).

On appelle motte le modèle dont on a enlevé le châssis, avant coulée pour l'utiliser de nouveau.

I.15. Le moule

Le moule est un ensemble d'éléments réalisés à partir de matériaux adaptés et destiné à former l'empreinte de la pièce à fabriquer. Après introduction du métal liquide et sa solidification, cette empreinte permet d'obtenir la géométrie finale de la pièce moulée. Un moule est généralement constitué d'au moins deux parties démontables, telles que les châssis, les chapes ou les coquilles, afin de faciliter les opérations de moulage et de démoulage.

La surface de séparation entre les différentes parties du moule est appelée plan de joint, même lorsque cette surface ne correspond pas exactement à un plan géométrique. Selon leur mode d'utilisation, les moules peuvent être classés en deux grandes catégories : les moules non permanents, détruits après chaque coulée, et les moules permanents, réutilisables pour plusieurs cycles de production.

Par ailleurs, les moules peuvent être réalisés en une seule partie ou en plusieurs éléments assemblés, selon la complexité géométrique de la pièce et les exigences du procédé de fabrication [16].

I.15.1. Moule à un élément

Ou moule monobloc, ce type de moule se compose d'une seule partie et il est rarement utilisé. L'empreinte reste ouverte à la partie supérieure, ou elle peut être fermée par un noyau, ce type de moules est idéal pour des objets simples sans contre-dépouille. Il est couramment utilisé avec du silicone, du plâtre ou du sable pour reproduire des formes avec une face plane, permettant un démoulage facile par le dessus.

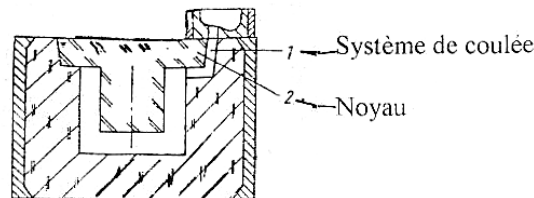


Figure I. 11. Moule monobloc

I.15.2. Moule à deux éléments

La plupart des moules en fonderie se compose de deux parties, le châssis supérieur et le châssis inférieur. Dans ce cas la plus grande surface des modèles doit se situer dans le plan de joint des châssis,

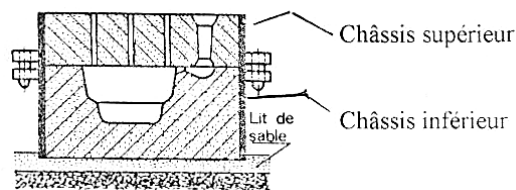


Figure I. 12. Moule en 2 parties

I.15.3. Moule à plusieurs éléments

Dans ce cas le moule est constitué de trois ou plusieurs éléments. Le châssis intercale entre le châssis supérieur et inférieur est appelé chape. Pour ce type de moule. Le modèle doit avoir deux plans de joints

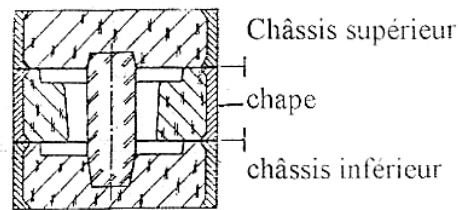


Figure I.13. Moule en 3 parties

I.16. Le modèle (gabarit)

Le modèle est une reproduction de la pièce à fabriquer (patern en anglais). Il sert à créer l'empreinte dans le sable. Les modèles peuvent être fabriqués à partir de différents matériaux tels que le bois, le métal ou les matériaux plastiques. Les modèles se divisent en deux catégories : Les modèles réutilisables et les modèles perdus.

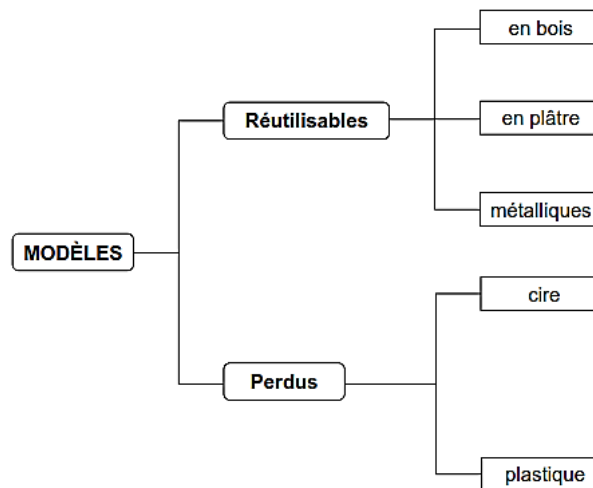


Figure I. 14. Classement des modèles

Pour assurer un bon moulage, les modèles doivent répondre à certaines exigences.

- Deux demi modèles séparés et complémentaires, une pour l'empreinte du châssis inférieur et l'autre pour celle du châssis supérieur.
- Les formes et les dimensions prévoient le retrait du métal lors de la solidification, les surépaisseurs d'usinage les dépouilles et les congés
- Prévoir les portées du noyau

Les dimensions du modèle sont définies selon les équations suivantes

Dimensions externes.

$$L_{\text{model}} = L_{\text{cast}} + L_{\text{Retrait}} + L_{\text{Surepasseur usinage}}$$

$$D_{\text{model}} = D_{\text{cast}} + L_{\text{Retrait}} + L_{\text{Surepasseur usinage}}$$

Dimensions internes.

$$L_{\text{model}} = L_{\text{cast}} + L_{\text{Retrait}} + L_{\text{Surepasseur usinage}} + n.L_{\text{cp}} = L_m + n.L_{\text{cp}}$$

$$D_{\text{model}} = D_{\text{cast}} + L_{\text{Retrait}} - L_{\text{Surepasseur usinage}}$$

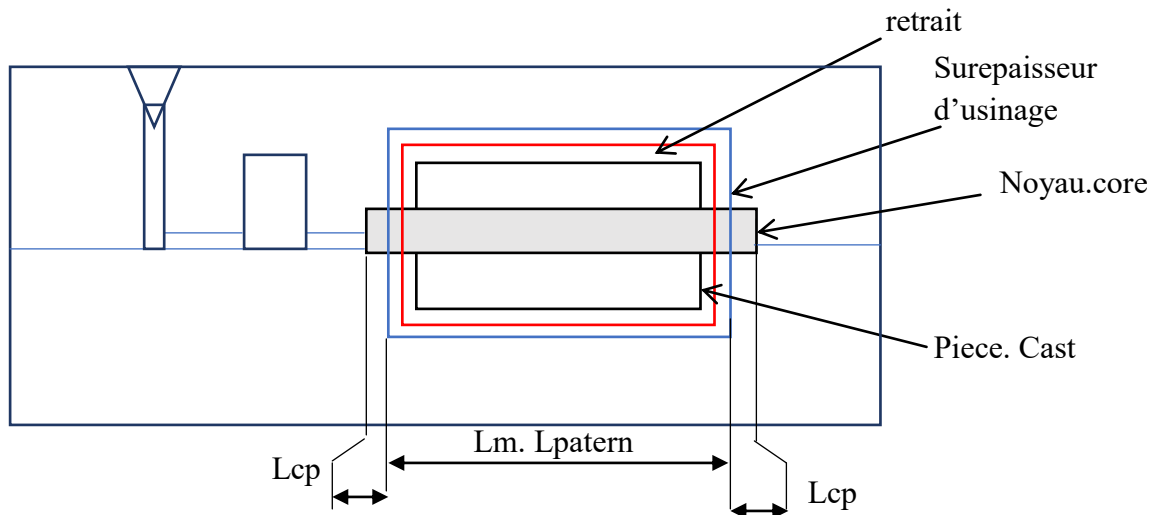


Figure I. 15 : Dimensionnement du modèle

Lcp. Est l'appui du noyau sur le moule

I.17. Le retrait

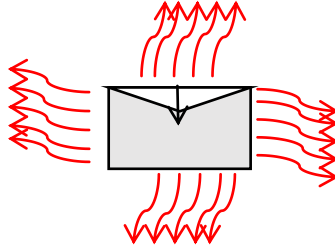
Le retrait est un phénomène physique correspondant à la diminution des dimensions du métal lors de son refroidissement et de sa solidification. Afin de compenser cette contraction, les dimensions du modèle sont majorées d'une valeur appelée surcote de retrait, dépendant de la nature de l'alliage utilisé. Ce phénomène est principalement causé par la perte rapide de chaleur résultant du contact entre le métal liquide et les parois plus froides du moule.

Le retrait influence directement la précision dimensionnelle des pièces moulées et peut entraîner l'apparition de défauts tels que les retassures ou les fissurations si la compensation n'est pas correctement prise en compte lors de la conception du moule et du système d'alimentation [17].

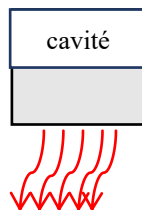
Types de retraits :

I.17.1. Retrait en pipe :

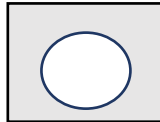
il survient suite au dégagement de la chaleur dans toutes les directions

**I.17.2. Retrait uniforme**

Il survient suite au dégagement de la chaleur dans une seule directions

**I.17.3. Retrait en cavité interne**

Il survient suite au dégagement de la chaleur uniforme dans toutes les directions

**I.17.4. Retrait en micro porosités**

Il survient suite au dégagement de la chaleur rapide dans toutes les directions

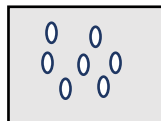


Tableau I 3. Valeurs de retrait pour les matériaux (en mm/mm de long)

Material	Shrinkage allowance (mm/mm)
Gray cast iron	0.0105 ✓
White cast iron	0.0160 to 0.0230
Plain carbon steel	0.0210
Chromium steel	0.0200
Manganese steel	0.0250 to 0.0380
Aluminum	0.0130 ✓
Aluminum bronze	0.0200 to 0.0230
Brass	0.0155
Bronze	0.0155 to 0.0220
Copper	0.0160
Gunmetal	0.0100 to 0.0160
Lead	0.0260
Monel	0.0200
Magnesium	0.0130
Magnesium alloys	0.0160
White metal	0.0060
Zinc	0.0100 to 0.0150

I.18. Les dépouilles

Les formes du modèle doivent être conçues de manière à faciliter son extraction du moule sans provoquer de détérioration de l’empreinte en sable. Pour cette raison, les surfaces verticales du modèle ou des boîtes à noyaux reçoivent une légère inclinaison appelée dépouille, orientée suivant le sens du démoulage défini par le plan de joint.

La dépouille permet de réduire les efforts lors de l’extraction du modèle et de limiter les risques d’arrachement du sable. En pratique, une dépouille importante améliore considérablement les conditions de démoulage et la qualité du moule obtenu. Les valeurs recommandées dépendent généralement de la hauteur des surfaces concernées :

Pour une hauteur inférieure à 50 mm, une dépouille minimale d’environ 1 % est recommandée.

Pour une hauteur comprise entre 50 et 100 mm, la dépouille minimale varie généralement entre 2 % et 2,5 % [18].

Tableau I 4. Valeurs des dépouilles pour modèles selon la matière et selon l'usage

Pattern material	Draft, angle (deg.)	
	outer	inner
Wood	0.25 to 3.00	0.50 to 3.00
Metal	0.35 to 1.50	0.50 to 3.00
Plastic	0.25 to 1.00	0.35 to 2.25

Modèle	Dépouille (%)	Angle (°)
« sans » dépouille	0.5	0°17'
dépouille réduite	1	0°34'
dépouille normale	2	1°84
dépouille accentuée	5	2°51'
portée de noyau normale	10	5°42'
portée de coiffage	20	11°18'
talus de plaque	100	45°

I.19. Surépaisseurs d'usinage

Les surépaisseurs d'usinage correspondent aux réserves de matière ajoutées aux dimensions de la pièce moulée afin de permettre les opérations d'usinage ultérieures telles que l'ébauche, la semi-finition et la finition. Ces surépaisseurs dépendent principalement du nombre de passes d'usinage, de la précision recherchée ainsi que de la quantité minimale de matière à enlever sous forme de copeaux.

Les tolérances dimensionnelles obtenues par certains procédés de moulage modernes sont généralement meilleures que celles du moulage en sable traditionnel. Dans certains cas, il est possible d'atteindre des tolérances de l'ordre de $\pm 0,3$ mm pour une dimension de 200 mm. Par ailleurs, la surépaisseur minimale d'usinage est souvent voisine de 1 mm afin de garantir une finition correcte des surfaces usinées et d'éliminer les éventuels défauts superficiels issus du moulage [19].

Tableau I 5. Valeurs des surépaisseurs d'usinage pour modèles

Dimension, (mm)	Allowance, (mm)		
	Bore	Surface	Cope side
Cast iron			
up to 300	3.0	3.0	5.5
300 to 500	5.0	4.0	6.0
500 to 900	6.0	5.0	6.0
Cast steel			
up to 150	3.0	3.0	6.0
150 to 500	6.0	5.5	7.0
500 to 900	7.0	6.0	9.0
Non ferrous			
up to 200	2.0	1.5	2.0
200 to 300	2.5	1.5	3.0
300 to 900	3.0	2.5	3.0

I.20. Le noyau

Un noyau est une structure en matériau de moulage comportant une ou plusieurs parties donnant après remoulage des reliefs correspondant à des formes intérieures (trous, évidements,...), ou parfois extérieures de la pièce brute.

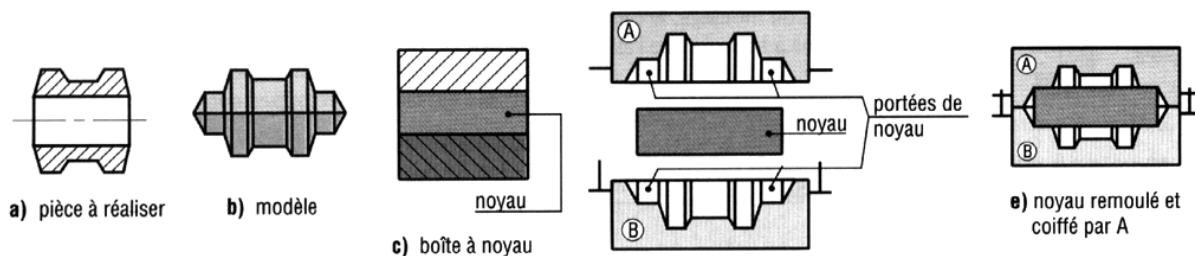


Figure I 16. Préparation de l'empreinte et mise en place du noyau

I.20.1. Les portées de noyau :

Lorsque on emploi des noyaux en sable réalisés dans des boîtes à noyaux. le modèle comprend les portées de noyaux. Parties rapportées au positif sur les modèles avec noyau pour maintenir, soutenir et positionner ces derniers.

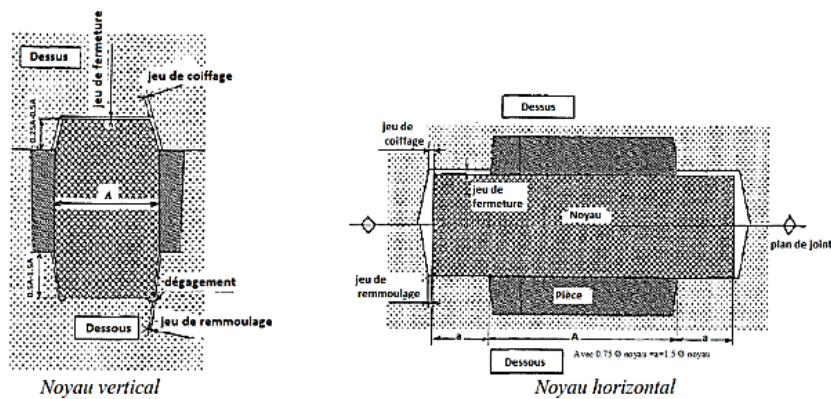


Figure I 17 . Portées de noyaux dans le cas d'un noyau vertical et horizontal

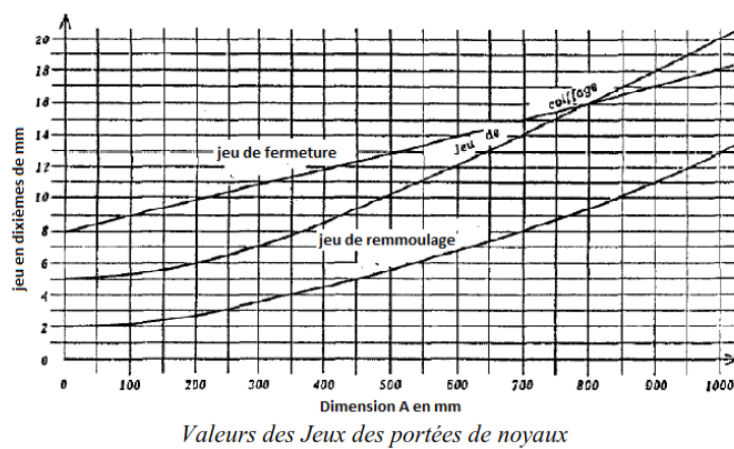


Figure I.18 . jeux pour portées de noyaux

- Il faut s'assurer que durant la coulée le noyau ne sera pas soulevé par le flot de métal en fusion.
- Ainsi il faut vérifier l'équation suivante.

$$F_p = V(\rho - d) \quad \text{Eq. I. 1}$$

Ou ;

F_p . La force de poussée(N)

V . Volume du noyau dans la cavité du moule (cm^3)

ρ . Masse volumique du matériau liquide

d . Densité du matériau du noyau ($1,65 \cdot 10^{-2}$) N/cm^3

L'aire d'appui du noyau se calcule d'après l'équation :

$$A = V \cdot d / \sigma \quad \text{Eq. I. 2}$$

Ou ;

V. Volume total du noyau y compris les portés (cm³)

σ . Contrainte de compression du sable de moulage (N/cm²)

Tableau I 6. Longueurs de supports de noyaux

Diameter (D) mm	Core length, L mm									
	< 50		51 - 150		151 - 300		301 - 500		500 - 750	
	hl	l	hl	l	hl	l	hl	l	hl	l
up to 25	20	15	25	25	--	40	--	--	--	--
26 - 50	20	20	40	35	60	45	70	60	--	--
51 - 100	25	25	35	40	50	50	70	70	100	90
101 - 200	30	30	30	50	40	55	60	80	90	100
201 - 300	35	--	35	--	40	60	50	90	80	110
301 - 400	40	--	40	--	40	80	50	100	70	120
401 - 500	40	--	40	--	40	110	50	120	60	130

I.21. Dépouilles pour les noyaux

Tableau I 7. Angles de dépouille pour les supports de noyaux

Core print h (mm)	Vertical, (deg)		Horizontal, (deg)		
	α	β	α	α_1	β
≤ 20	10	15	10	3.0	15
21 to 50	7	10	7	1.5	10
51 to 100	6	8	6	1.0	8
101 to 200	5	6	5	0.75	—

I.22. Le système de coulée

Le système de coulée est un ensemble de canaux permettant d'acheminer le métal liquide vers la cavité du moule. Il comprend généralement :

- Entonnoir de coulée : Reçoit le métal liquide
- le canal de descente (Sprue) : achemine le métal fondu vers le bas du moule généralement
- les canaux de distribution (Runners). assure la répartition du métal fondu
- les attaques ou orifices (Gates). points d'entrée du métal fondu dans la pièce
- Masselottes : constituent des réservoirs de métal fondu pour compenser le retrait

Le système doit minimiser l'érosion du sable et l'inclusion de gaz et privilégier un remplissage calme (par le bas) pour limiter l'oxydation.

