



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Faculté de Sciences et techniques de Fès
Département de génie mécanique



PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du

Diplôme de Licence Sciences et Techniques

Spécialité : Conception et Analyse Mécanique

Thème :

ETUDE, CONCEPTION ET CARACTERISATION DU MOULE EN COQUILLE D'UN PISTON

Au sein de la Société Marocaine des Fonderies du Nord (SMFN) - FES

Présenté par :

- Mlle GTTOA Manal
- Mlle TOUIL Ibtissam

Encadré par :

- Mr. H. RACHED (SMFN)
- Pr. Mr. A. EL BARKANY (FSTF)

Soutenu le 17/06/2015 devant le jury :

- Pr. A. EL BARKANY (FSTF)
- Pr. A. ABOUTAJDDINE (FSTF)

REMERCIEMENTS

Nous rendons grâce à Dieu pour sa bénédiction tout au long de notre parcours universitaire jusqu'à l'aboutissement de ce travail de fin d'études.

Nous tenons à remercier très sincèrement monsieur le professeur **A. EL BARKANY**, notre encadrant au sein de la FST, pour son aide et ses conseils qui nous ont permis de cerner et concrétiser notre projet de fin d'études et particulièrement pour la mise en œuvre de tout son savoir faire, sa gentillesse et son soutien pour nous permettre de réaliser ce travail dans les meilleurs délais.

Notre reconnaissance également à monsieur **H. RACHED**, notre encadrant au sein de Floquet Monopole Fès, pour sa totale disponibilité à répondre à toutes nos questions ainsi que pour sa flexibilité, sa patience et son acharnement à vouloir, partager avec nous son expérience, afin de nous permettre de réussir notre stage.

Nous remercions aussi, et de tous nos cœurs, les techniciens de la société du Floquet Monopole, pour leurs précieux concours à la réussite de nos travaux, ainsi que pour l'entière disponibilité dont ils ont fait preuve pour apporter les réponses pertinentes à nos interrogations. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Nous tenons également à présenter nos sincères remerciements à monsieur le professeur **A. ABOUTAJDDINE**, membre du jury, pour l'attention qu'il a accordé à notre sujet de fin d'études.

Nos vifs remerciements enfin à tous ceux, qui de près ou de loin, ont apporté une contribution à la réussite de nos travaux.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
SOMMAIRE	3
INTRODUCTION GENERALE	6
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DEL'ORGANISME D'ACCUEIL	7
1 INTRODUCTION	7
2 ORGANIGRAMME DE LA SMFN	8
3 ORGANISATION TECHNIQUE DE LA SMFN	8
4 FABRICATION DU PISTON EN FLOQUET MONOPOLE	11
5 LA GAMME DE FABRICATION DES PISTONS	15
6 ELABORATION DU CAHIER DES CHARGES	18
CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA FONDERIE DE L'ALUMINIUM.....	19
1 INTRODUCTION	19
2 OBTENTION DE L'ALUMINIUM	19
3 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION.....	19
4 PROBLEMES DE LA FONDERIE	22
5 REMEDES AUX PROBLEMES DE FONDERIE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM.....	24
6 CONCLUSION	26
CHAPITRE 3 : ETUDE, CONCEPTION ET CARACTERISATION DU MOULE EN COUILLE DU PISTON TREFLE.....	27
1 INTRODUCTION.....	27
2 LES MASSELOTES	28
3 MÉTHODE DU CALCUL DU SYSTÈME D'ALIMENTATION DES PIÈCES	29
4 CONCEPTION DE MASSELOTAGE DU PISTON.....	35
5 CONCEPTION DU MOULE	42
6 ANALYSE SUR PROCAST	53
CONCLUSION GENERALE.....	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vu de Floquet Monopole	7
Figure 2 : Organigramme de la SMFN.....	8
Figure 3 : Mise en plan d'un piston.....	12
Figure 4 : Tête du piston	13
Figure 5 : Axe de piston	13
Figure 6 : Décentrage d'axe.....	14
Figure 7 : Lingots d'aluminium	15
Figure 8 : Echantillon d'aluminium AS 18-UNG	16
Figure 9 : La machine de démasselottage	17
Figure 10 : Four de stabilisation.....	17
Figure 11 : Les opérations des postes d'usinage.....	18
Figure 12 : Diagramme d'Ishikawa	22
Figure 13 : Gouttes froides.....	23
Figure 14 : Retassure interne.....	24
Figure 15 : Allure des isothermes dans une partie de pièce en cours de solidification.....	28
Figure 16 : Gamme d'usinage du piston	29
Figure 17 : Cote de calcul des éléments simples.....	31
Figure 18 : L'influence des bossages	33
Figure 19 : L'influence de bossage.....	34
Figure 20 : Simulation d'un remplissage dans un moule ainsi le sens du transfert de chaleur.....	36
Figure 21 : Mesure d'une masselotte cylindrique sur CATIA V5	38
Figure 22 : Simulation thermique sur SOLIDWORKS	40
Figure 23 : Mise en page d'un piston sur CATIA V5	41
Figure 24 : L'emplacement de la masselotte	42
Figure 25 : Représentation schématique du transfert thermique par conduction.....	43
Figure 26 : Maillage du moule de piston sur PROCAST.....	45
Figure 27 : Les chapes du piston 52942-450.....	46
Figure 28 : Bague cylindrique.....	47
Figure 29 : Les goujons HFH.....	47
Figure 30 : Broche.....	48
Figure 31 : L'emplacement de la broche dans la partie de la chape	48
Figure 32 : Noyau donne la forme interne du piston.....	49
Figure 33 : Les faces de la broche.....	50
Figure 34 : Mise en plan de la broche	50
Figure 35 : Forme du piston	51
Figure 36 : Système d'alimentation	51
Figure 37 : Broche.....	52
Figure 38 : Assemblage du moule sur CATIA.....	53
Figure 39 : Piston sous CATIA.....	54
Figure 40 : Les attributs du procédé de fonderie.....	55
Figure 41 : Type de moulage.....	56
Figure 42 : Le jet de coulée.....	56
Figure 43 : Volume d'entrée de forme parallélépipédique	57