La conception correcte du système de coulée est essentielle pour assurer un remplissage uniforme du moule et éviter la formation de défauts dans la pièce moulée.

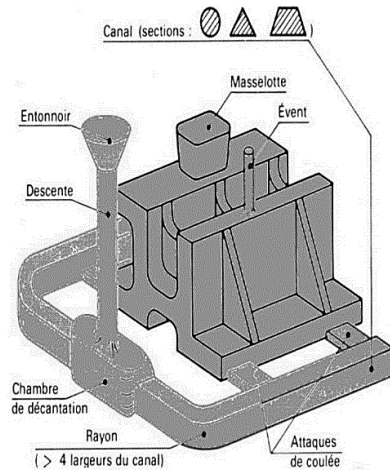


Figure I 19 . Système de coulée

I.23. Le cône de coulée

Le trou de coulée doit être placée sur la zone qui dispose du module de refroidissement le plus faible. Le métal pendant sa descente est ralenti par la forme du système de coulée. Les sections rétrécies entraînent des pertes de charges qui sont évaluées à :

Tableau I 8. Valeurs des coefficients de perte de charge pour le dispositif de coulée

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

- La coulée par le haut. S'adresse aux pièces de faible hauteur,
- la coulée par le côté. Destinée aux pièces de hauteur moyenne.
- la coulée par le bas. Destinée aux pièces de hauteur importante.

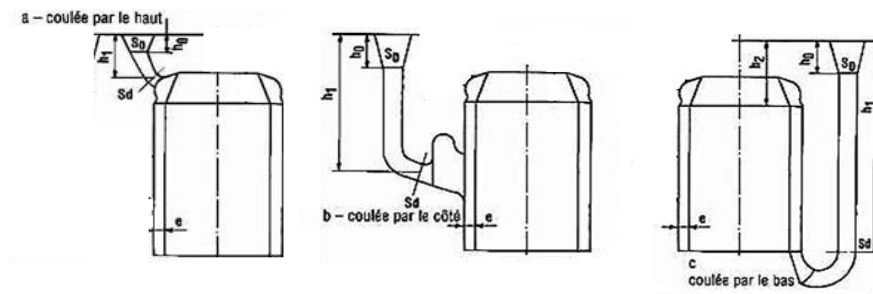


Figure I 20 : Différentes positions des systèmes de coulée

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

Section théorique S'd en chute par le haut. $S'd = V / 0,7 t (\sqrt{2gh_1})$

Section théorique S'd en côté ou en bas: $S'd = V / 0,4 t (\sqrt{g(h_1+h_2)})$

Ou :

h_1 : hauteur de la descente de coulée

t: temps de remplissage en seconde

c : coefficient de perte de charge 0,7 ou 0,4:

V: volume total de l'empreinte

g: pesanteur

La Section pratique Sd est calculée comme suit.

$$\begin{aligned}
 S &= 2S_d\sqrt{h_1} & a &= \sqrt{3S_d} \\
 h_0 &= x = \sqrt{S} & Y &= \sqrt{2x} \\
 h &= \sqrt{\frac{S_d}{3}} & r &= \frac{b}{2} \\
 S_0 &= S_d\sqrt{\frac{h_1}{h_0}} & S_a &= 2 \text{ à } 4 S_d \\
 R &= \frac{x}{4} = a
 \end{aligned}$$

Après calcul de S'd, choisir a et b depuis le tableau puis définir les composants du dispositif

Si $S'd > 3\text{cm}^3$ prévoir plusieurs trous de coulée

S'd (cm ²)	a (mm)	b (mm)	Sd/S'd
0,3	12	4	1,6
0,5	15	5	1,5
0,8	18	6	1,35
1,1	21	7	1,35
1,5	24	8	1,28
2	27	9	1,21
2,5	30	10	1,20
3	33	11	1,20
3,66	36	12	1,20
4,2	39	13	1,20
5,5	42	14	1,06
6,3	45	15	1,06

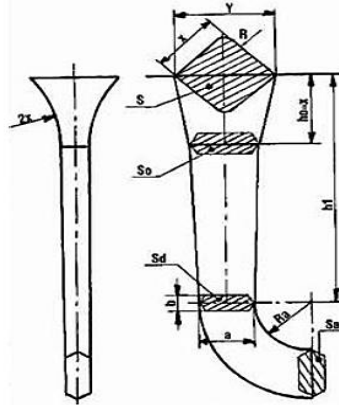


Figure I 21. Caractéristiques dimensionnelles du trou de coulée

Les systèmes de coulée sont identifiés selon deux critères. La position par rapport à la cavité et la pression du moulage

I.23.1. Selon la position

on trouve trois cas. Haut (top), en dessous (bottom) et de part et d'autre (parting) :

- **Haut (Top)** : Le système de coulée est entièrement au-dessus de la cavité à remplir

La hauteur effective h_e

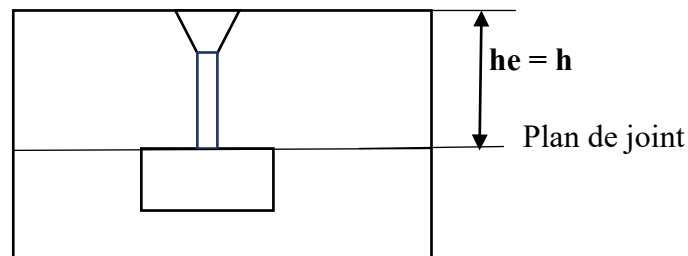


Figure I 22. Position du canal de coulée en haut par rapport à la cavité

- **En dessous (Bottom)**. Le système de coulée est situé légèrement au-dessus de la cavité à remplir

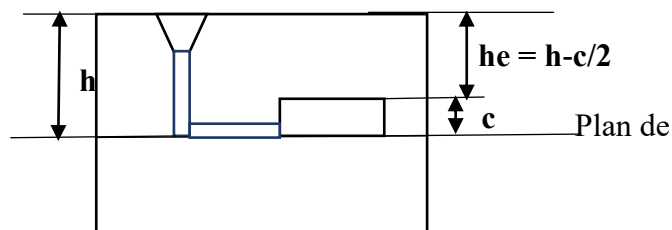


Figure I 23. Position en dessous du canal de coulée par rapport à la cavité

- **De part et d'autre (parting).** Le système de coulée est situé de part et d'autre de la cavité à remplir

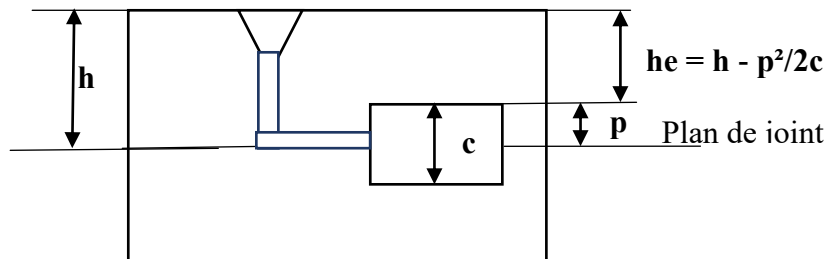


Figure I 24. Position de part et d'autre du canal de coulée par rapport à la cavité

Les rapports des sections de choc Sc , du canal (runner) SR et de l'attaque (ingate) Si . Selon la pression

- Pressurisé. Le cas du moulage des aciers ; $Sc, SR, Si : (1, 2, 1)$
- Non pressurisé. Le cas du moulage des alliages de Al, Cu, Mg, Zn ; $Sc, SR, Si : (1, 2, 4)$

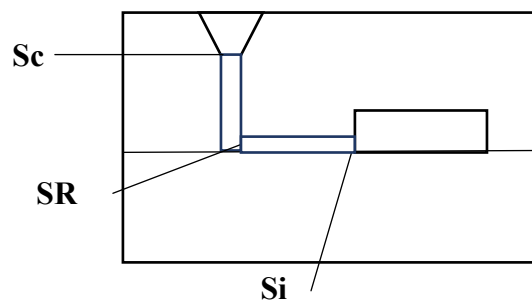


Figure I 25. Identification des sections du système de coulée

I.24. Les parois

Lors de la conception des canaux de coulée il faut éviter les variations brusques d'épaisseur (l'accroissement de masse doit être progressif). Cela a pour effet de créer des contraintes internes lors du refroidissement, empêche un écoulement optimal de la matière et crée un point de fragilité sur la pièce.

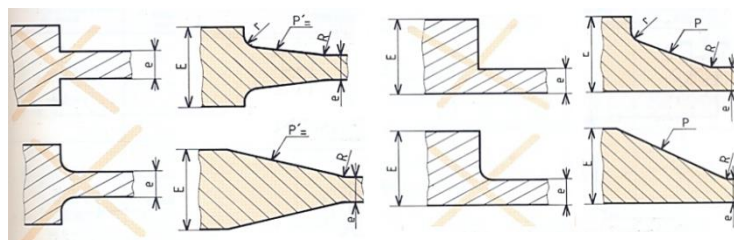


Figure I 26. Critères de sélection des parois

Les pentes et les rayons de raccordement sont définis par l'abaque et le tableau suivants :

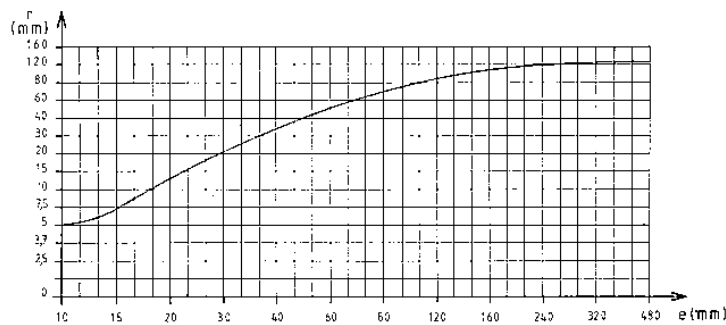


Figure I 27. Abaque reliant les raccordements aux épaisseurs des parois

Tableau I 9. Caractéristiques dimensionnelles des parois

Tracé	Alliages d'aluminium Alliages de magnésium Alliages de zinc	Aciers moulés (1) Cupro-aluminium (2) Alliages de cuivre (3) Sauf bronze	Fontes GL (1) Fontes GS (2) Bronze (3)
	$0,4e < r \leq e$ Sous-pression : $r \geq e$	$\left. \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \right\} r = e$	$\left. \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix} \right\} r = 0,4e$ $2 : r = 0,8e$
	$h = \frac{e + E}{2}$ $r = \frac{e + E}{2}$ $p = 20 \%$ $R = 5 E$	$\left. \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \right\} \begin{matrix} h = 0,6 E \\ r \rightarrow \text{Courbe} \\ p = 15 \% \end{matrix}$ $\left. \begin{matrix} 3 \end{matrix} \right\} \begin{matrix} h = \frac{e + E}{2} \\ r = \frac{e + E}{2} \\ p = 20 \% \end{matrix}$ $R = 5 E$	$E \geq 25 :$ $r \geq 4$ $R = 5 E$ $p = 10 \%$ $h = \frac{E + e}{2}$ $\left. \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix} \right\} r = 0,3 E$ $2 : r = 0,8 E$ (mm)
	$r = e$ Sous-pression : $0,5 \leq \frac{e}{E} \leq 0,6$	$\left. \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \right\} r \rightarrow \text{Courbe}$	$E < 25$ $r \geq 4$ $\left. \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix} \right\} r = 0,4 E$ $2 : r = 0,8 E$ mm

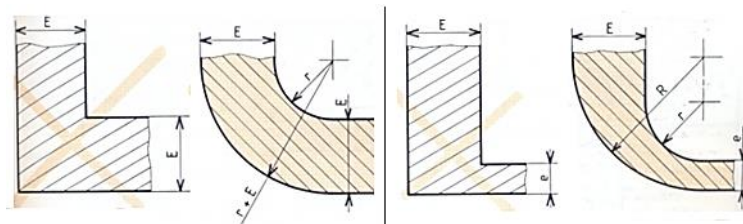
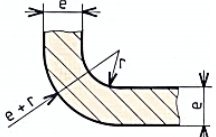


Figure I 28 : Définition des raccordements des parois

I.25. Les raccordements

1er cas. Si le raccordement dispose de la même épaisseur en entrée et en sortie il faut choisir le rayon de raccordement "r" comme indiqué et faire le tracé des 2 rayons (r et r + E) en partant du même centre.

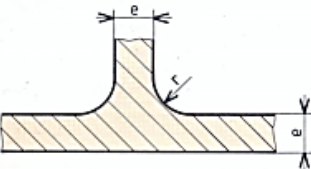
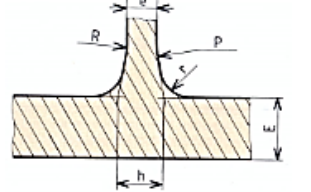
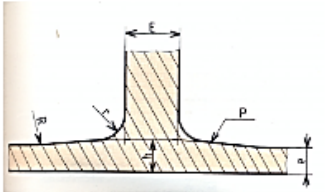
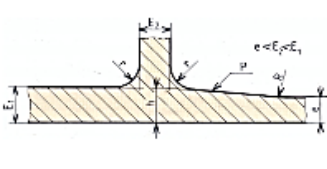
Tableau I 10. Caractéristiques dimensionnelles raccordements

Tracé	Alliages d'aluminium Alliages de magnésium Alliages de zinc	Aciers moulés (1) Cupro-aluminium (2) Alliages de cuivre (3) Sauf bronze	Fontes GL (1) Fontes GS (2) Bronze (3)
	$0,4e < r \leq e$ Sous-pression : $r \geq e$	$\left. \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \right\} r = e$	$\left. \begin{matrix} 1 \\ 3 \end{matrix} \right\} r = 0,4e$ $2 : r = 0,8e$

2eme cas. Si les deux parois ne disposent pas de la même épaisseur, il faut ajouter la condition de tangence sur les bords et faire le traçage des deux rayons de raccordement qui ne disposent pas du même centre.

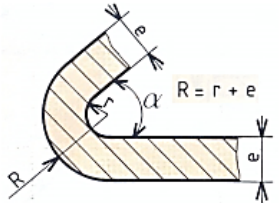
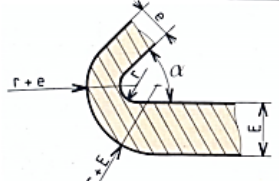
Raccordement d'angle en forme de "T"

Tableau I 11. Caractéristiques dimensionnelles raccords en T

Tracé	Alliages d'aluminium Alliages de magnésium Alliages de zinc	Aciers moulés (1) Cupro-aluminium (2) Alliages de cuivre (3) Sauf bronze	Fontes GL (1) Fontes GS (2) Bronze (3)
	$r = e$	1 } $r \rightarrow$ Courbe 2 } 3 : $r = 0,4e$	1 } $r = 0,4e$ 3 } 2 : $r = 0,8e$
	$e < 0,6 E$: $r = e$ $h = \frac{E+e}{2}$ $p = 10 \%$ Sous pression : $p = 0$ $e > 0,6 E$: $p = 0$	$E > 25$ ou $e < 0,6 E$ $h = \frac{E+e}{2}$ 1 } $r \rightarrow$ Courbe 2 } $h = 0,6 E$ 3 } $p = 8 \%$ $h = 5 E$ $r = 0,5 E$ $p = 10 \%$ $R = 10 E$ $e > 0,6 E$: $p = 0$ (mm)	$E > 15$ ou $e < 0,6 E$ $h = \frac{E+e}{2}$ 1 } $r = 0,3 E$ 2 } $p = 10 \%$ 3 } $r = 0,8 E$ $p = 10 \%$ $e > 0,6 E$: $p = 0$ (mm)
	$E \geq 1,6 e$ $r = e$ $h = \frac{E+e}{2}$ $p = 20 \%$ $R = 5 e$ Sous pression : $P = 0$ $0,3 \leq \frac{e}{E} \leq 0,4$	$E \geq 1,6 e$ 1 } $r \rightarrow$ Courbe 2 } $h = 0,6 E$ 3 } $P = 8 \%$ $R = 5 E$	$E \geq 1,6 e$ $h = \frac{E+e}{2}$ $p = 20 \%$ $R = 10 E$ 1 } $r = 0,3 E$ 3 } 2 : $r = 0,8 E$
	$h = \frac{E+e}{2}$ $p = 20 \%$ $R = 5 E_1$ $r = e$	$E_1 > 25$ mm $r \rightarrow$ Courbe 1 } $h = 0,6 E_1$ 2 } $p = 8 \%$ $R = 5 E$ $r = 0,4 E_1$ 3 } $h = \frac{E+e}{2}$ $p = 20 \%$ $R = 5 E$	$h = \frac{E_1+e}{2}$ $p = 20 \%$ $R = 5 E_1$ 1 } $r = 0,4 E_1$ 2 } 3 : $r = 0,8 E_1$

Raccordement d'angle en forme de "V"

Tableau I 12. Caractéristiques dimensionnelles raccords en V

Tracé	Alliages d'aluminium Alliages de magnésium Alliages de zinc	Aciers moulés (1) Cupro-aluminium (2) Alliages de cuivre (3) Sauf bronze	Fontes GL (1) Fontes GS (2) Bronze (3)
	$r = e$	1 } $r = 1,5e$ 2 } 3 } $\begin{cases} \alpha < 60^\circ : r \geq 10 \\ 60^\circ < \alpha < 90^\circ : r \geq e \\ e > 40 : r = 1,5 \end{cases}$ (mm)	$\alpha < 60^\circ : r > 10 > e$ $60^\circ < \alpha < 90^\circ$ 1 } $r \geq e$ 2 } 3 } (mm)
	$r = \frac{E+e}{2}$	$r = \frac{E+e}{2}$	1 } $\alpha < 60^\circ :$ 2 } $r \geq 10$ 3 } $r = \frac{E+e}{2}$ (mm)

Raccordement d'angle en forme de "Y"

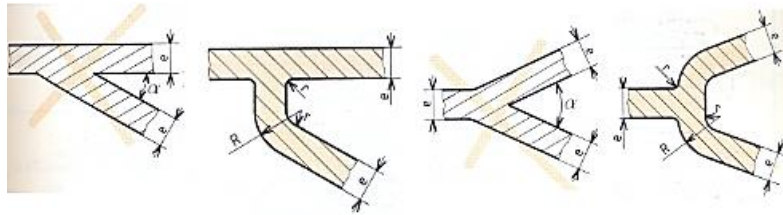


Figure I 29. Définition des raccords en Y

Tableau I 13. Caractéristiques dimensionnelles raccords en Y

Tracé	Alliages d'aluminium Alliages de magnésium Alliages de zinc	Aciers moulés (1) Cupro-aluminium (2) Alliages de cuivre (3) Sauf bronze	Fontes GL (1) Fontes GS (2) Bronze (3)
	$a \geq E + e$ $p = 10 \%$ $a \geq E + e$ $r = e$	$a \geq E + e$ $1 \left\{ \begin{array}{l} r \rightarrow \text{Courbe} \\ p = 15 \% \end{array} \right.$ $3 \left\{ \begin{array}{l} r = 0,3 E \\ p = 10 \% \end{array} \right.$	$a \geq E + e$ $p \geq 10 \%$ $a \geq E + e$ $1 \left\{ \begin{array}{l} r = 0,3 E \\ p = 10 \% \end{array} \right.$ $3 : r = 0,8 E$
	$e < E$ $a = 0 \text{ possible}$ $\rightarrow r > e$ $R = r + e$	$e = E :$ $a \geq 4 e$ $1 \left\{ \begin{array}{l} r = e \\ 2(R = 2 e) \end{array} \right.$ $e < E :$ $3 \left\{ \begin{array}{l} a = 0 \text{ possible} \\ \rightarrow r > e \end{array} \right.$	$e = E : \text{identique au 1er}$ $e < E :$ $a = 0 \text{ possible}$ $E < 25 \text{ mm et } e > 0,6 E$ $r \geq e$ $R = r + e$ $\alpha < 60^\circ \rightarrow r \geq 10$ $1 \left\{ \begin{array}{l} r = 0,3 E \\ 3 \left\{ \begin{array}{l} r = 0,3 E \\ 2 : r = 0,8 E \end{array} \right. \end{array} \right.$ $E > 25 \text{ mm ou } e < 0,6 E$ $r \geq e, R = r + \frac{E+r}{2}$ $\alpha < 60^\circ \rightarrow r \geq 10 \text{ mm}$

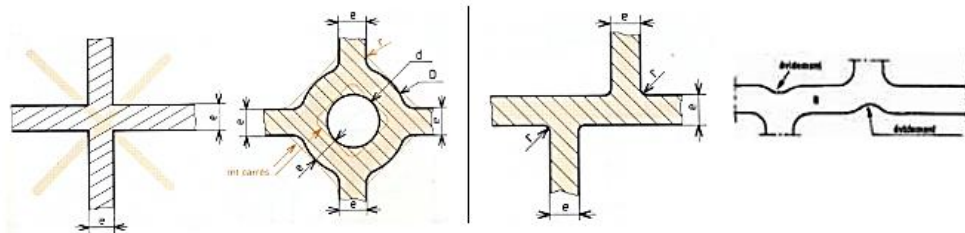


Figure I 30. Définition des raccords en X

Raccordement d'angle en forme de "X"

Tableau I 14. Caractéristiques dimensionnelles raccords en X

Tracé	Alliages d'aluminium Alliages de magnésium Alliages de zinc	Aciers moulés (1) Cupro-aluminium (2) Alliages de cuivre (3) Sauf bronze	Fontes GL (1) Fontes GS (2) Bronze (3)
	$a \geq 2e$ $r = e$ Sous-pression : $a = 0$ possible	$1 \left\{ \begin{array}{l} a \geq 2e \\ r \rightarrow \text{Courbe} \end{array} \right.$ $3 \left\{ \begin{array}{l} a \geq 2e \\ r = e \end{array} \right.$	$1 \left\{ \begin{array}{l} a \geq 2e \\ r = 0,4 e \end{array} \right.$ $3 \left\{ \begin{array}{l} a \geq 2e \\ r = 0,8e \end{array} \right.$
	$r = e$	parois $e \geq 12$ $1 \left\{ \begin{array}{l} d \geq 4e \\ r \rightarrow \text{Courbe} \end{array} \right.$ (mm)	parois $e \geq 12$ $1 \left\{ \begin{array}{l} d \geq 20 \\ r = 0,25e \end{array} \right.$ (mm)
	$a \geq 2e$ $r = e$ $R = 2e$	$1 \left\{ \begin{array}{l} a \geq 4e \\ r \rightarrow \text{Courbe} \end{array} \right.$ $3 \left\{ \begin{array}{l} R = r + e \end{array} \right.$	$a \geq 25$ $R = 1,3e$ $1 \left\{ \begin{array}{l} r = 0,3e \end{array} \right.$ $3 : r = 0,8e$ (mm)

I.26. Les nervures

La présence de nervures dans les pièces moulées peut compliquer les opérations de démoulage, notamment lorsque leur géométrie crée des zones en contre-dépouille. Afin de limiter ces difficultés, il est recommandé d'adapter la conception des nervures de manière à faciliter l'extraction du modèle tout en conservant les propriétés mécaniques de la pièce. Dans certains cas, l'augmentation contrôlée de l'épaisseur générale de la pièce peut permettre de réduire ou d'éliminer l'utilisation des nervures.

Pour améliorer la fabricabilité des pièces moulées, plusieurs solutions de conception peuvent être adoptées :

- Remplacer les nervures difficiles à démouler par des formes tronconiques facilitant l'extraction du modèle.
- Modifier l'orientation ou la géométrie des nervures afin de réduire les risques d'arrachement du sable durant le démoulage.

- Utiliser des structures en caisson creux pour les grandes équerres afin de conserver une bonne résistance mécanique tout en respectant le principe des épaisseurs constantes.
- Remplacer les nervures à section rectangulaire par des nervures galbées ou semi-ovales afin d'améliorer l'écoulement du métal liquide et de limiter les variations brusques d'épaisseur [20].

I.27. Trous et alésages

Les alésages bruts de fonderie sont obtenus à l'aide de noyaux pour le moulage en sable et à l'aide de broche pour le moulage en coquille. Les noyaux réalisés en matière réfractaire sont fortement sollicités au moment de la coulée. Ils doivent donc avoir des dimensions minimales.

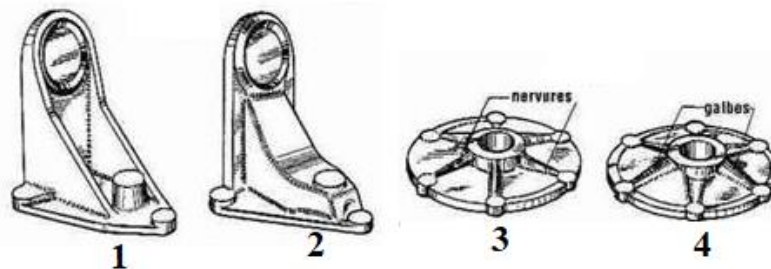


Figure I 31. Critères de choix des nervures sur les moules

L'avantage des noyaux en sable est qu'ils sont détruits lors du décochage. Il n'y aura donc pas besoin de respecter un angle de dépouille pour ces pièces. Le diamètre minimal réalisable en fonction de l'épaisseur de la matière et de la profondeur de l'alésage peut être déterminé par l'abaque suivant.

Pour les trous, le diamètre minimal réalisable par fonderie dans une paroi dont la longueur est au moins 5 fois l'épaisseur,

Dans le cas où les plaques trouées sont fortement sollicitées, les contraintes s'accumulent aux points de faiblesse et notamment les perçages. La géométrie de la pièce près de ces zones de faiblesse doit être modifiée pour les renforcer.

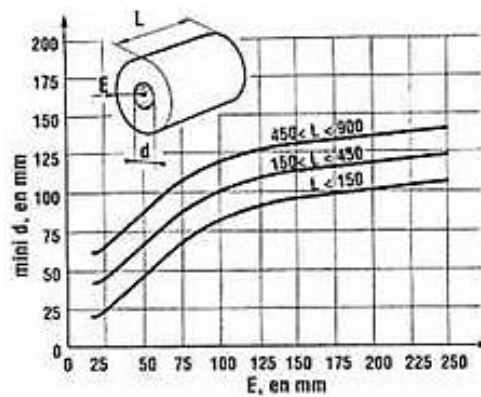


Figure I 32. Abaques de détermination des alésages sur les moules cas des cylindres

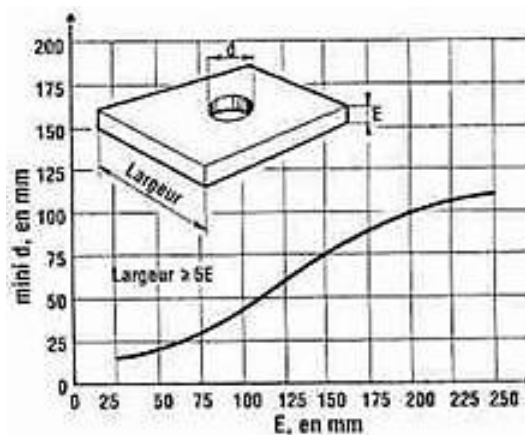


Figure I 33. Abaques de détermination des alésages sur les moules cas des plaques

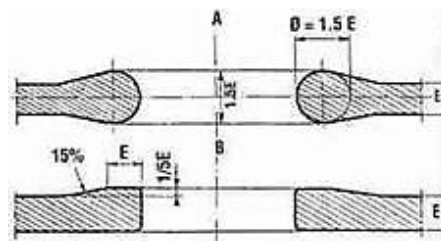


Figure I 34. Adoption des formes de renfort des alésages sur les moules

I.28. Les bossages.

Les bossages sont des éléments de forme généralement ajoutés aux pièces moulées afin de permettre l'assemblage par vis, boulons ou autres dispositifs de fixation mécanique. Ils sont conçus de manière à créer des zones renforcées comportant des perçages ou des surfaces adaptées à la réception des éléments de fixation.

Lors de la conception des bossages, il est important de limiter la concentration excessive de matière afin de réduire la masse totale de la pièce et d'éviter l'apparition de défauts liés au retrait ou à la solidification, tels que les retassures. Pour cette raison, les bossages sont souvent réalisés

avec des formes optimisées et des transitions progressives permettant d'assurer une bonne répartition des contraintes mécaniques ainsi qu'un écoulement correct du métal liquide durant la coulée [21].

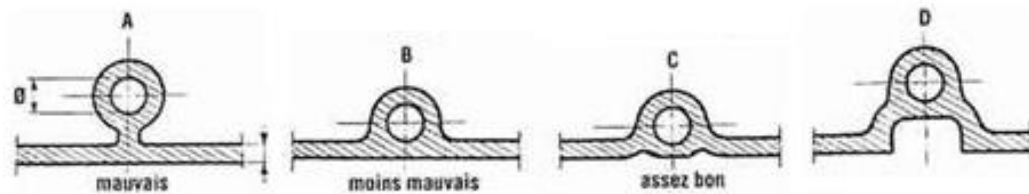


Figure I 35. Formes des bossages à adopter sur les moules

I.29. Le débit de coulée

Le débit de coulée représente la quantité de métal liquide introduite dans le moule par unité de temps durant l'opération de remplissage. Ce paramètre joue un rôle essentiel dans la qualité finale de la pièce moulée et doit être déterminé avec précision en fonction du volume de la pièce ainsi que des différents éléments constituant le système de coulée, notamment le cône de coulée, les canaux d'alimentation, les attaques et les masselottes.

Une détermination correcte du débit de coulée permet d'assurer un remplissage homogène et continu du moule tout en limitant l'apparition de défauts tels que les retassures, les inclusions gazeuses, les turbulences ou les manques de remplissage. Le contrôle du débit influence également les conditions de solidification et la qualité métallurgique des pièces obtenues [22].

$$Q = Vt / t \quad \text{Eq. I. 3}$$

Où :

Q : débit de coulée (m³/s)

Vt : volume total de métal à couler (m³)

t : temps de remplissage (s)

I.30. La vitesse de coulée

Elle est déterminée d'après l'équation de continuité et l'équation de Bernoulli

$$v = c \cdot \sqrt{(2 \cdot g \cdot h_e)} \quad \text{Eq. I. 4}$$

c. Facteur de friction 0.7 à 0.8 pour le moulage en sable et 0.9 à 1 pour le moulage métallique

I.31. L'aire de choc

C'est l'aire Sc du canal descendant du cône de coulée

$$Sc = Q/v \quad \text{Eq.I.5}$$

Où :

Sc : section du canal de choc (m^2)

Q : débit de coulée (m^3/s)

v : vitesse du métal (m/s)

Remarque :

La section de choc Sc peut être déduite en fonction des volumes Vt ou des masses Mt selon le besoin par les équations suivantes

$$Sc = Vt / t.c. \sqrt{(2.g.h.e)} \quad \text{Eq.I.6}$$

$$\text{Puisque } \rho = mt/Vt \text{ alors; } Sc = mt / \rho.t.c. \sqrt{(2.g.h.e)} \quad \text{Eq.I.7}$$

I.32. Masse totale de métal à considérer

Le volume total comprend :

$$Vt = V_{\text{modele (cast)}} + V_{\text{systeme de coulee (chenal+runner+gating)}} + V_{\text{masselottes (riser)}}$$

$$Mt = Vt . \rho \quad \text{Eq.I.8}$$

Ainsi on définit la masse totale :

$$mt = m_{\text{cast}} + m_{\text{gating}} + m_{\text{riser}} \quad \text{Eq.I.9}$$

La masse de la pièce mc est liée à la masse totale mt par le rapport Cy casting yield

$$Cy = mc/Mt = 0,6 \text{ à } 0,7 \quad \text{Eq.I.10}$$

I.33. La masselotte

Les masselottes, appelées également *risers* en anglais, sont des réserves de métal liquide intégrées au système de coulée afin d'alimenter la pièce pendant la phase de solidification et de compenser le retrait volumique du métal. Lors du remplissage du moule, le métal liquide pénètre dans l'empreinte puis remonte dans les cavités prévues pour les masselottes. Ces dernières doivent se solidifier après la pièce afin de maintenir un apport continu de métal liquide vers les zones en cours de contraction.

Les masselottes sont généralement placées à proximité des parties massives de la pièce, qui sont les dernières zones à se solidifier. Leur raccordement avec la pièce doit être correctement dimensionné afin d'assurer une alimentation efficace en métal liquide. Une attaque de masselotte trop longue ou de faible section peut refroidir prématurément et empêcher une alimentation correcte, favorisant ainsi l'apparition de retassures.

On distingue principalement plusieurs types de masselottes :

- Les masselottes débouchantes ou exothermiques.
- Les masselottes borgnes.
- Les masselottes borgnes latérales.

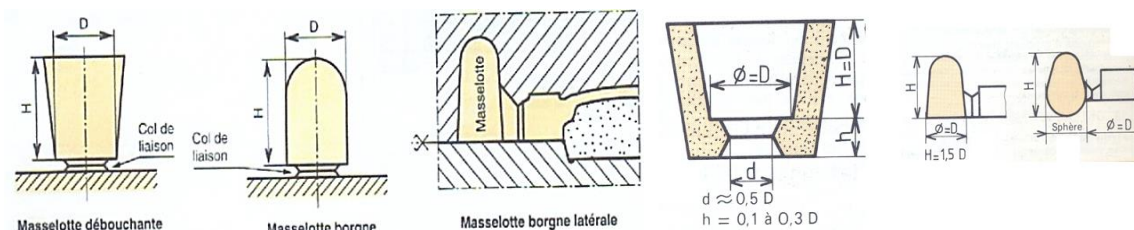


Figure I 36. Différents types de masselottes

pièce. Pour cela, la pièce est généralement décomposée en volumes simples afin d'analyser l'ordre chronologique de solidification. Les masselottes doivent alors être positionnées de manière à alimenter les volumes se solidifiant en dernier lieu [23].

Pour cette raison on calcule les modules de refroidissements MR de chaque volume élémentaire et qui sont données par l'expression Eq I.11 suivante:

$$MR = \frac{V}{S} = \frac{\text{Volume d'une partie de la pièce}}{\text{surface de refroidissement de cette partie}} = \frac{\text{section d'une partie de la pièce}}{\text{périmètre de refroidissement de cette partie de pièce}}$$

Ces derniers doivent être croissants vers la masselotte. Il faut faire le choix du sens de moulage et du système de remplissage afin de diriger la solidification et disposer des attaques de coulée dans la masselotte si c'est possible. La portion de la pièce qui dispose du module de refroidissement le plus important est refroidie la dernière, donc la masselotte doit être placée sur cette zone.

Pour déterminer le volume de la masselotte V_m afin de combler le déficit volumique de la partie de la pièce alimentée par la masselotte (de volume V_p), on doit se servir d'expression:

$$\text{Eq I.12} \quad \eta V_m = r V_p$$

Où ; η est le rendement de la masselotte, il est de 1/6 pour une masselotte débouchante et de 1/2 pour une masselotte borgne, r étant le retrait donné par le tableau suivant:

Tableau I 15. Le retrait dans les masselottes

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

I.34. Temps de solidification du riser

$$\text{TR} = C_m \cdot (V/S_{\text{contact}})^n \quad \text{Eq.I.13}$$

Où ;

C_m . Est une constante qui dépend du matériau du moule et épaisseur, caractéristiques métalliques et température $\approx 2.2 \text{ s/mm}^2$

S_c : aire de contact la matière / moule (sable)

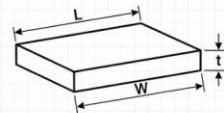
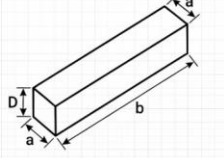
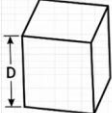
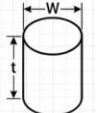
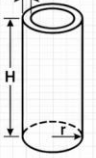
$$n=2$$

il ne faut pas oublier que le riser doit se solidifier apres la piece ainsi.

$$(V/S_{\text{contact}})_{\text{Riser}} = 1.2 (V/S_{\text{contact}})_{\text{cast}}$$

$(V/S_{\text{contact}})_{\text{cast}}$: peut-être calcule ou estime selon le tableau ci après

Tableau I 16. Tableau des approximations V/S_{contact}

Casting Shape	Modulus, M_c	
Plate	$\frac{t}{2}$	
Long Bar	$\frac{\text{Volume}}{2(a+b)}$	
Cube	$\frac{D}{6}$	
Cylinder	$\frac{D}{6}$	
Sphere	$\frac{D}{6}$	
Hollow Cylinder	$\frac{rH}{2(r+H)}$	

I.35. Temps de remplissage

$$TR = Vt / Sc \cdot C \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_e} \quad \text{Eq.I. 14}$$

Le temps de coulage :

Le temps de coulage peut être estimé en fonction de la massivité de la piece en prenant en compte la masse totale et l'épaisseur moyenne de la pièce.

$$T = \sqrt[3]{mt \cdot emoy} \quad \text{Eq.I. 15}$$

Avec : $emoy = \sum ei / n$ Ou ;

ei. Les épaisseurs des parois de la pièce a mouler

n. Nombre d'éléments

I.36. Le temps de coulage

$$T_{\text{sol}} = C_m \cdot (V/S_{\text{contact}})^n \quad \text{Eq.I. 16}$$

Ou ;

C_m . Constante dépendante du moule $\approx 2.2 \text{ s/mm}^2$

Sc : aire de contact la matiere / moule (sable)

Il ne faut pas oublier que l'élément le plus fin solidifie plus rapidement. Dans ce contexte les masselottes doivent se solidifier après la pièce à mouler pour assurer son alimentation en métal fondu en cas de besoin. Ainsi on doit considérer que.

$$T_{\text{sol riser}} = 1,2 \text{ à } 1,25 t_{\text{solcast}} \quad \text{Eq I 17}$$

CHAPITRE II. LES JANTES DES ROUES

II.1. Introduction

La conception et la fabrication de jantes dépendent de plusieurs facteurs, notamment les tendances du marché, les avancées technologiques, les normes et les réglementations en matière de sécurité, la disponibilité des matériaux et des composants, ainsi que la demande du marché.