Figure 44 : Des conditions initiales des calculs	57
Figure 45 : Message d'erreur	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Descriptions des postes de la chaine automatique.	9
Tableau 2 : Simplification des aptitudes technologiques et d'usage.	20
Tableau 3 : Composition chimique de l'AS-18UNG.....	21
Tableau 4 : Coefficient d'élancement de la masselotte.....	34
Tableau 6 : Temps de solidification du piston 57110FM.....	39
Tableau 8 : Mesure métrique de HFH.....	47

INTRODUCTION GENERALE

Les entreprises industrielles surtout celles qui travaillent dans le secteur automobile, cherchent aujourd'hui des arguments pour attirer plus de clients. Avoir une bonne image de la société FLOQUET MONOPOLE nécessite donc à améliorer la qualité de ses produits et d'innover d'autres.

La qualité d'une pièce moulée peut être définie comme son aptitude à satisfaire les exigences spécifiées par le cahier des charges du client. Elle dépend de la conception de la pièce par le donneur d'ordre, et du soin apporté à sa réalisation par le fondeur, qui doit maîtriser un grand nombre de paramètres de fabrication. La recherche de cette qualité passe entre autres par la reconnaissance et la description des anomalies ou défauts qui peuvent se produire au cours du processus de fonderie, indispensables pour la mise en place d'actions correctives.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet de fin d'études, dans lequel notre objectif est de trouver les remèdes des problèmes de fonderie, ainsi de concevoir un système de moulage.

Notre travail s'est articulé autour de trois chapitres principaux. Le premier chapitre est consacré à la présentation du contexte général du projet comporte une présentation de la société et un aperçu sur l'organisme d'accueil. Le deuxième chapitre met le projet dans son contexte par la détermination des défauts principaux de fonderie qu'on a spécifié dans la SMFN, en proposant des solutions pour les réduire. Enfin, le troisième chapitre comporte le dimensionnement des éléments du moule et un calcul du masselottage pour dégager des solutions simples qui permettent de pallier aux défauts de fonderie.

CHAPITRE 1

PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

1 INTRODUCTION

La Société Marocaine des Fonderies du Nord a été créée en 1981, dans le quartier industriel Sidi Brahim, lot 59, rue 812, Fès, Maroc. La Société Marocaine des Fonderies du Nord SMFN est une société de fonderie, d'usinage et de vente des axes en acier, des chemises en fonte grises et des pistons en alliage d'aluminium. Floquet Monopole (FM) société française qui fait partie du groupe Dana Américaine, a été évaluée, jugée conforme aux exigences de la norme ISO 9001 version 2000 et la norme ISO TS/16949 ce qui montre son intégration à l'échelle mondiale.

La SMFN est une société anonyme dont le capital est : 21.800.000 DHS et qui réalise un chiffre d'affaires de plus de 80 millions DHS par an. La SMFN a une production qui varie en fonction des années. Pour l'année 2002-2003, la production a atteint une valeur de plus de 600.000 pistons.

La SMFN exporte ses produits vers l'Europe, ainsi qu'à plusieurs pays à travers le monde entier, de ce fait, elle doit suivre l'évolution de la technologie en améliorant ses moyens de production, de contrôle et d'exportation.



Figure 1 : Vu de Floquet Monopole

2 ORGANIGRAMME DE LA SMFN

La Société Marocaine des Fonderies du Nord est divisée en plusieurs répartitions dont chacun d'eux remplit des tâches bien précises, l'ensemble contribue à optimiser les conditions du produit et de sa qualité (Figure 2).

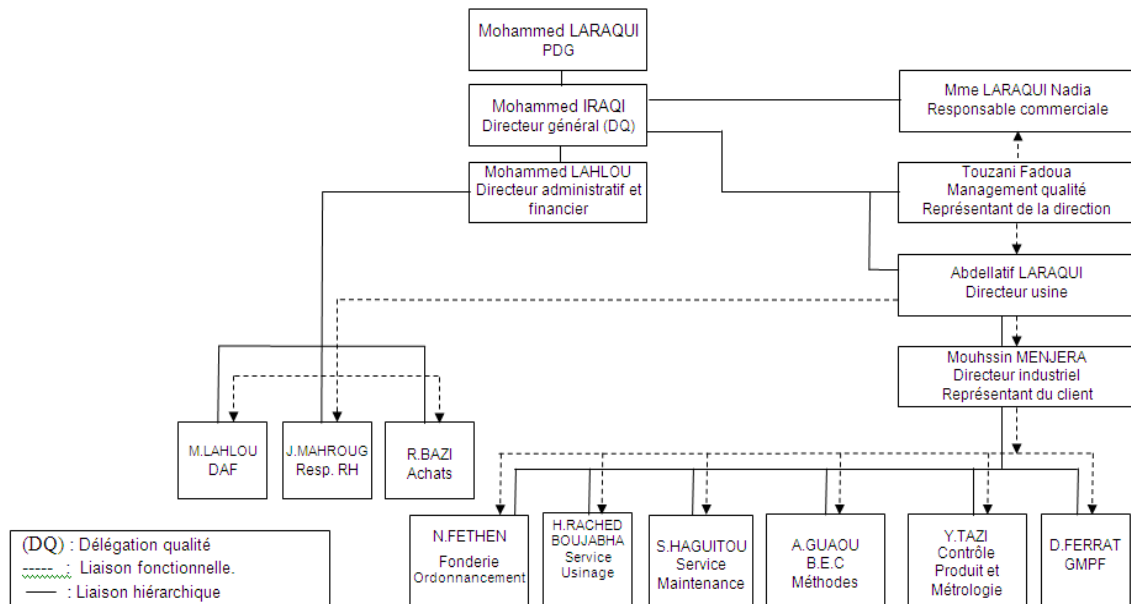


Figure 2 : Organigramme de la SMFN

3 ORGANISATION TECHNIQUE DE LA SMFN

La SMFN est constituée de plusieurs services qui assurent le bon déroulement des procédés de fabrication et de contrôle. Parmi ces services, on trouve :

3.1 BUREAU D'ÉTUDE

Il sert à étudier un mécanisme, à concevoir le fonctionnement, à choisir les matériaux constitutifs, à préciser les formes et la conception des projets.

Il sert à :

- La réalisation des plans de nouveaux produits en partant de relevées dimensionnelles du produit existant ;
- Dessiner les plans des outillages de fonderies et d'usinage spécifique à chaque produit ;

3.2 BUREAU DE MÉTHODE

Il consiste à préparer la fabrication, à prévoir, préparer, lancer puis superviser le processus d'usinage permettant de réaliser des pièces conformes au cahier des programmes de production

donnée, dans un contexte technique, humain et financier déterminé. Les taches réalisées par ce bureau sont :

- Etablissement de la gamme d'usinage (mode opératoire) ;
- Etablissement des plans des outillages de fabrication et de contrôle ainsi que les montages d'usinages et la définition des paramètres du processus ;
- Etablissement des fiches techniques : la modification de ces fiches entraîne l'édition d'une nouvelle version de la destruction de l'ancienne.

3.3 SERVICE FONDERIE

Ce service est responsable de la production fonderie tant au niveau de la qualité, que de la quantité, Il est chargé de faire respecter les procédures et les règles de sécurité dans le travail. La fonderie de SMFN utilise des alliages d'aluminium importés. Ces alliages sont conformes aux cahiers de charges des constructeurs automobiles.

3.4 SERVICE USINAGE

Le service d'usinage est responsable de la réalisation des pièces finies ou semi-finies par des machines conventionnelles ou des machines à commande numérique (Tableau 1).