Les jantes en alliage léger sont de plus en plus populaires pour les véhicules, car elles offrent un excellent rapport poids/résistance et peuvent améliorer les performances du véhicule, ainsi que son apparence. De plus, les jantes en alliage léger peuvent également contribuer à réduire la consommation de carburant.

En termes de technologie, l'utilisation de la simulation numérique pour la conception de jantes de roue s'est considérablement développée ces dernières années, ce qui a permis une amélioration significative de la qualité et des performances des jantes des roues. De plus, l'utilisation de matériaux de plus en plus légers et plus résistants, tels que le titane et le carbone, est en train de devenir de plus en plus courante.

II.2. Types de jantes

La Jante est une composante de la roue qui lie le moyeu et le pneu. Sa performance varie selon le type du matériau duquel elle est fabriquée. On distingue principalement trois types de jantes.

II.2.1. Jantes en aluminium

Les jantes en aluminium (parfois appelées jantes en alliage) sont fabriquées d'un mélange d'aluminium et de nickel. La majorité des jantes aujourd'hui sont en alliages d'aluminium moulés, ce qui signifie qu'elles sont fabriquées en coulant de l'aluminium fondu dans un moule. Elles sont légères mais solides, résistent bien à la chaleur et généralement plus attrayantes que les jantes en acier [31].

Un alliage de roue en aluminium combine de l'aluminium avec de petites quantités d'autres éléments qui améliorent la dureté, la résistance à la traction et la durabilité globale du matériau. La composition exacte d'une roue en alliage personnalisée varie d'un fabricant à autre, mais comprend souvent des traces de silicium et de magnésium, entre autres éléments, l'aluminium représentant souvent 95 à 99% de l'alliage.

La plupart des jantes en alliage personnalisées sont coulées ou forgées. Les jantes en alliage

coulé sont plus faciles à produire, tandis que les jantes en alliage forgé sont extrêmement légères et solides, mais aussi plus chères que les jantes coulées.

L'alliage d'aluminium est également plus facile à travailler que l'acier, permettant aux jantes en alliage de se décliner dans une large gamme de designs créatifs et attrayants [32].

II.2.2. Jantes en métal

Les jantes en métal peuvent être fabriquées à partir de différents alliages, ou mélanges de métaux, avec des caractéristiques de maniabilité, des besoins d'entretien et des avantages différents. Les deux principaux types de matériaux de roue automobiles sont l'aluminium et l'acier.

Les jantes en acier sont fabriquées d'un alliage de fer et de carbone. Elles sont plus lourdes mais plus durables et peuvent être plus faciles à réparer et à retoucher. En raison de la façon dont elles sont fabriquées - découpées sur une presse et soudées ensemble - elles n'offrent pas tous les choix esthétiques de rayons des autres types de roues.

Les jantes en acier sont généralement moins chères que les jantes en aluminium [31].

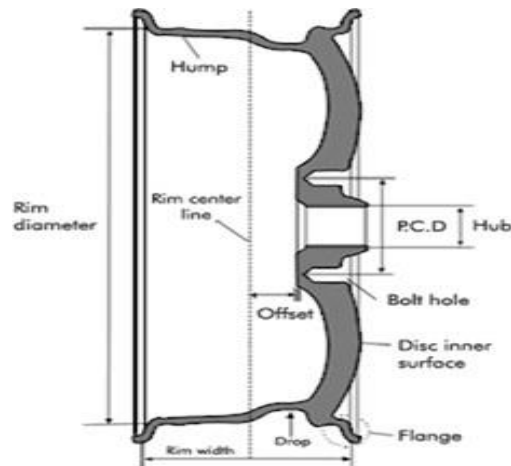
II.2.3. Jantes en alliage

Les jantes en alliage sont fabriquées à partir d'un alliage d'aluminium ou de magnésium. Elles sont généralement plus légères que celles en acier pour la même résistance et offrent une meilleure conduction de la chaleur. Des roues plus légères peuvent améliorer la tenue de route en réduisant les masses non suspendues, permettant à la suspension de mieux suivre pour améliorer l'adhérence. La réduction de la masse globale du véhicule peut également aider à réduire la consommation de carburant et les jantes en alliage sont non corrosives et peuvent résister aux vibrations. La conception et l'analyse des jantes en alliage pour les applications automobiles sont effectuées pour optimiser la masse de la jante en alliage. L'analyse structurelle des jantes en alliage pour voiture utilisant des alliages d'aluminium et de magnésium est effectuée à l'aide de techniques d'éléments finis pour étudier la distribution des contraintes et des déplacements dans les roues des véhicules soumises à l'influence conjointe de la pression de gonflage et de la charge radiale [33].

II.3. Dimensions des jantes

Le dimensionnement des jantes est un sujet complexe qui implique de nombreux facteurs. La largeur de la jante, le diamètre de la jante et le déport sont des mesures importantes à prendre en compte.

- **Diamètre (en pouces) :** Il s'agit du diamètre du fond du talon de la jante, et non du diamètre du bord extérieur de la jante. Le bord de la jante, ou lèvre, s'étend au-delà de la zone du talon pour capturer le talon et l'empêcher de glisser hors de la jante. Si nous disons qu'une roue a un diamètre de 19 pouces, cela signifie que le diamètre du fond de la tringle mesure 19 pouces. Le diamètre du bord extérieur de la jante peut en fait mesurer 22 pouces environ, en fonction de la conception [34].
- **Largeur de la jante (en pouces) :** Il s'agit de la distance entre le siège du talon extérieur et le siège du talon intérieur. Tout comme le diamètre de la jante, la largeur de la jante n'est pas mesurée en fonction de la largeur totale de la roue (vous ne devez-vous préoccuper que de la largeur d'assise que la roue offre aux talons du pneu). Si l'on dit qu'une roue a une largeur de 10 pouces, la distance entre les sièges des talons est de 10 pouces. La largeur totale, mesurée entre les bords extérieurs de la jante est automatiquement plus grande que la largeur de la jante [34]
- **ET (mm) :** De l'allemand « Einpresstiefe » ou « Offset » en anglais (profondeur d'empreinte) ; cette mesure indique la distance entre le plan milieu de la largeur de la jante et sa face sur laquelle le moyeu de la roue prend appui ; voir Figure 0.1.
- **PCD (mm) :** De l'anglais « Pitch Circle Diameter » (Diamètre de perçage ou Entraxe) ; cette mesure indique le diamètre du cercle qui relie le centre des orifices de fixation.
- **Nombre de trous :** Nombre d'orifices sur la jante qui sont nécessaires pour la fixer à la voiture. Cette mesure est indiquée avec le PCD.
- **Centrage (mm) :** Également appelé « Center Bore » (CB) en anglais et parfois Hub ; cette mesure indique le diamètre de l'orifice central sur lequel le moyeu de la voiture vient se placer [35].

Exemple : 6J x 15 H2 ET43**Figure II 1. Marquage des jantes en alliage [34].**

- **6** : Largeur de la jante en pouces (1 pouce : 25.4 mm)
- **15** : Diamètre de la jante en pouces
- **ET43** : Déport de la jante

La lettre **J** correspond au profil de la joue de la jante. C'est le profil de joue de la jante le plus usuel.

Le marquage **H2** s'agit du profil de la coupe (contour) de la jante. Ce marquage se situe en général à la fin de la série de chiffres et de lettres gravée sur la jante. Cela correspond en fait à la rigidité de la jante. Il existe plusieurs types de contours de jante [37].

Marquage	H	H2	FH	FH2	CH	EH2	EH2+
Profil							
Description	Hump	Double Hump	Flat Hump	Double Flat Hump	Combination Hump	Extended Hump	Extended Hump +
Forme	intérieure	courbure	courbure	courbure plate	courbure plate	courbure élargie	courbure élargie
	extérieure	normale	courbure	normale	courbure plate	courbure élargie	courbure élargie

Figure II 2: Liste des profils de coupe d'une jante avec une inclinaison de la paroi de 5° [37].**II.4. Matières des jantes [38]**

Les jantes haut de gamme pour voitures, aussi connues sous le nom de jantes composites

en alliage, sont fabriquées à partir de l'assemblage de divers matériaux :

- L'aluminium,
- Le kevlar,
- Le magnésium,
- Le carbone,
- Et autres matériaux composites.

Les différents matériaux peuvent être assemblés avec une colle époxy à forte résistance pour une plus grande solidité.

Pour fabriquer une jante en aluminium, on utilise un alliage de ce métal car l'aluminium pur est trop souple. L'alliage est créé en mélangeant de la bauxite transformée en aluminium avec d'autres substances. Ensuite, la jante est formée à partir de cet alliage.

L'appellation « jante alu » n'est donc pas exacte et crée souvent la confusion avec la jante en alliage. La différence entre ces deux types de jantes tient dans :

- Les alliages utilisés pour leur composition,
- Le façonnage des alliages : forgé ou moulés.

Les jantes en métal (tôle) pour automobiles peuvent être fabriquées à partir de tôle en acier. Les pièces en tôle pour la fabrication des jantes peuvent être formées à chaud à partir d'un produit plat en acier.

OZ Racing est un fabricant bien connu de jantes en aluminium de haute performance. OZ utilise sa propre technologie de formation de flux, qui combine les caractéristiques de la coulée et de la forge pour produire une jante de haute résistance avec un poids réduit. Cette technologie permet à OZ d'utiliser moins de matériaux pour produire une jante ayant la même ou une plus grande résistance qu'une roue plus lourde fabriquée par un procédé de moulage traditionnel. OZ utilise une variété d'alliages d'aluminium dans leur production de bordures de jantes, y compris :

A356 T6 : Cet alliage d'aluminium est couramment utilisé dans la production des jantes d'OZ. C'est un alliage d'aluminium de haute résistance qui est résistant à la corrosion et à la fatigue.

7075 T6 : Cet alliage d'aluminium est utilisé dans certaines des jantes de course de haute

performance d'OZ. C'est un alliage de haute résistance qui est également léger, ce qui le rend idéal pour les applications de course.

6061 T6 : Cet alliage est souvent utilisé dans les jantes routières d'OZ. Il s'agit d'un alliage d'aluminium de haute résistance qui est léger et a une bonne résistance à la corrosion.

Dans l'ensemble, OZ utilise une gamme d'alliages d'aluminium pour produire ses jantes, en fonction de la résistance, du poids et des caractéristiques de performance souhaitées pour chaque application [39].

Le Tableau I. 1 montre les compositions de certains des alliages les plus couramment utilisés. Plusieurs dénominations d'alliage selon (AA : Aluminum Association) comprennent une lettre de préfixe. Les alliages qui commencent par la lettre A sont souvent utilisés pour des applications de moulage. La lettre B est en fait une désignation pour les alliages d'aluminium qui ont une teneur en silicium élevée et qui sont utilisés pour le moulage sous pression. Ces lettres sont utilisées pour distinguer les alliages qui ont la même composition générale mais qui se différencient par le pourcentage d'impuretés ou par la proportion d'éléments d'alliage mineurs, par exemple 356 et A356, ou 380, A380 et B380 [40].

Tableau II 1. Compositions des alliages Al-Si commerciaux les plus utilisés [40].

Alliage	Désignation actuelle ISO	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Sn
319.0	Al-Si5Cu3	5.5-6.5	1.0	3.0-4.0	0.50	0.10	0.35	1.0	0.25	-
A356.0	Al-Si7Mg (EN AC-42100 -Al Si7Mg0,3)*	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.25-0.45	-	0.10	0.20	-
A357.0	Al-Si7Mg (EN AC-42200 -Al Si7Mg0,6)*	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.40-0.7	-	0.10	0.20	-
A380.0	Al-Si8Cu3Fe	7.5-9.5	1.3	3.0-4.0	0.50	0.10	0.50	3.0	-	0.35
A413.0	Al-Si12Cu (EN AC-47000 -Al Si12(Cu)) *	11.0-13.0	1.3	1.0	0.35	0.10	0.50	0.50	-	0.15
B390.0	Al-Si17Cu4Mg	16.0-18.0	1.3	4.0-5.0	0.50	0.45-0.65	0.10	1.5	0.20	-
*Désignation suivant la norme NF EN 1706. Les compositions sont en pourcentage massique et les valeurs individuelles sont des limites maximales. Le reste est constitué d'aluminium et d'autres traces telles que Cr, Pb et Be.										

Les alliages Al-Si-Mg tels que les A356 et A357 sont largement utilisés dans l'industrie automobile et aéronautique. Par exemple, les jantes en alliage A356.0 sont couramment utilisées dans l'industrie automobile [40].

II.6. Conclusion

Les jantes sont des éléments importants des roues des véhicules. Elles sont disponibles dans une variété de matériaux et de dimensions pour répondre aux besoins des différents types de véhicules et terrains. Les principaux pays exportateurs d'aluminium et d'alliages d'aluminium sont la Chine, la Russie, le Canada, l'Inde et les Émirats arabes unis. Les importateurs algériens les plus importants sont PIM Algérie et STM Steel. Enfin, il existe de nombreux fabricants de jantes dans le monde, allant des grandes multinationales aux petites entreprises locales.

II.7. Procédés de fabrication des jantes

II.7. 1. Introduction

Les jantes en acier, qui constituent l'alternative la plus simple et la moins chère aux jantes en alliage pour la locomotion des véhicules, doivent passer par un certain nombre de processus de fabrication pour être produites. Même une simple plaque d'acier doit subir ces processus pour que les jantes en acier puissent être produites.

Le fabricant doit disposer d'un certain nombre d'instruments pour garantir la sécurité et la haute qualité des jantes avant qu'elles ne soient expédiées au consommateur afin d'assurer la sécurité des différentes voitures du secteur automobile [53].

II.7.2. Procédés de fabrication des jantes en métal

II.7.2.1. Découpage de la tôle en acier

La guillotine, un type d'instrument utilisé pour couper les plaques de métal, notamment l'aluminium, l'acier, le laiton, le bronze et le cuivre, est utilisée tout au long du processus de production pour couper les plaques d'acier. Malgré son nom peu flatteur, la guillotine est également un outil couramment utilisé pour couper ou façonner les feuilles en plastique. Elle se caractérise par des bords relativement carrés, contrairement aux lames ou aux outils de coupe conventionnels [53].



Figure II 3. Découpage de la tôle en acier [53].

II.7.2.2. Processus de laminage – conformation de la jante

La transformation d'un corps métallique en un autre corps distinct est appelée conformation du métal.

Il existe deux catégories de procédés de formage : les opérations mécaniques où les ajustements de style résultent de l'application de tensions externes, et les méthodes métallurgiques où les modifications de forme résultent de l'exposition à des températures élevées.

Les procédés mécaniques comprennent aussi bien les méthodes d'usinage par déformation, pour lesquelles les contraintes appliquées sont invariablement supérieures à la limite susmentionnée, que les procédés de déformation plastique pour lesquels les contraintes appliquées sont souvent inférieures à la limite de résistance à la traction. Par conséquent, la forme finale est obtenue par élimination du contenu. Ces procédés sont également appelés "Procédés de mise en forme - Mécanique" par nature [53].



Figure II 4. Conception d'une plaque d'acier conformée à la forme d'une jante [54].

II.7.2.3. Soudage par étincelage

Après avoir été conformées, les deux moitiés de la plaque d'acier sont assemblées au moyen d'une procédure appelée soudage bout à bout par étincelage. Peu après, elle est soumise à des étapes visant à éliminer le laitier laissé par la soudure, à raboter le cordon de soudure, à le refroidir et à l'arrondir à nouveau [53].



Figure II 5. Confection de tôles en tambours par soudage en bout [54].

II.7.2.4. Tronçonnage, rabotage et coupe en bout

Après l'opération de soudage, le joint de soudure créera des scories de soudage sur les surfaces intérieures et extérieures. Le laitier peut être enlevé et la surface du joint de soudure peut être rendue plate et lisse à l'aide d'une unité de machine spécifique composée d'une rogneuse, d'une raboteuse et d'une machine à couper les extrémités [54].



Figure II 6. Tronçonnage et ébarbage de la tôle [54].

II.7.2.5. Evasement

Pour faciliter les procédures ultérieures de profilage, les deux bords de la jante seront évasés à l'aide d'une machine à évaser horizontale après les procédures de traitement des joints de soudure, de refroidissement et de ré-arrondissement [54].

II.7.2.6. Processus de laminage - Formage de rouleaux et bordures

Les laminages sont des procédés qui donnent à la jante une variété de formes régulières. Ils se décomposent en trois étapes, chacune d'entre elles étant chargée d'une étape particulière du profilage. Après l'étape de profilage, la jante passe à l'étape de perforation de l'orifice de la valve et elle est alors préparée à recevoir le disque [53].

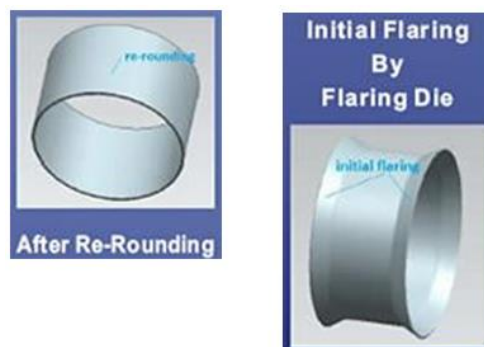


Figure II 7. Premier évasement [54].

Après le profilage des jantes, la procédure d'expansion est effectuée sur une machine d'expansion horizontale. Les jantes produites peuvent être expansées et dimensionnées avec précision à l'aide d'outils spécialisés afin de satisfaire aux spécifications de conception en matière de diamètre [54].