Ci-dessous les différentes opérations faites dans le service d'usinage à Floquet Monopole :

Tableau 1 : Descriptions des postes de la chaine automatique

Code Poste	Description des opérations
Op 20	Ebauche externe - Gorges segments - Finition du fond - Mise en Longueur0
Op 30	Ebauche trou d'axe - Bains d'huile – Chambrage
Op 40	Finition externe - Cassage des angles
Op 50	Finition du trou d'axe
Op 60	Lavage
Op 70	Contrôle dimensionnel : diamètre externe, diamètre trou d'axe Marquage diamètre et identification piston

3.5 SERVICE CONTRÔLE

A chaque étape du processus, des contrôles fréquents sont effectués a l'aide de machines appropriées. Le laboratoire de contrôle vérifie les lots de pièces finis ou en cours de fabrication. Tous les pistons passent obligatoirement par ce laboratoire métrologique pour vérifier leur conformité métallurgique et dimensionnelle.

Ce service dispose d'une large gamme d'outils d'analyse et de contrôle :

- Des spectromètres pour l'analyse qualitative et quantitative de la matière au niveau de la fonderie en respectant le cahier des charges ;
- Un rugosimètre pour le contrôle de la rugosité ;
- Un microscope ;
- Un duromètre pour le contrôle de la dureté.

Afin de veiller autant à la qualité des produits qu'à la qualité des outils de contrôle, ce service a pour objectifs :

- D'intervenir en cas des problèmes concernant la qualité ;
- D'assurer la réception qualitative de la matière et des composants entrant dans la fabrication des pistons ;
- D'assurer la conformité des moyens de contrôle.

3.6 SERVICE MAINTENANCE

Il est responsable de l'entretien et de la maintenance des machines, et de toute l'installation électrique de l'entreprise. Il comporte aussi une maintenance préventive qui est effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire les problèmes techniques éventuels, et une maintenance corrective qui est effectuée après défaillance, ainsi qu'une maintenance systématique qui a pour fonction de remédier sur-le-champ.

3.7 SERVICE QUALITÉ

Ce service assure le bon fonctionnement du système management de la qualité et l'efficacité des activités au sein de la société conformément à la norme ISO 9002.

Pour ce fait il a pour activités :

- Assurer le respect du manuelle qualité qui est un document précisant les dispositions générales prises par l'entreprise pour obtenir la qualité de ses produits ;
- Mène des audits qualités ;
- Faire le suivi de la mise en place et l'efficacité des actions correctives engagées lors des audits.

3.8 SERVICE ORDONNANCEMENT

C'est un service qui s'occupe du positionnement réel dans le temps, des dates de début et de la fin des opérations (ou groupes d'opérations) afin de tenir les détails de fabrication.

3.9 SERVICE RESSOURCES HUMAINES

Il occupe une grande importance au sein de la société SMFN, il est chargé de toutes les fonctions administratives et professionnelles de l'ensemble du personnel de l'usine.

3.10 SERVICE EMBALLAGE

Une fois les contrôles achevés, le service emballage se charge de les classer et les ajuster avec les chemises suivant trois classes A, B, C correspondant chacune à une marge sur leurs intervalles de tolérance et selon la demande du client. L'opération s'achève par une livraison ou une expédition.

Fiche technique de la SMFN

Dénomination :	Société Marocaine des Fonderies du Nord (SMFN)
Forme juridique :	Société Anonyme (SA)
Licence :	Floquet Monopole
Siège social :	Quartier Industriel Sidi Brahim, Lot 59, Rue 812 Fès-MAROC
Certification :	ISO 9001 V 2000, ISO TS 16949
Capital social :	33.5 Millions de DHS

4 FABRICATION DU PISTON EN FLOQUET MONOPOLE

4.1 PISTON

Un piston est un organe mobile coulissant dans un cylindre. Le piston permet de convertir une pression en un déplacement mécanique ($F=P \times S$).

Le piston (Figure 3) est une pièce cylindrique mobile, qui sert à comprimer les gaz en vue d'une explosion, et qui après l'explosion transforme une énergie thermique en énergie

mécanique. Outre ces deux rôles primordiaux, le piston a d'autres rôles tout aussi importants pour le bon fonctionnement du moteur :

- Il va aspirer le mélange de gaz dans la chambre de combustion lors de sa descente ;
- Il va expulser les gaz brûlés lors de sa remontée ;
- Il doit évacuer la chaleur créée par les explosions répétées ;
- Il doit assurer l'étanchéité entre la chambre de combustion et le carter du vilebrequin rempli d'huile ;
- Il doit résister à la très forte chaleur et aux contraintes mécaniques.

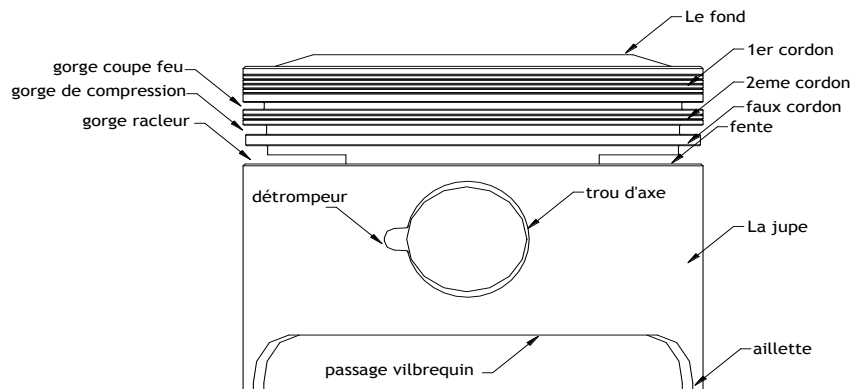


Figure 3 : Mise en plan d'un piston

4.2 LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DU PISTON

4.2.1 LA TÊTE DU PISTON

Le dessus de la tête de piston assure la partie compression/évacuation des gaz. Sa forme est liée à celle de la chambre de combustion (Figure 4).



Figure 4 : Tête du piston

4.2.2 LA JUPE DU PISTON

La jupe du piston est la partie assurant le guidage du piston dans le cylindre. Elle peut subir un traitement de surface de quelques micromètres à base de nickel ou de graphite principalement pour assurer une bonne lubrification.

4.2.3 AXE DE PISTON

Il assure la liaison entre le piston et la bielle. La force à transmettre étant élevée, sa surface en contact avec le piston et la bielle doit être très importante. Il doit résister aux efforts de flexion et être léger. L'axe de piston est fabriqué en acier cémenté, trempé, puis rectifié. Il est souvent bloqué en translation par des jons d'arrêt (Figure 5).

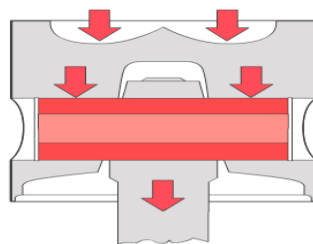


Figure 5 : Axe de piston

4.2.4 DÉCENTRAGE D'AXE

Le décentrage d'axe permet de réduire le bruit du moteur et de diminuer sensiblement les sollicitations mécaniques s'exerçant sur les composants. C'est pourquoi il faut toujours vérifier le sens de montage du piston (Figure 6).

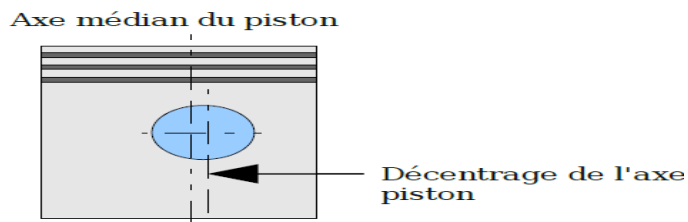
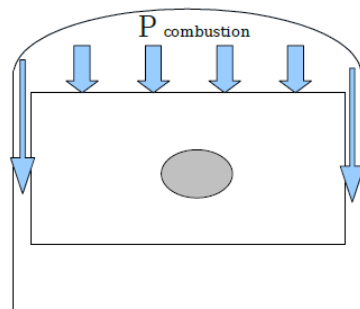


Figure 6 : Décentrage d'axe

4.2.5 LES SEGMENTS

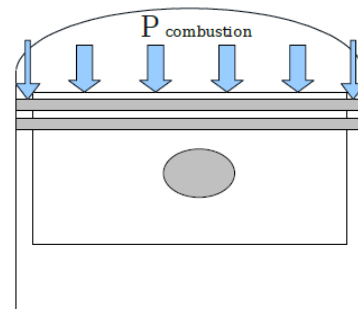
Les segments sont des anneaux élastiques (ouverts avant la pose) qui se logent dans des gorges usinées dans la tête du piston et permettent l'utilisation de toute l'énergie fournie en évitant que les gaz ne s'échappent le long du piston. Il participe aussi l'évacuation de la chaleur de combustion vers le cylindre.



Piston sans segments

La pression passe entre le cylindre et le piston :

- Perte de puissance



Piston avec segments

La pression ne passe pas entre le cylindre et le piston

- Puissance maximum

On constate 3 types de segments :

- **Le segment de feu:** est le segment en contact avec les gaz. Lors de l'inflammation, il est plaqué contre le cylindre, ce qui assure quasiment toute l'étanchéité ;
- **Le segment d'étanchéité:** ou de compression assure l'étanchéité totale des gaz en arrêtant ceux qui seraient passés par la coupe du segment de feu. Il doit permettre la bonne compression du mélange destiné à la combustion. La surface est chromée ou revêtue de molybdène ;
- **Le segment racleur:** généralement composé de deux rails très minces en haut et en bas d'un épandeur élastique.