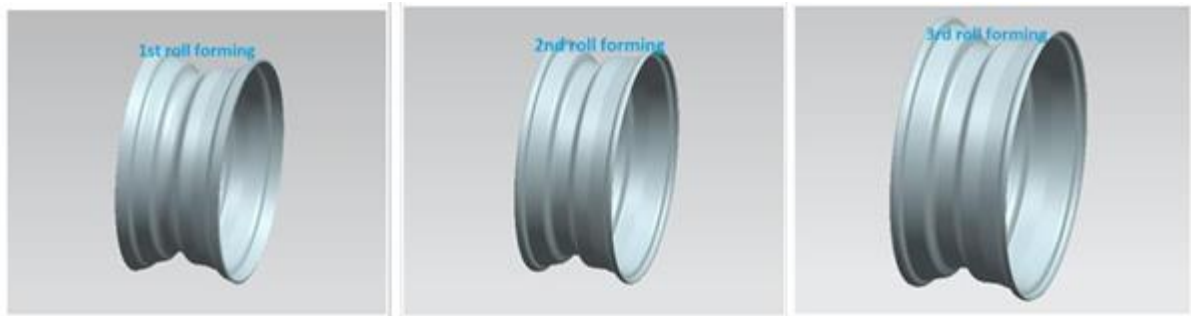


Figure II 8. Trois formes de rouleaux de la jante [53].



Figure II 9. Formage final par laminage [54].

II.7.2.7. Test d'étanchéité au gaz, poinçonnage du trou de la valve

Afin de garantir la qualité du soudage et de minimiser les pertes d'air, des tests de détection de l'étanchéité au gaz sont effectués. Le processus de poinçonnage du trou de la valve qui vient après le profilage est crucial pour la production de jantes en acier. Il permet de poinçonner le trou approprié de la valve sur la partie fonctionnelle de la jante à l'aide d'un moule adapté. Pour le pressage à plat et le poinçonnage des trous sur les jantes de pneus sans chambre à air, une presse à poinçonner les trous des valves est utilisée [54].



Figure II.10. Poinçonnage du trou de la valve [54].

II.7.2.8. Processus de production de disques

a) Application de l'huile lubrifiante pour emboutissage

Pour maintenir les surfaces de l'outil (poinçon et matrice) à l'écart du matériau à conformer, le lubrifiant est un fluide ayant une faible résistance au cisaillement. Cela permet de réduire la friction. Comme dans diverses applications d'incrustation et d'étirement, la performance des lubrifiants dans l'emboutissage de pièces peut affecter de manière significative la procédure. Les lubrifiants créent une surface facilement cisailée ce qui réduit le frottement. Une barrière lubrifiante est un revêtement qui sépare entièrement la surface de la tôle de la surface de la matrice [53].

Pour éviter l'agressivité des matériaux, une huile lubrifiante est appliquée sur les tôles d'acier dans la chaîne de fabrication des disques avant l'emboutissage. La plaque d'acier est ensuite soumise à une procédure de pré-emboutissage avant de subir l'emboutissage final et obtenir la forme du disque [53].

Estampage

Lors de la fabrication du disque, le format de ce dernier est déterminé par la pression appliquée à la tôle d'acier lorsqu'elle est placée sur la matrice d'emboutissage [53].

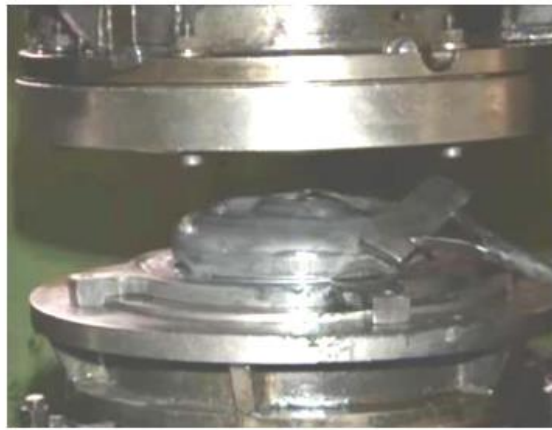


Figure III 12. Disque estampé [53].

b) Processus d'usinage – Perçage

Le perçage permet de créer les trous du disque qui sont couramment en nombre de 3 à 5.

Une fois le perçage terminé, le disque est prêt à être connecté à la jante [53].



Figure III.13. Perçage des disques [53].

II.7.2.9. Terminaison de la jante en acier

Le processus de finition d'une jante en acier consiste à relier le disque au rouleau, à le peindre et à effectuer d'autres finitions avant de l'emballer et de l'expédier au client. Ce processus intervient après la finition du rouleau et du disque.

d) Pressage du disque dans la jante

Le rouleau et le disque forment une jante en acier. Pour supporter le poids du véhicule et transmettre la puissance, la jante et le pneu forment un ensemble étanche. Le disque de la jante distribue la puissance du moteur par l'intermédiaire du moyeu auquel elle est fixée. Les grandes jantes et les disques des véhicules agricoles sont souvent boulonnés, alors que les jantes et les disques des voitures particulières et des camions sont généralement assemblés par soudage [54].



Figure III.12. Pressage du disque sur la jante [54].

e) Soudage Mig-Mag du disque à la jante

Sur la plupart des petites et moyennes jantes, la soudure Mig-Mag est utilisée pour s'assurer que le disque est complètement fixé à la jante. Cependant, la soudure Mig-Mag est remplacée par le boulonnage sur les grandes jantes dont le diamètre est supérieur à 26 pouces. Après la soudure Mig-Mag, la jante est dégraissée pour la débarrasser de toute saleté avant d'être envoyée à l'atelier de peinture [53].



Figure III.13. Soudage Mig-Mag du disque à la jante [53].

f) Processus de phosphatation

La jante est déjà prête après refroidissement de la soudure et son dégraissage. Il ne reste que sa peinture lors de la phosphatation.

Après avoir reçu la poudre de phosphate, la jante doit rester dans un brûleur jusqu'à ce qu'elle soit peinte. Une fois la peinture terminée, la jante sera emballée et expédiée aux clients [53].



Figure III.14. Processus de phosphatation [53].

II.7.3. Procédés de fabrication des jantes en alliage

II.7.3.1. Moulage ou forgeage

c) Moulage

Le moulage est le processus qui consiste à couler du métal en fusion dans un moule pour créer

un objet solide. Dans le cas des jantes en alliage, il s'agit de verser de l'aluminium ou du magnésium en fusion dans un moule conçu pour créer la forme et la taille souhaitées de la jante. Une fois le métal refroidi et solidifié, la jante sera démoulée et subira d'autres traitements.



Figure III.15. Processus de fusion [55].



Figure III.18. Opération de coulée d'alliages de jantes [4].

Le moulage sous pression (LPDC) est une méthode fréquemment utilisée pour mouler des jantes de voiture en alliage d'aluminium. Un moule permanent en acier, constitué généralement de quatre parties principales : deux matrices latérales, une matrice supérieure et une matrice inférieure, est souvent utilisé pour créer l'empreinte/la cavité formant la jante.

Comme le montre la Figure II.18, la structure de la filière est placée au-dessus d'un four scellé qui contient la matière en fusion. En augmentant la pression de l'air au-dessus du métal liquide dans le four de maintien, le métal est forcé de remonter le tube de transfert et de pénétrer dans la cavité de la filière pour la remplir. Une fois remplie, la solidification du métal de la jante est assurée par refroidissement à air ou à eau. Plusieurs canaux dans le système permettent au fluide



Figure III. 19. Remplissage du creuset par le laitier de coulée [56].

de refroidissement de circuler dans un ordre prédéfini [57].

Les avantages des jantes moulées peuvent être présentés comme suit [56] :

- Large choix d'alliages,
- Moins coûteux grâce à un processus d'outillage moins onéreux,
- Pas de limites dans le poids de la jante à mouler,
- Il est facile de produire des pièces compliquées.

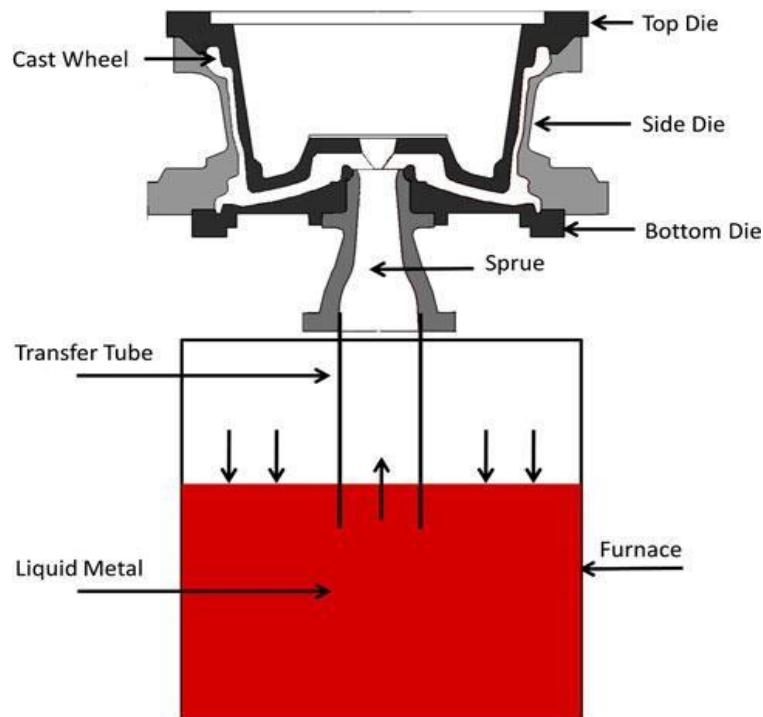


Figure III.20. Schéma du processus LPDC [57].

d) Forgeage

Une pièce en métal solide appelée billette est utilisée pour créer des jantes forgées. Pour modifier la billette, elle est chauffée et soumise à une forte pression. Les roues forgées sont donc des roues en une seule pièce. Toutefois, la procédure de forgeage est un peu plus difficile. Dans ce cas, une ébauche d'alliage de forgeage spécifique est pressée de manière répétée à une température d'environ 500 °C et à une force de pression allant jusqu'à 2000 t pour obtenir une forme semblable à celle utilisée dans le moulage sous pression. C'est également à ce stade qu'on perce les trous. Le bol de la jante a été achevé à l'aide de la procédure de fraisage à rouleaux. Pour la qualité du processus de production et le recuit final de la solution, le contrôle de la température est essentiel. Un processus connu sous le nom de "brunissage" éliminant l'argent est ensuite appliqué, suivi d'un autre cycle de peinture par pulvérisation. Ce processus est assez similaire à celui utilisé pour fabriquer des jantes moulées sous pression. L'utilisation de parois plus minces permet d'augmenter la rigidité tout en réduisant le poids. En raison de l'affinement du grain provoqué par le cycle thermique et le processus de déformation, les jantes forgées sont plus résistantes que les jantes coulées. Le forgeage cohérent permet d'obtenir la même intégrité structurelle avec moins de matériau. Toutefois, les jantes forgées sont plus chères que les jantes coulées si l'on tient compte du coût des machines nécessaires à leur fabrication [56].

II.7.3.2. Extrusion des jantes

Pour la production de jantes en alliage de magnésium, la technologie d'extrusion est couramment utilisée comme le montre la Figure II.19. À partir d'une billette creuse créée par refoulement et poinçonnage de l'alliage tel qu'il a été coulé, une boîte est extrudée vers l'arrière. Une fois l'extrusion terminée, la lèvre avant est forgée à partir d'une canette extrudée.

La dernière étape de l'expansion consiste à créer la lèvre arrière et le contour de la jante. Lors du forgeage de la lèvre avant, le métal peut s'écouler simultanément vers l'intérieur et vers l'extérieur ce qui peut entraîner la déformation de la billette avec une puissance de forgeage modérée et laisser suffisamment d'espace dans la cavité de la matrice. En outre, le degré de réduction de la section du disque de la jante est accru. La déformation importante permet d'obtenir une grande résistance dans la section du disque de la roue [58].

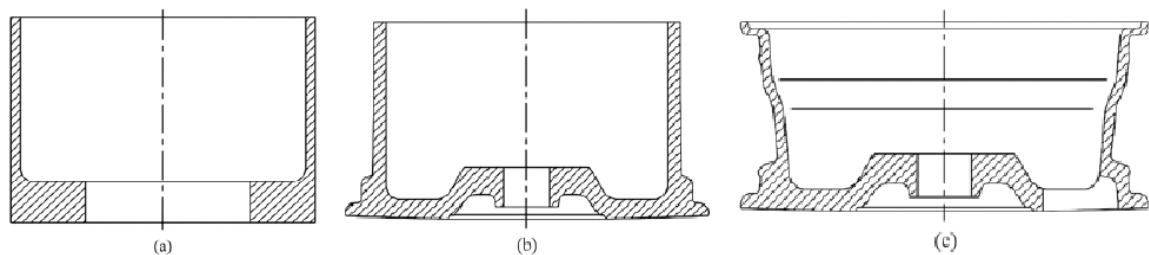


Figure III.6. Schéma du processus d'extrusion [58].

- Meilleures performances et maniabilité grâce au processus de forgeage ;
- Le processus de fabrication exclut l'apparition de cavités, de porosités et de rétrécissements ;
- Les roues sont mécaniquement plus résistantes grâce à la structure serrée du grain. Elles offrent également une meilleure résistance à l'usure.

II.7.3.3. Usinage

L'usinage est le processus de mise en forme et de finition d'un matériau à l'aide de divers outils de coupe. Dans le cas des jantes en alliage, il s'agit d'enlever l'excédent de matière de moulage pour obtenir une surface lisse et des dimensions précises. Cette opération peut être réalisée à l'aide de machines à commande numérique telles que les tours ou les fraiseuses [56].

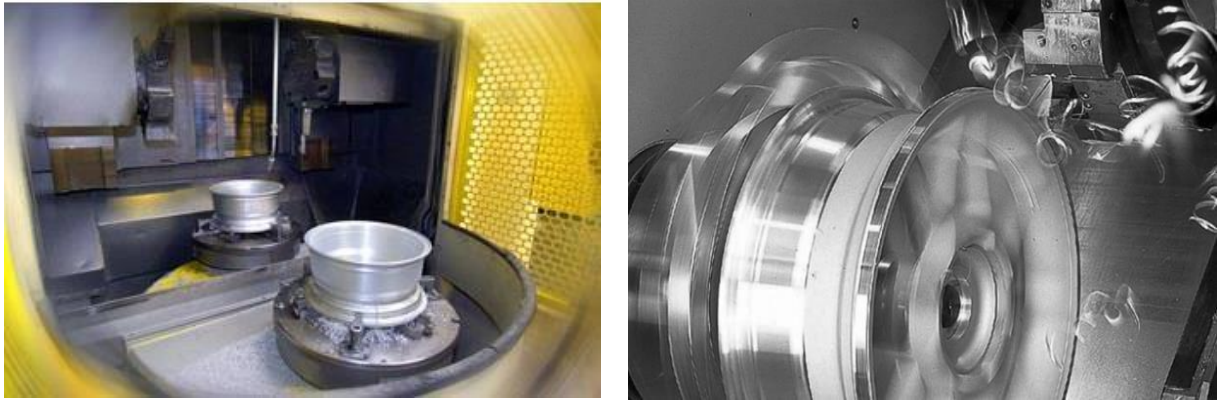


Figure III.7. Opérations d'usinage des jantes en alliage [56].

II.7.3.4. Finition

Le processus de finition consiste à donner à la jante son aspect final. Il peut s'agir de :

1. **L'ébavurage** : Les arêtes vives ou les bavures sont éliminées de la jante, parfois à l'aide d'un diamantage.
2. **Grenaillage** : La surface de la jante est bien polie à l'aide d'une grailleuse afin de la préparer à la peinture.
3. **Peinture** : La roue est peinte et protégée pour améliorer son aspect et sa durabilité.
4. **Surfaçage** : Selon le design de la jante, il est parfois nécessaire après peinture de fraiser au machines CNC les facettes de la jante pour lui donner un aspect esthétique meilleur.



Figure III.23. Ebavurage et finition de la jante [55].

II.7.3.5. Contrôle de qualité

Le processus de contrôle de la qualité des jantes comporte généralement une série d'étapes visant à garantir que les jantes répondent à certaines normes de sécurité, de performance et d'apparence. Il peut s'agir d'inspections visuelles pour vérifier l'absence de défauts ou de

dommages, ainsi que de mesures plus détaillées des dimensions et des tolérances à l'aide de machines CMM (Coordinate Measuring Machine). En outre, divers tests peuvent être effectués pour évaluer la résistance et la durabilité des jantes dans différentes conditions comme les tests d'impact ou de fatigue. Tout problème ou défaut identifié lors de ces inspections ou de ces tests peut ensuite faire l'objet de mesures correctives, telles que le retraitement ou le remplacement des jantes concernées. Globalement, l'objectif du contrôle de la qualité dans la production de jantes est de garantir que chaque jante répond aux spécifications requises et fonctionne de manière fiable pendant toute la durée de vie prévue [56].



Figure III.24. Contrôle de la qualité des jantes en alliage [55].

II.7.4. Conclusion

Les procédures de fabrication des jantes métalliques ont été décrites dans ce chapitre en mettant l'accent sur les jantes en métal et les jantes en alliage. La production de jantes en acier et la fabrication de jantes en alliage sont les deux principales divisions des processus de fabrication des jantes métalliques. Plusieurs procédés de fabrication des jantes en acier ont été abordés, notamment le découpage des tôles d'acier, le laminage pour la mise en forme de la jante, le soudage par étincelage, le tronçonnage, le rabotage, la coupe en bout, le laminage pour la mise en forme des rouleaux et des bords, le contrôle des fuites de gaz, le poinçonnage des trous de valve, la production de disques, l'application du lubrifiant pour l'estampage, l'estampage, le perçage et l'achèvement des jantes en acier par enfoncement du disque dans la jante et soudage Mig-Mag de l'ensemble. Le moulage ou le forgeage sont deux principaux procédés de fabrication des jantes en alliage. Le forgeage implique le processus d'extrusion de la jante tandis que le moulage couvre le moulage sous pression (LPDC). La production de jantes en alliage a été abordée, ainsi que les techniques d'usinage et de finition. Le chapitre s'est conclu

en soulignant l'importance du contrôle de la qualité pour garantir que le produit fini satisfait aux exigences requises.

Dans l'ensemble, il est essentiel de comprendre ces procédures de production afin de produire des jantes de haute qualité qui respectent les critères et les exigences nécessaires de sécurité.

CHAPITRE III.
DIMENSIONNEMENT DU
SYSTEME DE COULEE

III.1. Conception de la roue de moto.

Le design des éléments de la roue a été élaboré en utilisant solidworks



Figure III.1. la roue de moto

III.2. Conception 3D de la jante.

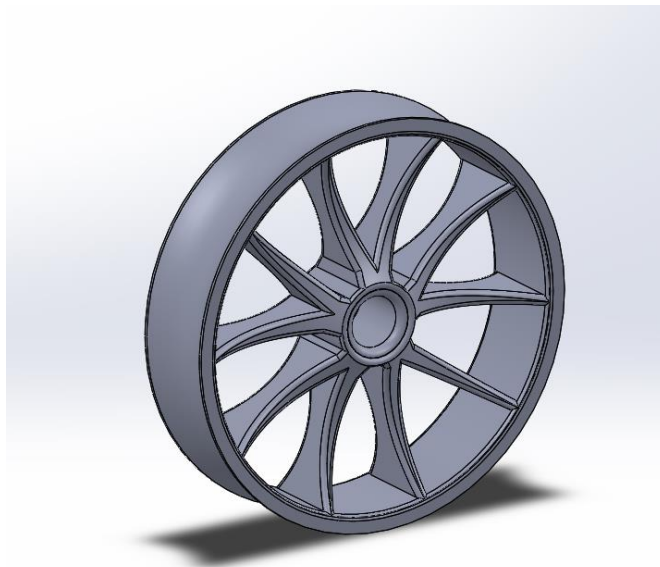


Figure III.2. la jante de moto

III.3.Dessin de définition de la jante

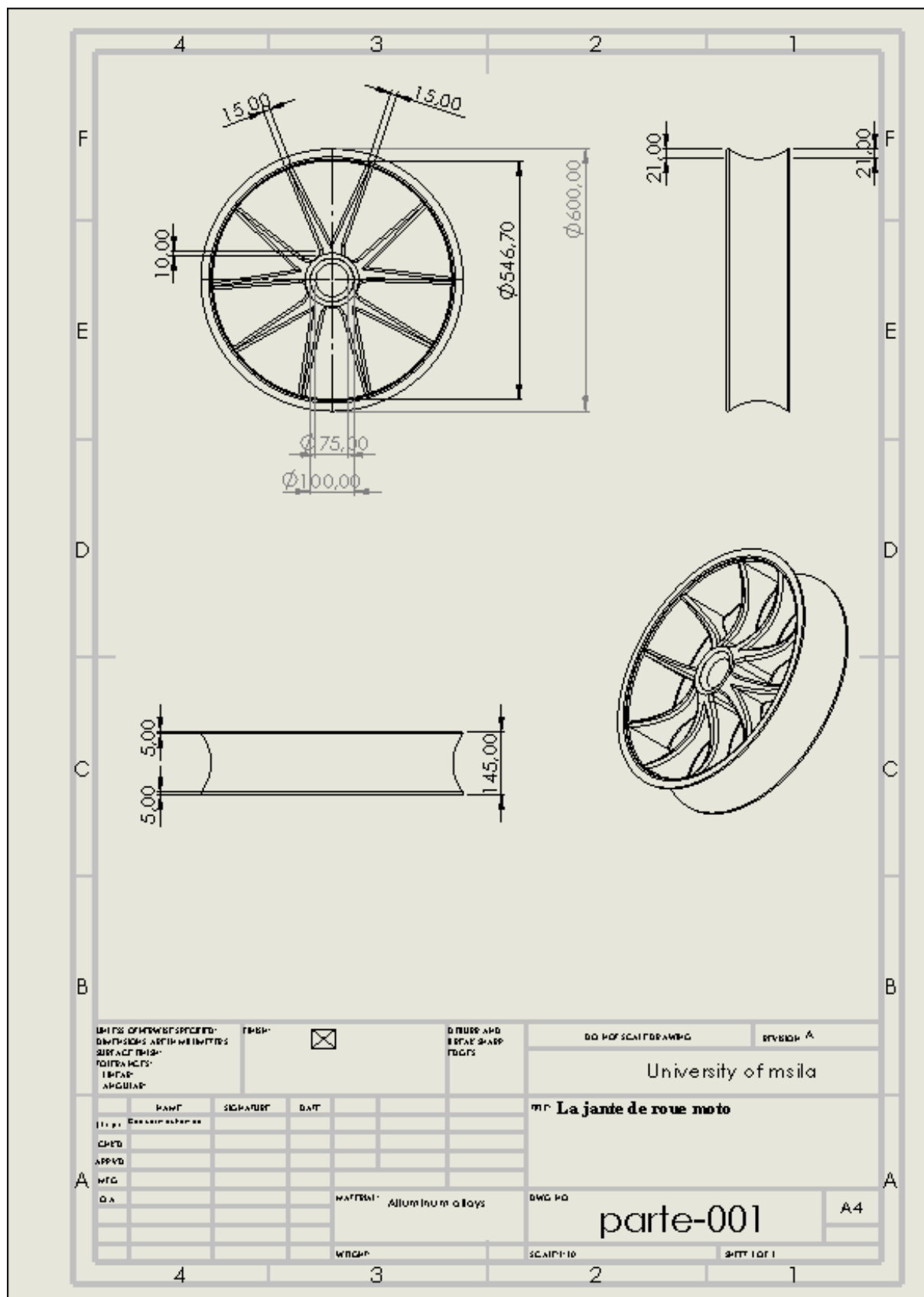


Figure III.3.Dessin de définition de la jante

III.4. Conception du modèle et du système de coulée sous SolidWorks

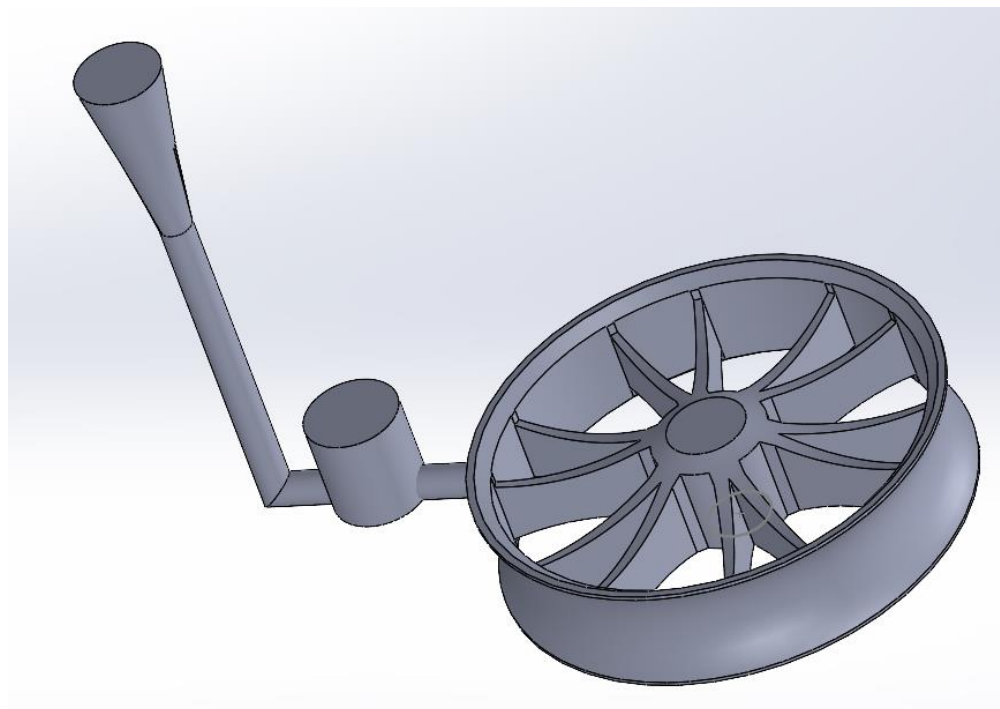
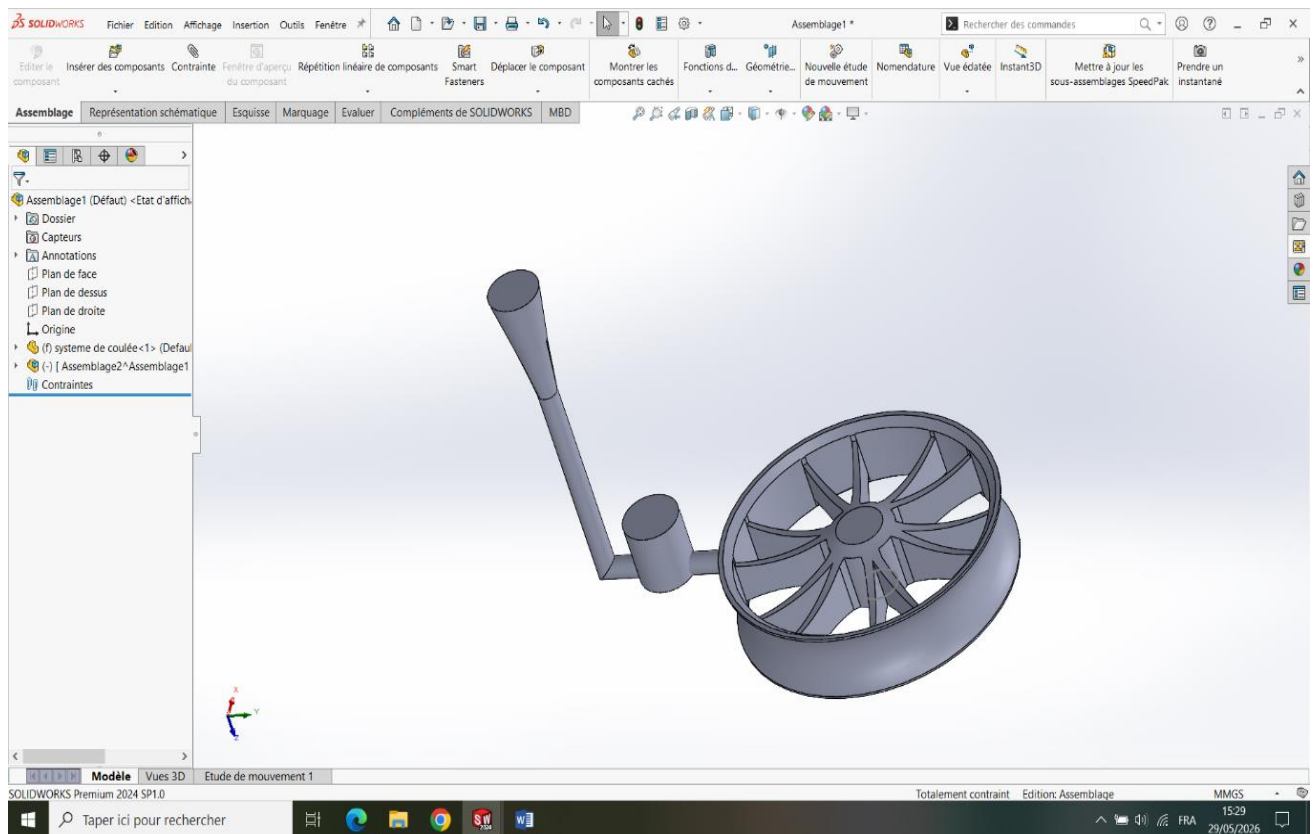


Figure III.4. Conception du modèle et du système de coulée sous SolidWorks

III.5.Création du moule 3D dans Solidworks

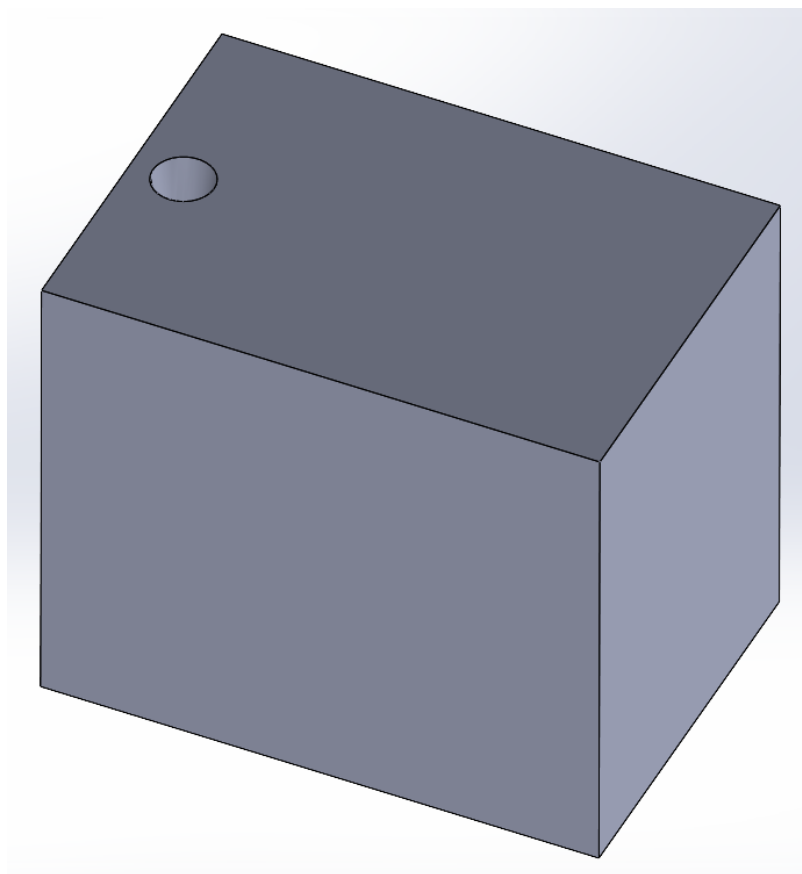
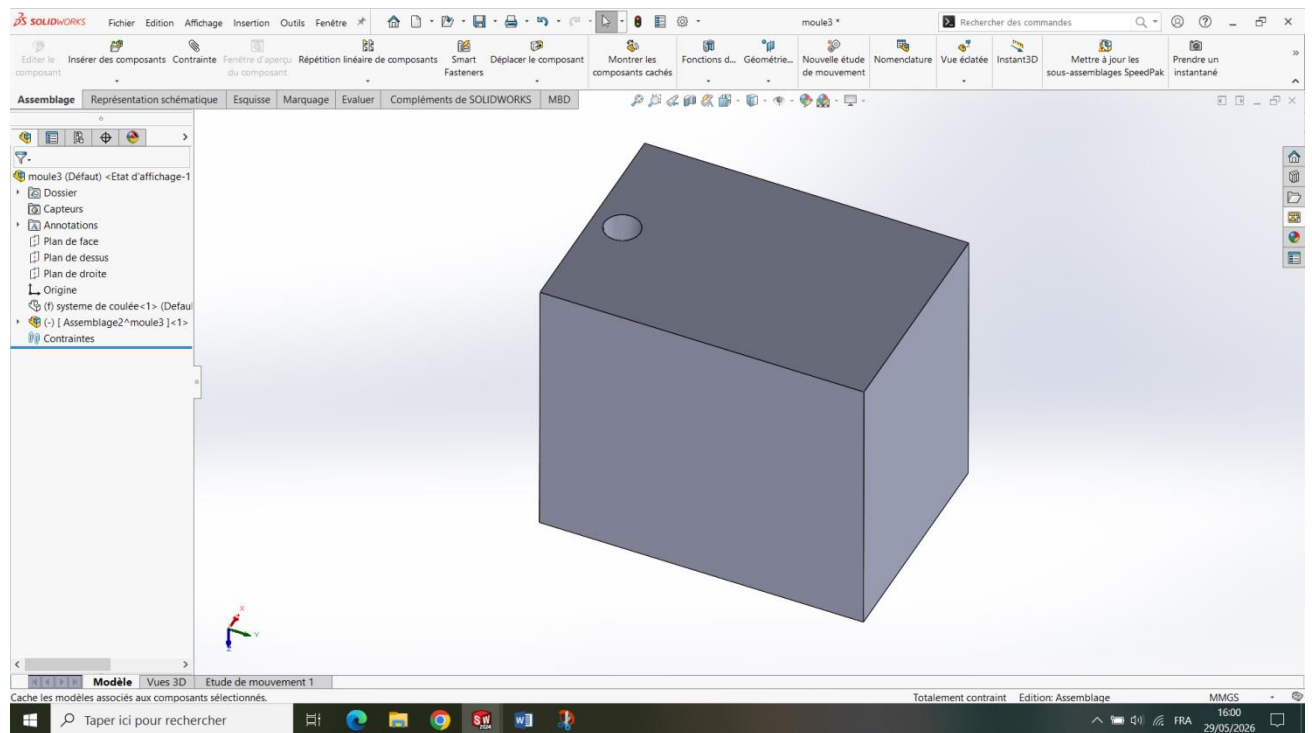


Figure III.5. Création du moule 3D dans Solidworks

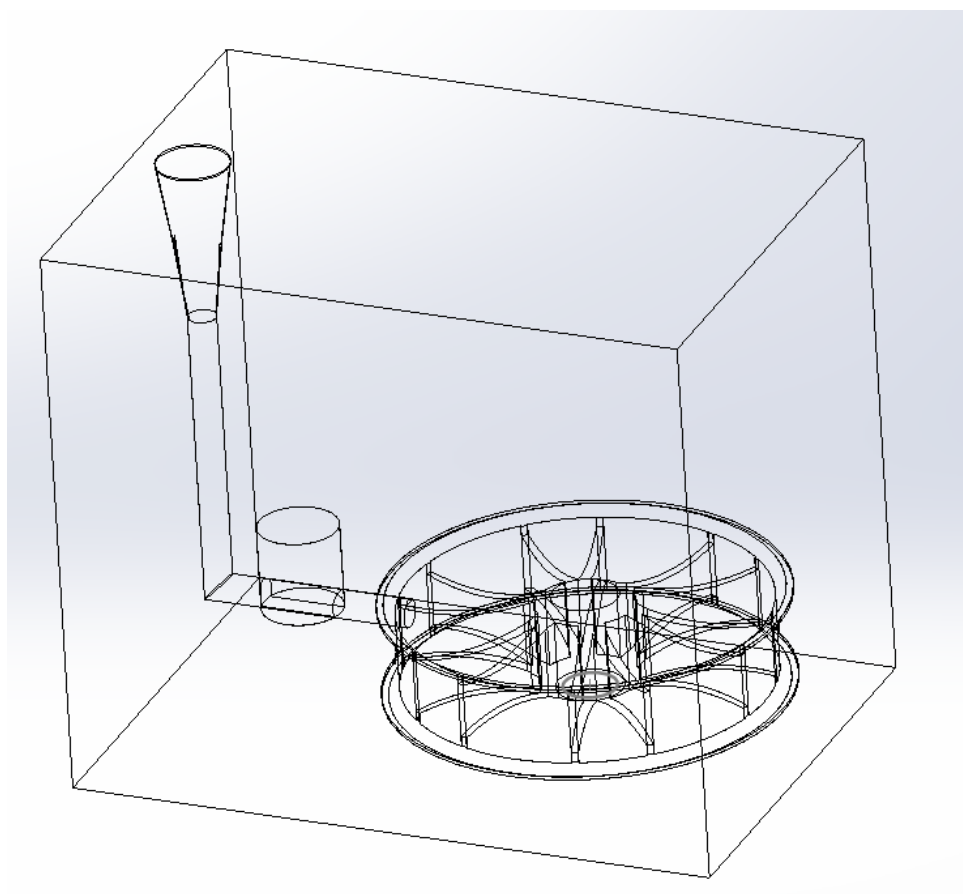
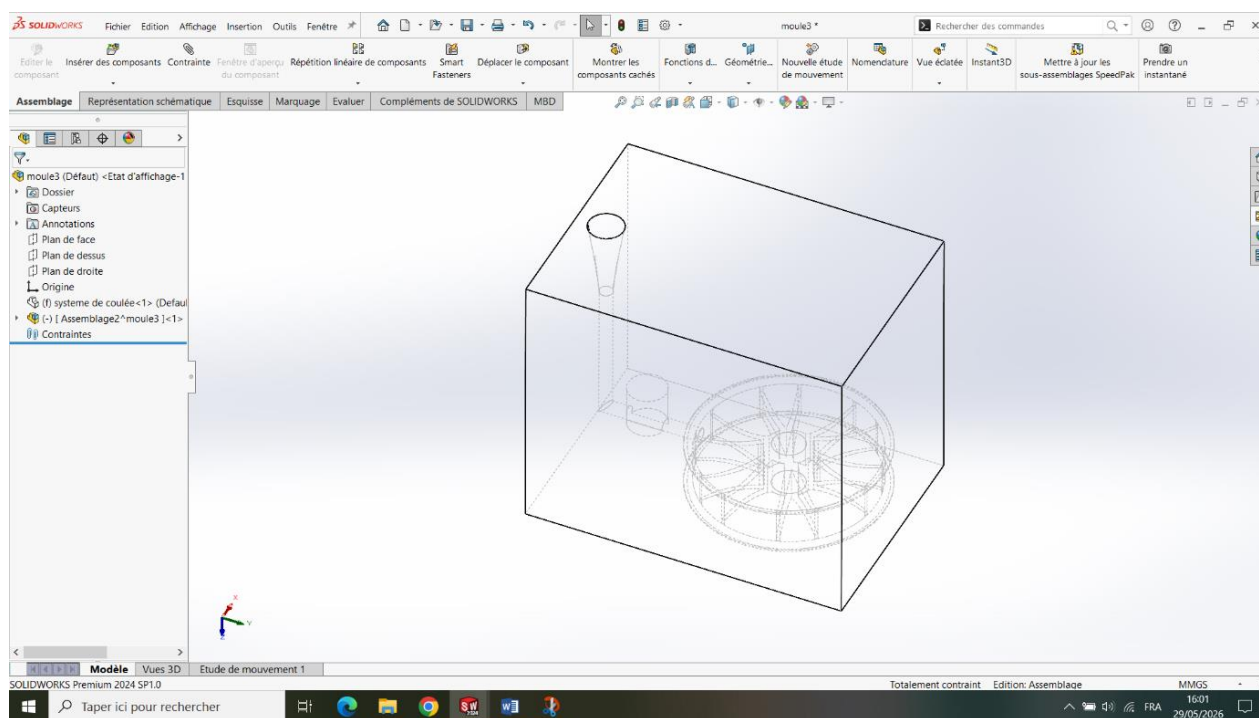