5 LA GAMME DE FABRICATION DES PISTONS

Floquet monopole est divisé en deux parties :

5.1 PARTIE FONDERIE

Au sein de la Société Floquet Monopole, on distingue principalement la fonderie effectuée avec des moules dits permanents en métal avec coulée en coquille par gravité. La fonderie se décompose en blocs principaux :

5.1.1 LE STOCKAGE

Il y a deux box de stockage des lingots, un pour l'AS18 et l'autre pour l'AS12. AS18: alliage d'aluminium-silicium avec 18% de ce dernier (Figure 7).



Figure 7 : Lingots d'aluminium

5.1.2 LES GRANDS FOURS DE FUSION

Ce sont deux grands fours de fusion à gaz (propane) contenant des brûleurs à air induit et où la température peut dépasser 1000°C. L'alliage fondu est versé dans un sens puis acheminé vers les fours de maintien. Actuellement, ces fours sont abandonnés pour des raisons économiques et techniques.

5.1.3 LES FOURS DE MAINTIEN

Ce sont des fours électriques composés d'un creuset à base de carbure de silicium qui a des propriétés thermiques intéressantes, entouré d'une résistance électrique et le tout revêtu d'une couche de laine de verre qui est un excellent isolant thermique. Actuellement, ils sont utilisés pour la fusion des lingots.

5.1.4 TECHNIQUE DE FUSION

On commence tout d'abord par le chargement du four par :

- 20% masselottes ;
- 30% pistons rebuts ;
- 50% lingots d'aluminium.

Il est important de signaler que l'ajout des lingots ne se fait pas d'une manière directe. Une astuce consiste à les mettre sur le four quelques minutes pour les préchauffer avant de les introduire. La régulation de la température du four se fait à l'aide d'un thermocouple et d'un système automatique de telle sorte que la température devient inférieure à 730°C (environ 713 °C) le système se remet en marche pour alimenter les résistances du four.

5.1.5 LE MOULAGE D'ÉCHANTILLON

Une fois la quantité demandée de lingots est fondue dans le four, et juste avant de commencer à mouler les pistons, il faut faire ce qu'on appelle « moulage d'échantillon » (Figure 8). Grâce à un moule, on réalise une pièce échantillon qui va être envoyée au laboratoire de contrôle pour vérifier la composition chimique du métal fondu et donner le feu vert à l'opération de moulage.



Figure 8 : Échantillon d'aluminium AS 18-UNG

Un premier contrôle à l'oeil nu permet de savoir s'il y a une forte dose de fer: il y a une sorte de poudre noirâtre qui apparaît à la surface du piston.

- Le coulage de précision :

Le moule doit être testé afin de savoir s'il réalise de bonnes pièces, pour cela, on effectue la coulée et on vérifie les dimensions du brut. Si elles sont conformes, le feu vert est donné, c'est-à-dire que la production peut commencer. Après avoir testé l'efficacité du moule, on fait fondre la matière première qui est l'aluminium et quelques alliages à une température très élevée qui atteint les 900°C.

- Démasselotage :

Après l'obtention du brut, il faut enlever le système de coulé et la masselotte suivant les dimensions du piston par la machine de démasselottage (Figure 9).



Figure 9 : La machine de démasselottage

5.1.6 STABILISATION

La fonderie est dotée de deux fours de stabilisation (Figure 10) pour le traitement thermique des pistons. Les pièces sont passées dans le four de stabilisation (220°C pendant 10 heures) pour réguler la dureté.



Figure 10 : Four de stabilisation

5.1.7 ZONE D'ATTENTE

Après la stabilisation, les pistons sont stockés en zone d'attente avant l'usinage. Ils sont mis dans des bacs avec des fiches d'identification indiquant leurs références et leurs quantités.

5.2 LA PARTIE USINAGE

Ci-dessous les opérations des postes d'usinage (Figure 11).

:

**OP20**

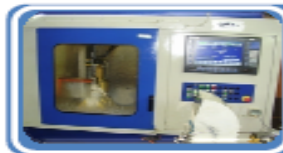
• L'OP20 fait les opérations suivantes : l'ébauche fond, jupe et cordon, l'ébauche et la finition des gorges segments, la finition du fond (bossette et trottoir), la mise en longueur et les cassages des angles.

**OP30**

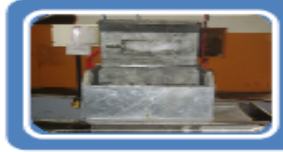
• L'OP30 permet de réaliser l'ébauche du trou d'axe, chambrage et bain d'huile trou d'axe.

**OP40**

• L'OP40 permet de réaliser la finition jupe et cordon du piston ainsi que les cassages des angles.

**OP50**

• L'OP50 fait l'opération de la finition trou d'axe.

**OP60**

• L'OP60 fait le lavage.