Figure III.6. Visualisation de l'intérieur du moule

III.7. Détermination du modèle de moulage

Le volume total de matiere fondue est determiné selon la formule suivante.

$$V_{modele} = V_{desire} + V_{retrait} + V_{surpépaisseur} + V_{depouille}$$

Ou,

Vmodele : volume du modèle

Vdesign. Volume de la piece a mouler selon le dessin

Vretrait : volume de metal a ajouter pour compenser le retrait

Vsurpépaisseur. Volume de metal a ajouter pour compenser la matiere enlevée par usinage

Vdepouille : volume de metal a ajouter pour compenser les conicites

L'empreinte désignée

$$V_{design} = V_{jante} + V_{noyau} + V_{branches}$$

Ou,

Vdesign. volume de la piece a mouler selon le dessin

Vjante. Volume de la jante

Vnoyau : volume de la noyau

Vbranches : volume de la branches

Calcul du volume de la jante

$$V_{jante} = A.e$$

Ou,

Vjante. Volume de la jante

$$A : \text{aire } A = \pi. (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$$

e.epaisseur

$$A=48002,8 \text{ mm}^2$$

$$e=145 \text{ mm}$$

$$V_{jante} = 48002,8 \times 145$$

$$V_{jante} = 6,96 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Calcul du volume de noyau :

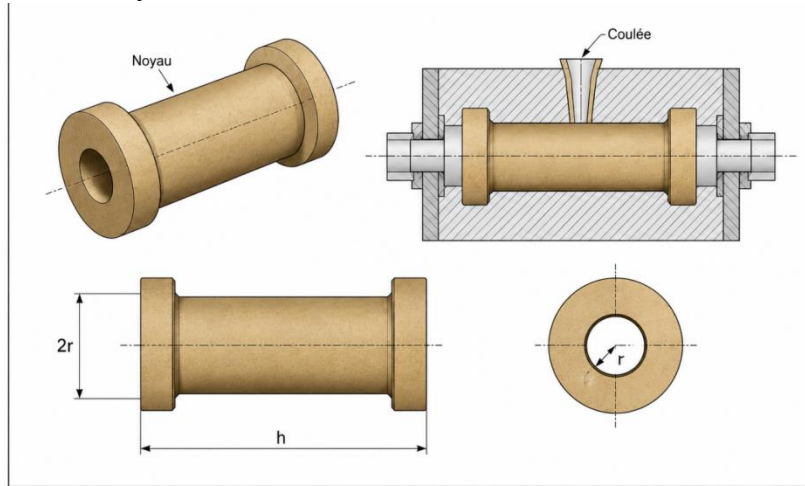


Figure III 7. Noyau de la jante de moto

$$V_{noyau} = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$h = 145 \text{ mm}$$

$$V_{noyau} = \pi \times 50^2 \times 145$$

$$V_{noyau} = 1,13 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Calcul du volume des rayons.

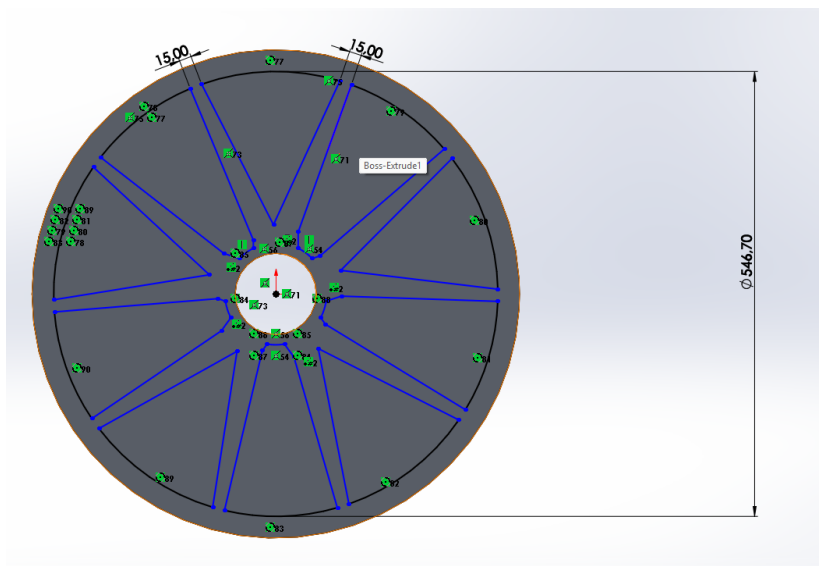


Figure III 8. Volume des rayons

$$V_{rayons} = A. e$$

$$A = l.L$$

$$L: \text{longueur} = 273.35 - 50 = 223.35 \text{ mm}$$

$$l: \text{largeur} = 15 \text{ mm}$$

$$A_{rayons} = 3350.25 \text{ mm}^2$$

$$\text{Nombre de rayons est } 10 \text{ d'où } A_T = 33502,5 \text{ mm}^2$$

$$V_{rayons} = 33502,5 \times 145 = 4857862,5 \text{ mm}^2$$

Calcul de l'empreinte du moule

$$V_{désigne} = 6,96 \times 10^6 + 1,13 \times 10^6 + 4857862,5$$

$$V_{désire} = 1,2 \times 10^7 \text{ mm}^2$$

Calcul du Retrait

Selon les tableaux le Retrait est de 1,3% à ajouter

$$V_{retrait} = 1,2 \times 10^7 \times 0,013$$

$$v_{retrait} = 1,64 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

Calcul de surépaisseur

Il faut ajouter un volume de 7% pour couvrir la Surépaisseur d'usinage

$$V_{surépaisseur} = 1,2 \times 10^7 \times 0,07$$

$$V_{surépaisseur} = 8,87 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

Calcule le la dépouille

les formes cylindriques seront enveloppées dans des cones donc il faut ajouter du metal dans l'ordre de 1% Selon les tableaux de la dépouille

$$V_{dépouille} = 1,2 \times 10^7 \times 0,01$$

$$V_{dépouille} = 126778,625 \text{ mm}^2$$

Calcul du modèle.

$$V_{modele} = 1,2 \times 10^7 + 1,64 \times 10^5 + 8,87 \times 10^5 + 126778,625$$

$$V_{modele} \approx 1,31 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

Les dimensions de La jante.

$$D_{ext} = 600 \text{ mm}$$

$$D_{int} = 546,7 \text{ mm}$$

$$S=145 \text{ mm}$$

S.largeur

D_{ext} : *diametre extérieur*

D_{int} : *diametre intérieur*

Calcul des dimensions du modèle.

Retrait 0.013

$$D_{ext\ modele} = D_{ext\ piece} \times (1 + r)$$

$$D_{ext\ modele} = 600 \times (1 + 0,013) = 607,8 \text{ mm}$$

$$D_{int\ modele} = 546,7 \times 1,013 = 553,8 \text{ mm}$$

$$S_{modele} = 145 \times 1,013 = 146,88 \text{ mm}$$

Surépaisseur :

$$D_{ext\ modele} = 607,8 + (2 + 3) = 613,8 \text{ mm}$$

$$D_{int\ modele} = 553,8 - 5 = 548,8 \text{ mm}$$

$$S_{modele} = 146,88 + 5 = 151,88 \text{ mm}$$

Dépouille 5%

$$D_{ext\ modele} = 600 \times 0,05 = 30 \text{ mm}$$

$$D_{int\ modele} = 546,7 \times 0,05 = 27,335 \text{ mm}$$

$$S_{modele} = 145 \times 0,05 = 7,25 \text{ mm}$$

Totale.

$$D_{ext\ totale\ modele} = 613,8 + 30 = 643,8 \text{ mm}$$

$$D_{int\ totale\ modele} = 547,8 + 27.335 = 575,135 \text{ mm}$$

$$S_{totale\ modele} = 152,88 + 7.25 = 160,13 \text{ mm}$$

Calcule les dimensions du noyau.

Retrait.

$$D_{ext\ modele} = 100 \times 1,013 = 101,3 \text{ mm}$$

$$D_{int\ modele} = 75 \times 1,013 = 75,975 \text{ mm}$$

$$e_{modele} = 145 \times 1,013 = 146,88 \text{ mm}$$

Surépaisseur

$$D_{ext} = 101,3 + 5 = 106,3 \text{ mm}$$

$$D_{int} = 75,975 + 5 = 80,975 \text{ mm}$$

$$e = 146,88 + 5 = 151,88 \text{ mm}$$

Dépouille 1.5%

$$D_{ext\ modele} = 100 \times 0,015 = 1,5 \text{ mm}$$

$$D_{int\ modele} = 75 \times 0,015 = 1,125 \text{ mm}$$

$$e_{modele} = 145 \times 0,015 = 2,175 \text{ mm}$$

Totale.

$$D_{ext\ totale\ modele} = 106,3 + 1,5 = 107,8 \text{ mm}$$

$$D_{int\ totale\ modele} = 80,975 + 1,25 = 82,225 \text{ mm}$$

$$S_{totale\ modele} = 151,88 + 2,175 = 154,055 \text{ mm}$$

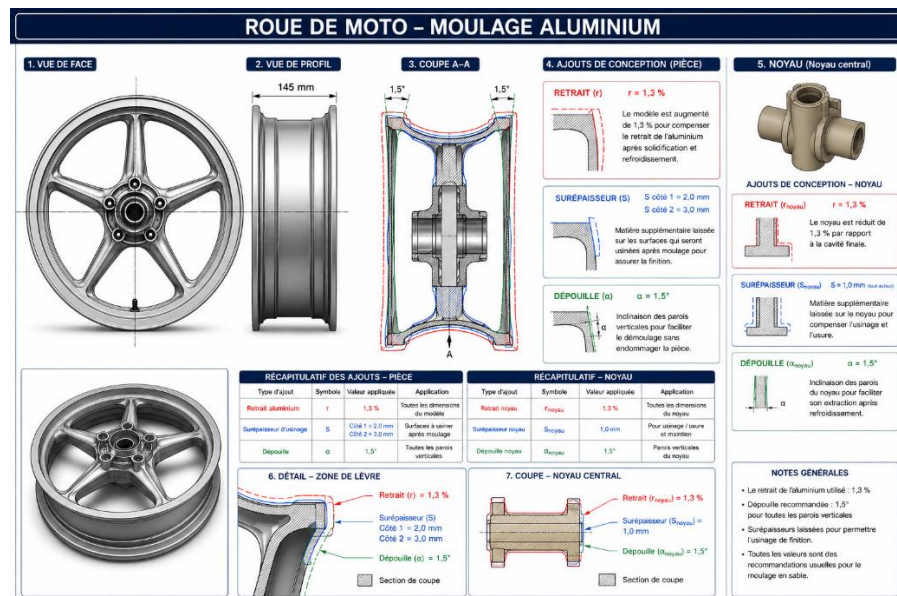


Figure III.9.roue de moto moulage aluminium

Section du système de coulée.

Section théorique S'd en côté ou en bas:

$$S'd = \frac{V}{0.4 \times t \sqrt{g} \times (h_1 + h_2)}$$

$$V_{modele} = 0,014 \text{ m}^3$$

V_{modele} : volume de modele

$$h_1 = 0,20 \text{ m}$$

$$h_2 = 0,10 \text{ m}$$

h :hauteur de la descente de coulée

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

g: Accélération gravitationnelle

$$t = k \times \sqrt{G}$$

t : temps de remplissage

$$G = \rho \times V_{modele}$$

G : masse du métal liquide

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$$

ρ : masse volumique de l'aluminium

calcul de la masse de métal liquide :

$$G = 2700 \times 0,0197 = 53,19 \text{ kg}$$

Calcul du temps de remplissage

$$t = 1,4 \times \sqrt{53,19} = 10,21 \text{ s}$$

Calcul de la Section du système de coulée.

$$S'd = \frac{0.014}{0,4 \times 10,21 \sqrt{9,81 \times (0,20 + 0,10)}}$$

$$S'd = 0.002 \text{ m}^2 = 20 \text{ cm}^2$$

$$S'd \approx 20 \text{ cm}^2$$

$$a = \sqrt{3 S_d} = 7.745 \text{ cm}$$

$$b = \frac{4 \times a}{3} = 3.21 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} S &= 2S_d \sqrt{h_1} & a &= \sqrt{3S_d} \\ h_0 &= x = \sqrt{S} & Y &= \sqrt{2x} \\ h &= \sqrt{\frac{S_d}{3}} & r &= \frac{b}{2} \\ S_0 &= S_d \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} & S_a &= 2 \text{ à } 4 S_d \\ R &= \frac{x}{4} = a \end{aligned}$$

Le choix du système de moulage Selon la pression.

On choisi le moulage en situation en dessous (Bottom) : Le système de coulée est situé légèrement au-dessus de la cavité à remplir

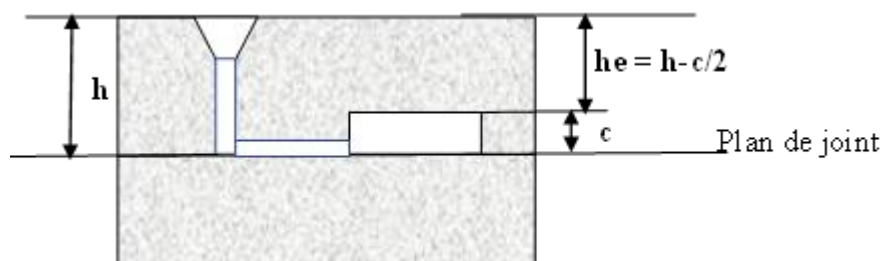


Figure III 10. Système de moulage en pression

Le Calcul de la hauteur du chenal

$$h_e = h - \frac{p^2}{2c}$$

$$h_e = 300 - \frac{76,44^2}{2 \times 152,88}$$

$$h_e = 280,89 \text{ mm}$$

Calcul de la vitesse d'écoulement.

La vitesse du métal liquide est donnée par la relation :

$$v = \sqrt{2gh}$$

$$g=9,81 \text{ m/s}^2$$

$$h=280,89 \text{ mm}=0,28089 \text{ m}$$

$$v = \sqrt{2 \times 9,81 \times 0,28089}$$

$$v = 2,35 \text{ m/s}$$

Calcul du débit volumique:

Le débit volumique est calculé par $Q = \frac{V}{t}$

Avec :

$$V = 1,77 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$t=9,33 \text{ s}$$

$$\text{Alors } Q = \frac{1,77 \times 10^7}{9,33}$$

$$Q = 1,897 \times 10^6 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Calcul de la section de la descente.

La section de la descente est obtenue par $S = \frac{Q}{v}$

Avec.

$$Q=1,897 \times 10^6 \text{ mm}^3/\text{s}$$

$$v=2350 \text{ mm/s}$$

$$\text{donc } S_s = \frac{1,897 \times 10^6}{2350}$$

$$S_s = 807 \text{ mm}^2$$

Calcul du diamètre de la descente

La descente étant circulaire $S = \frac{\pi d^2}{4}$

$$d_s = \sqrt{\frac{4 \times 807}{3,14}}$$

$$d_s = 32 \text{ mm}$$

Calcul de la section du runner

Selon le rapport 1.2 :4 :

$$S_r = 2 \times S_s$$

$$S_s = 2 \times 807$$

$$S_s = 1614 \text{ mm}^2$$

Calcul du diamètre du runner

Le runner étant circulaire

$$d_r = \sqrt{\frac{4 \times 1614}{3,14}}$$

$$d_r = 45 \text{ mm}$$

Calcul de la section totale des attaques

D'après le rapport choisi :

$$S_a = 4 \times S_s$$

$$S_a = 4 \times 807$$

$$S_a = 3228 \text{ mm}^2$$

Calcul de la section des attaques

Pour deux attaques :

$$S_{attaque} = \frac{3228}{2}$$

$$S_{attaque} = 1614 \text{ mm}^2$$

Calcul du diamètre des attaques.

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$$

$$d=45,3 \text{ mm}$$

Calcul de la Masselotte (Riser).

Le dimensionnement de la masselotte est nécessaire afin d'assurer une alimentation correcte de la pièce pendant la solidification et d'éviter les défauts de retassure.