**OP70**

• L'OP 70 fait l'opération d'étalonnage et le marquage : c'est la machine de contrôle des pistons, elle contrôle le diamètre, la hauteur et la décroissance.

Figure 11 : Les opérations des postes d'usinage

6 ELABORATION DU CAHIER DES CHARGES

Le cahier des charges a pour objectif de diagnostiquer les différents problèmes du service de fonderie à la SMFN afin de suivre, améliorer et augmenter le rendement de la société. Dans le cadre de cette contribution à l'amélioration de la fonderie, notre projet de fin d'études consiste à :

- diagnostiquer et analyser les défauts de fonderie ;
- trouver les remèdes de ces défauts ;
- calcul de masselotte ;
- Etude de la conception du moule ;
- Simulation sur PROCAST.

CHAPITRE 2

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA FONDERIE DE L'ALUMINIUM

1 INTRODUCTION

L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans la plupart des secteurs d'activités de l'Homme depuis l'agriculture jusqu'à l'industrie de pointe en passant par l'automobile, le bâtiment et l'industrie lourde.

Ils ont contribué au développement des secteurs entiers tel l'automobile. Cet emploi généralisé de l'aluminium et de ses alliages résultent de leurs propriétés mécaniques, physiques et électriques.

2 OBTENTION DE L'ALUMINIUM

2.1 LA BAUXITE

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

2.2 L'ALUMINE

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer: la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

2.3 L'ALUMINIUM

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode).

3 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION

L'aluminium non allié ayant des propriétés mécaniques faibles souvent insuffisantes pour l'utilisation, on est conduit pour améliorer ses propriétés en ajoutant des éléments qui modifient plus ou moins profondément la micro structure du métal. Les additions principales sont déterminées par les différentes propriétés métallurgiques et technologiques. Dans la SMFN, on utilise le silicium comme un additif dans l'alliage d'Aluminium.

Le tableau suivant présente les caractéristiques de l'alliage Al-Si :

Tableau 2 : Simplification des aptitudes technologiques et d'usage

Alliage		Aptitudes technologiques et d'usage ^(N)						
		Résistance mécanique	Usinabilité	Soudabilité	Malléabilité à froid	Malléabilité à chaud	Résistance à la corrosion	Aptitude à l'anodisation
Moulage	Al. Si ^(N)	2	1	3	1	2	4	1

Note 0 : à proscrire quasi impérativement

Note 1 : difficultés sérieuses – précautions obligatoires à prendre.

Note 2 : difficultés existantes mais beaucoup moins graves.

Note 3 : absence de difficultés marquées.

Note 4 : excellent à recommander.

sans cuivre.

risque de corrosion feuilletante sur état soudé.

L'alliage de l'AS18-UNG et AS12-UNG sont essentiellement destinés aux pistons de moteurs à essence ou diesel qui se travaillent à chaud et aux frottements.

3.1 LES LOTS DANS LA SMFN

Sur chaque pile de lingots de l'alliage Al-Si doit être inscrit un numéro de coulée et le poids de la pile. L'alliage doit être identifié par une bande de peinture pour la première fusion, et rajouter une autre bande noire s'il s'agit de la deuxième fusion. La longueur de lingots doit être inférieure 0.6m et le poids inférieur à 15kg.

3.2 EXEMPLE D'UN ALLIAGE TRAITÉ A LA SMFN

L'alliage traité (Tableau 3) au Floquet Monopole se compose principalement de :

Tableau 3 : Composition chimique de l'AS-18UNG

ELEMENTS	MINIMUM VALEUR EN %	MAXIMUM VALEUR EN %
Si	16,5	19,5
Fe	0	0.75
Cu	0.80	1.50
Mn	0	0.30
Mg	0.80	1.50
Ni	0.80	1.30
Zn	0	0.20
Pb	0	0.10
Sn	0	0.10
Ti	0	0.20
Autres éléments	0	0.15

3.3 L'USAGE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE L'AS-18UNG

Les compositions de l'alliage Al-Si :

- Silicium : confère à l'alliage d'excellentes propriétés de fonderie, telles qu'une augmentation de la coulabilité, une diminution de l'aptitude à la retassure (il se dilate à la solidification). On note aussi une augmentation de la résistance à l'usure (le silicium est très dur) ;
- Cuivre : augmente les propriétés mécaniques par durcissement structural, principalement la dureté (donc l'usinabilité) et la tenue à chaud sans perte au niveau de la coulabilité mais diminue la résistance à la corrosion ;
- Magnésium : augmente la résistance à la corrosion ;
- Zinc : très peu utilisé à cause de ses médiocres capacités en fonderie et ses faibles propriétés mécaniques, mais il améliore la coulabilité (faiblement), diminue l'allongement, augmente la tendance à la micro retassure ;
- Fer : le fer pur est particulièrement intéressant pour son aimantation à saturation à cause du moment magnétique important attaché à chaque atome de fer ;
- Plomb : Grace à sa grande malléabilité et son bas point de fusion, il a été transformé et employé dans la métallurgie (fonderie), à l'état pur ou sous forme d'alliages ;
- Manganèse: augmente la résistance des alliages d'aluminium et la propriété de l'alliage ;
- Titane : il se caractérise par leur excellente résistance à la corrosion dans de nombreux milieux.