Le module de la pièce est donné par la relation :

$$M = \frac{V}{S}$$

Avec.

$$V_{pièce} = 1,805 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$S_{pièce} = 4,2 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

Alors.

$$M_{pièce} = \frac{1,805 \times 10^7}{4,2 \times 10^5}$$

$$M_{pièce} = 42,97 \text{ mm}$$

Pour assurer une bonne alimentation, le module de la masselotte doit vérifier :

$$M_{masselotte} \geq 1,2 \times M_{pièce}$$

Donc.

$$M_{masselotte} \geq 1,2 \times 42,97$$

$$M_{masselotte} \geq 51,56 \text{ mm}$$

La masselotte étant cylindrique avec : $H=D$

Son module est : $M = \frac{D}{5}$

Ainsi :

$$D=5 \times 51,56$$

$$D=258 \text{ mm}$$

Par sécurité, on adopte :

- Diamètre de la masselotte :

$$D_m=260 \text{ mm}$$

- Hauteur de la masselotte :

$$H_m=260 \text{ mm}$$

Détermination du temps de Solidification

Le temps de solidification est calculé à l'aide de la loi de Chvorinov :

$$t = C \times \left(\frac{V}{S}\right)^2$$

Avec $C=4$

Temps de solidification de la pièce.

$$t_p = 4 \times (42,97)^2$$

$$t_p = 7387 \text{ s}$$

$$t_p = 123 \text{ min}$$

Temps de solidification de la masselotte :

$$t_m = 4 \times (52)^2$$

$$t_m = 10816 \text{ s}$$

$$t_m = 180 \text{ min}$$

On obtient : $t_m > t_p$

Donc la masselotte se solidifie après la pièce, ce qui garantit une bonne alimentation du métal liquide pendant la solidification.

Le rendement de coulée

Le rendement de coulée représente le rapport entre le volume utile de la pièce et le volume total du métal coulé.

Le rendement est donné par :

$$\eta = \frac{V_{piece}}{V_{total}} \times 100$$

η : rendement

Avec :

Volume de la pièce :

$$V_{piece} = 1,805 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

Volume du système de coulée :

$$V_s = 3,2 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Volume de la masselotte :

$$V_m = 1,38 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

Le volume total est :

$$V_{total} = 1,805 \times 10^7 + 3,2 \times 10^6 + 1,38 \times 10^7$$

$$V_{total} = 3,505 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

Ainsi :

$$\eta = \frac{1,805 \times 10^7}{3,505 \times 10^7} \times 100$$

$$\eta = 51,5 \%$$

Le rendement obtenu est acceptable pour un moulage en sable d'un alliage d'aluminium.

Vérification du Régime d'Écoulement

Le nombre de Reynolds permet de déterminer le type d'écoulement du métal liquide.

La relation utilisée est :

$$R_e = \frac{\rho v d}{\mu}$$

R_e : nommbre de reynolds

μ : viscosité dynamique

Avec.

$\rho=2700 \text{ kg/m}^3$

$v=2,35 \text{ m/s}$

$d=0,032 \text{ m}$

$\mu=0,0013 \text{ Pa.s}$

Le calcul donne :

$$R_e = \frac{2700 \times 2,35 \times 0,032}{0,0013}$$

$$R_e = 156184$$

Comme $R_e > 4000$ L'écoulement est donc turbulent.

Pour cette raison, le choix d'un système de coulée non pressurisé de rapport **1:2:4** est particulièrement adapté au moulage de l'alliage A356 afin de réduire les turbulences et limiter les défauts de coulée

CONCLUSION GENERALE

Le présent mémoire de Master s'inscrit dans le cadre d'une contribution scientifique et technique à l'étude, à la conception et au dimensionnement d'un système de coulée destiné au moulage en sable d'une jante de roue de moto en alliage d'aluminium A356. L'objectif principal de ce travail consistait à développer une méthodologie rigoureuse permettant de concevoir l'ensemble des éléments constitutifs du système de fonderie, notamment le modèle, l'empreinte, le noyau, le système d'alimentation et les masselottes, tout en respectant les contraintes technologiques, métallurgiques et industrielles propres au procédé de moulage en sable. Pour atteindre cet objectif, le mémoire a été structuré autour de deux volets complémentaires : une étude bibliographique approfondie consacrée aux procédés de fonderie et une étude pratique portant sur les calculs de dimensionnement et l'analyse des paramètres de coulée.

Dans un premier temps, une analyse théorique détaillée des procédés de fabrication en fonderie a été menée afin de mieux comprendre les principes fondamentaux régissant la conception des systèmes de coulée. Cette étude a permis de comparer plusieurs procédés industriels. Chaque procédé a été étudié selon ses avantages, ses limites, ses domaines d'application et son coût de production. Cette analyse comparative a confirmé que le moulage en sable demeure l'un des procédés les plus adaptés à la fabrication de pièces de géométrie complexe et de dimensions importantes, notamment grâce à sa flexibilité de conception et à son coût relativement réduit pour les petites et moyennes séries de production. Une attention particulière a également été accordée aux matériaux utilisés en fonderie, en particulier aux sables de moulage, dont les propriétés granulométriques, réfractaires et mécaniques jouent un rôle essentiel dans la qualité finale des pièces obtenues. L'étude des liants, des adjuvants et de la perméabilité des sables a permis de mettre en évidence leur influence directe sur la résistance du moule, l'évacuation des gaz et la prévention des défauts métallurgiques.

Dans la seconde partie de ce travail, l'ensemble des calculs de conception et de dimensionnement du système de coulée a été réalisé de manière progressive et méthodique. Le modèle de la jante a été conçu. Les dimensions finales obtenues sont en conformité géométrique avec la pièce conçue. Les différentes sections de la descente de coulée, du runner et des attaques ont été déterminées à partir des équations hydrodynamiques de la fonderie, en vue d'obtenir une vitesse d'écoulement adéquate assurant un remplissage homogène et stable de l'empreinte. Le système d'alimentation a été dimensionné selon une configuration non pressurisée de rapport 1:2:4, configuration particulièrement recommandée pour les alliages d'aluminium afin de limiter les phénomènes de turbulence, d'oxydation et d'aspiration d'air

lors du remplissage du moule. L'analyse du nombre de Reynolds a confirmé le caractère turbulent de l'écoulement, ce qui a validé le choix du système non pressurisé adopté dans cette étude. Le module de refroidissement de la pièce et celui des masselottes ont été déterminés avec précision, garantissant une alimentation continue de la pièce jusqu'à la fin de sa solidification.

La complexité géométrique et aux exigences fonctionnelles élevées de la jante de moto, cette étude constitue un excellent cas d'application des principes fondamentaux de la fonderie industrielle. Les calculs réalisés ont confirmé la faisabilité technique du système de coulée proposé et ont démontré l'importance d'une approche globale intégrant simultanément les phénomènes thermiques, hydrodynamiques et métallurgiques intervenant lors du moulage. Les résultats obtenus ont montré que le système conçu permet d'assurer une bonne qualité métallurgique de la pièce tout en maintenant un rendement de coulée satisfaisant pour un procédé de moulage en sable d'alliage d'aluminium.

Bien que les résultats obtenus soient particulièrement satisfaisants, plusieurs perspectives d'amélioration peuvent être envisagées afin de compléter et d'enrichir ce travail. L'utilisation de logiciels de simulation numérique tels que ProCAST, MAGMASoft ou FLOW-3D permettrait de visualiser le comportement du métal liquide lors du remplissage et de la solidification, d'identifier les zones sensibles aux défauts et d'optimiser davantage la conception du système de coulée. De même, la réalisation pratique d'un moule expérimental suivie d'essais de coulée réels constituerait une étape importante de validation industrielle des calculs théoriques réalisés.

Nous espérons que les résultats et les recommandations présentés dans ce mémoire pourront contribuer au développement et à l'amélioration des pratiques de fonderie dans le contexte industriel algérien et servir de référence pour des travaux futurs portant sur l'optimisation des systèmes de coulée et la fabrication de composants mécaniques de haute performance.

*« La science de la fonderie est l'art de transformer le liquide en solide,
avec précision, avec passion, et avec l'exigence de la perfection. »*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] B. Ravi, “Metal Casting 4.0: Closing the Loop Between Design and Manufacturing,” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 74, pp. 1017–1028, 2021.
- [2] D. Lehmhus, “Advances in Metal Casting Technology: A Review of State of the Art, Challenges and Trends—Part I: Changing Markets, Changing Products,” *Metals*, vol. 12, no. 11, p. 1959, 2022.
- [3] S. Singh and R. Kumar, “Recent Trends in Sand Casting Process and Its Applications,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 2040–2046, 2021.
- [4] D. Lehmhus, “Advances in Metal Casting Technology: A Review of State of the Art, Challenges and Trends—Part II: Technologies New and Revived,” *Metals*, vol. 14, no. 3, p. 334, 2024.
- [5] A. K. Bopche and S. Kumar, “Recent Developments in Shell Mold Casting Process: A Review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 1450–1456, 2022.
- [6] A. R. A. Shah, M. Gupta, and S. K. Panigrahi, “Recent Advances in High Pressure Die Casting Process: A Review,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 68, pp. 1117–1138, 2021.
- [7] R. S. Uwanyuze, M. W. Nyembwe, and J. H. Potgieter, “A Review on Alpha Case Formation and Modeling of Mass Transfer During Investment Casting of Titanium Alloys,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 865, 2021.
- [8] S. Kumar and P. Sharma, “Recent Advances and Challenges in Investment Casting Process: A Review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 8785–8792, 2021.
- [9] A. D. Pradeep and T. Rameshkumar, “Review on Centrifugal Casting of Functionally Graded Materials,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 729–734, 2021.
- [10] A. K. Bopche and S. Kumar, “Recent Developments in Permanent Mold Casting Process: A Review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 2210–2217, 2022.
- [11] D. Cemernek, M. Fujda, and M. Rosipal, “Machine Learning in Continuous Casting of Steel: A State-of-the-Art Survey,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 33, pp. 1561–1579, 2022.
- [12] M. S. Kumar and R. Prasad, “Recent Developments in Foundry Sand and Its Industrial Applications: A Review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 3954–3960, 2021.
- [13] A. S. Yaro, M. A. Salih, and H. A. Mohammed, “Effect of Bentonite and Silica Additives on the Properties of Foundry Sand Molds,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 1967–1973, 2021.

- [14] P. Kumar and V. Singh, “Advances in Core Sand Technology and Binder Systems for Modern Foundry Applications,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 5612–5619, 2021.
- [15] R. Sharma and S. Patel, “Influence of Sand Grain Size and AFS Fineness Number on the Properties of Foundry Molds,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 4375–4381, 2021.
- [16] D. Lehmhus, “Advances in Metal Casting Technology: A Review of State of the Art, Challenges and Trends—Part I: Changing Markets, Changing Products,” *Metals*, vol. 12, no. 11, p. 1959, 2022.
- [17] J. Campbell, “Solidification and Shrinkage Defects in Metal Casting Processes: Recent Developments and Control Methods,” *Materials Science Forum*, vol. 1016, pp. 45–56, 2021.
- [18] S. Kumar and A. Singh, “Design Considerations in Sand Casting Patterns and Core Boxes: A Review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 2285–2291, 2021.
- [19] M. Gupta and R. Singh, “Dimensional Accuracy and Machining Allowances in Modern Metal Casting Processes,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 5120–5127, 2021.
- [20] R. Sharma and V. Patel, “Design Optimization of Ribs and Thin Sections in Sand Casting Components,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 3210–3217, 2021.
- [21] S. Kumar and R. Verma, “Design Optimization of Bosses and Junctions in Metal Casting Components,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 4125–4132, 2021.
- [22] M. A. Islam and S. Roy, “Optimization of Gating System and Pouring Parameters in Sand Casting Process: A Review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 4512–4519, 2021.
- [23] J. Campbell, “Feeding and Riser Design in Metal Casting: Recent Approaches for Shrinkage Control,” *Materials Science Forum*, vol. 1016, pp. 87–98, 2021.
- [24] Y. Wang, H. Zhang, and L. Chen, “Lightweight Design and Manufacturing Technologies for Automotive Wheels: A Review,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 68, pp. 1452–1468, 2021.
- [25] Y. Wang, H. Zhang, and L. Chen, “Lightweight Design and Manufacturing Technologies for Automotive Wheels: A Review,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 68, pp. 1452–1468, 2021.
- [26] H. Liu, Y. Wang, and J. Li, “Gravity Casting Process and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Wheels: A Review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 7851–7858, 2021.
- [27] J. Zhang, H. Liu, and Y. Wang, “Low Pressure Die Casting Technology for Aluminum Alloy Wheels: Recent Developments and Applications,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 69, pp. 512–523, 2021.

- [28] A. R. A. Shah, M. Gupta, and S. K. Panigrahi, "Recent Advances in High Pressure Die Casting Process: A Review," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 68, pp. 1117–1138, 2021.
- [29] H. Zhao, Y. Wang, and L. Chen, "Forged Aluminum Wheels: Manufacturing Technologies, Mechanical Properties and Industrial Applications," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 70, pp. 325–338, 2021.
- [30] Y. Li, H. Zhao, and J. Wang, "Flow Forming Technology for Lightweight Aluminum Alloy Wheels: Process Characteristics and Mechanical Performance," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 72, pp. 415–427, 2021.
- [31] « What's the Difference Between Aluminum and Steel Wheels? - Les Schwab » [En ligne]. Disponible sur : <https://www.lesschwab.com/article/whats-the-difference-between-aluminum-and-steel-wheels.html> (consulté le 17 avril 2023).
- [32] « Aluminum Alloy Wheels -Discounted Wheel Warehouse » [En ligne]. Disponible sur : <https://www.discountedwheelwarehouse.com/aluminum-alloy-wheels-or-aluminum-alloy-rims> (consulté le 27 mai 2023).
- [33] S. K. Nakka, K. N. Babu, N. Ganesh, K. R. Teja, et V. S. C. Murthy, « Structural Analysis of Car alloy wheel using Aluminum and magnesium Alloys », *IJDCST*, vol. 4, p. I-2, SW- 09, 2016.
- [34] « Wheel Basics », ReadyWheels [En ligne]. Disponible sur : <https://www.readywheels.com/wheel-basics> (consulté le 26 juin 2023).
- [35] « La Technologie des Jantes | Dimensions et Détails | Oz Racing - OZ Racing », *O.Z Italian Company* [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ozracing.com/fr/decouvrez-oz/technologie/jante> (consulté le 22 mai 2023).
- [36] « Rim & Tire Size Calculator. Custom Offsets », Wheel-Size.com [En ligne]. Disponible sur : <https://www.wheel-size.com/calc/> (consulté le 22 mai 2023).
- [37] Oponeo, « Les marquages sur les jantes - comment les lire ? » [En ligne]. Disponible sur : <https://www.oponeo.fr/blog/comment-lire-les-marquages-sur-les-jantes-la-dimension-de-jantes-le-profil-de-la-bride-et-de-la-coupe-de-la-jante> (consulté le 22 mai 2023).
- [38] « Jante voiture : modèles et prix - Ooreka », *Ooreka VEHICULE* [En ligne]. Disponible sur : <https://jante.ooreka.fr/comprendre/jante-voiture> (consulté le 22 mai 2023).
- [39] « Made in Italy light weight Alloy Wheels - OZ Racing » [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ozracing.com/> (consulté le 26 mai 2023).
- [40] B. Saïd, « Étude de la coulée d'un alliage d'aluminium. », Thèse de doctorat, 2020 [En ligne]. Disponible sur : <http://archives.univ-biskra.dz:80/handle/123456789/24657> (Consulté le 26 mai 2023).

- [41] « Mineral commodity summaries 2023 », U.S. Geological Survey, Reston, VA, USGS Numbered Series 2023, 2023. [doi: 10.3133/mcs2023](https://doi.org/10.3133/mcs2023).
- [42] « Principaux pays du monde producteurs d'aluminium 2013-2022 », Statista [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.statista.com/statistiques/565203/principaux-pays-producteurs-d-aluminium-dans-le-monde/> (consulté le 26 mai 2023).
- [43] Bengacemi Ilyes El Houari, « Laminage à chaud », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2018 [En ligne]. Disponible sur : https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/10/Bengacemi-Ilyes-El-Houari.pdf?fbclid=IwAR1edk5IKoNbQ7JEU83LuhbPalSKR-UVGFZLd_84h6k3msinrKYvle9BZHw (consulté le 04 juillet 2023).
- [44] « STM STEEL – Vente & transformation des produits ferreux et non ferreux » [En ligne]. Disponible sur : <http://stm-steel.dz/> (consulté le 30 mai 2023).
- [45] « PIM ALGERIE » [En ligne]. Disponible sur : <https://pimalgerie.com/cms/> (consulté le 28 mai 2023).
- [46] R. Panchal, « Top 42+ Best Rim Brands in the World » [En ligne]. Disponible sur : <https://benextbrand.com/top-42-best-rim-brands-in-the-world/> (consulté le 28 mai 2023).
- [47] Tito, « Top 10 Best Rim Brands 2023 », Rx Mechanic [En ligne]. Disponible sur : <https://rxmechanic.com/rim-brands/> (consulté le 28 mai 2023).
- [48] gd-admin, « 2023 Top Alloy Wheels Manufacturers in India » [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rayonewheels.com/news/2023-top-alloy-wheels-manufacturers-in-india/> (consulté le 28 mai 2023).
- [49] T. D. İ. Ç. L. Şti, « CMS Wheels », CMS Wheels [En ligne]. Disponible sur : <https://www.cms.com.tr/en> (consulté le 28 mai 2023).
- [50] « JMS – JAMAK Wheel Trade Inc. » [En ligne]. Disponible sur: <http://www.jamak.com.tr/> (consulté le 28 mai 2023).
- [51] « Ana Sayfa », JANTSA [En ligne]. Disponible sur : <https://jantsa.com/> (consulté le 28 mai 2023).
- [52] « Italy Manufacturer producer wheel rims - Europages » [En ligne]. Disponible sur: <https://www.europages.co.uk/companies/italy/manufacturer%20producer/wheel%20rims.html> (consulté le 28 mai 2023).
- [53] L. Romão Nogueira, C. Dias, F. Rebello, L. Lopes, P. Garuti, et P. Antunes, « Manufacturing processes applied to the steel wheels production », J. Manag. Technol., vol. 4, 2016, doi : [10.24279/jmgmt.v4i2.612](https://doi.org/10.24279/jmgmt.v4i2.612).

- [54] « Steel Wheel Production Line Process | Xiaoya » [En ligne]. Disponible sur : <http://wheelmachinery.com/profile/wheel-manufacturing/199771/0/> (consulté le 28 mai 2023).
- [55] « How are alloy wheels made? », Vehicle Dynamics International [En ligne]. Disponible sur : <https://www.vehicledynamicsinternational.com/features/how-are-alloy-wheels-made.html> (consulté le 28 mai 2023).
- [56] M. Soori, « Manufacturing Processes of Car Alloy Wheels », 2022 [En ligne]. Disponible sur : <https://hal.science/hal-03740879> (consulté le 05 juillet 2023).
- [57] C. Reilly, J. Duan, L. Yao, D. M. Maijer, et S. L. Cockcroft, « Process Modeling of Low- Pressure Die Casting of Aluminum Alloy Automotive Wheels », JOM, vol. 65, n° 9, p. 1111-1121, sept. 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0677-1>.
- [58] Q. Wang, Z. Zhang, X. Zhang, et G. Li, « New extrusion process of Mg alloy automobile wheels », Trans. Nonferrous Met. Soc. China, vol. 20, p. s599-s603, juill. 2010, doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60546-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60546-8).
- .