3.4 PROPRIÉTÉS DOMINANTES D'ALLIAGE AL-SI

- Excellentes caractéristiques mécaniques à températures élevée ;

- Excellentes propriétés de fonderie ;
- Très bonne résistance à l'usure par frottement ;
- Très bonnes caractéristiques mécaniques à température élevée.

4 PROBLEMES DE LA FONDERIE

4.1 INTRODUCTION

Après une analyse au service de fonderie, nous avons présenté les différents problèmes de fonderie sous forme d'un diagramme d'Ishikawa ou encore diagramme en arrêtes de poisson (Figure 12) qui est bien adapté pour visualiser toutes les causes d'un problème donné et qui nous servira de base de planification des actions à mener pour résoudre chacune des causes.

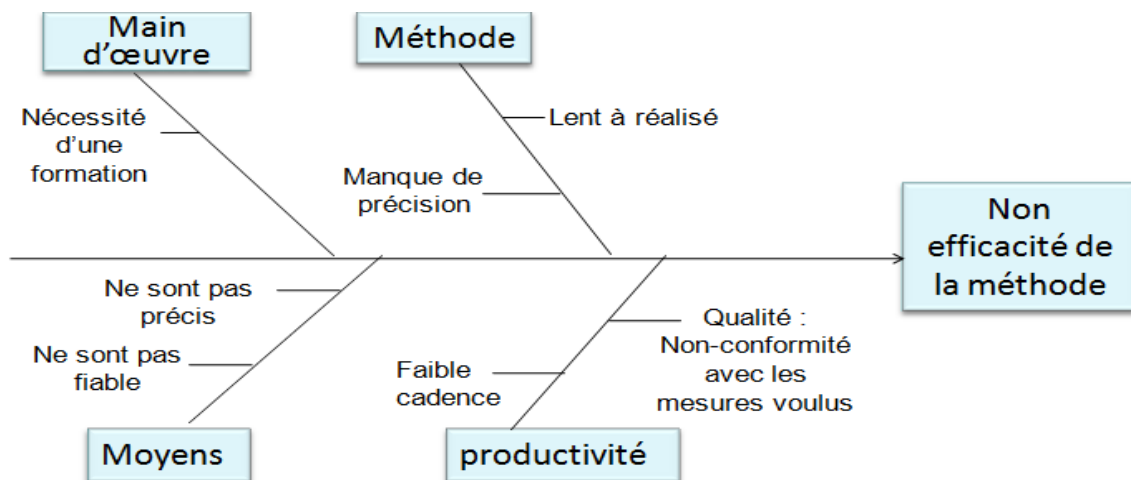


Figure 12 : Diagramme d'Ishikawa

Au cours du stage, nous avons remarqué que l'alliage Al-Si utilisé pour la fabrication des pistons présente plusieurs défauts, ce qui mène à avoir des pistons non conformes ou de mauvaises qualités. Nous n'envisagerons ici que les défauts "courants" constatés sur les pièces de série. Ces défauts peuvent se classer en deux groupes :

- Les défauts externes que l'on constate sur la pièce après la coulée ;
- Les défauts internes ;

Ils peuvent avoir deux origines :

- Les facteurs métallurgiques ;
- Les facteurs de moulage.

On distingue dans la SMFN les types des défauts suivants :

4.2 LES DÉFAUTS DUS À LA MAUVAISE VENUE DE LA PIÈCE

Ils apparaissent souvent sous forme d'un manque de métal, de forme diverse, plus ou moins grande, appelé non-venue. Ils peuvent aussi se manifester sous forme de fissures appelées reprises. On en distingue généralement deux types: la reprise froide, à bords arrondis et la reprise chaude, à bords nets. La faible densité des alliages d'Aluminium et aussi la forte tension superficielle de la pellicule d'alumine qui recouvre toujours le métal à l'état liquide, facilite ces défauts. Les principales causes sont :

- Température de coulée trop basse ;
- Température de coulée trop élevée ;
- Mauvaise alimentation du moule ;
- Coulée interrompu ;
- Mauvais choix de l'alliage.

4.2.1 GOUTTES FROIDES

Elles se présentent comme des gouttes métalliques oxydées qui se solidifient prématurément et se soudent mal à l'ensemble de la pièce, constituant des points durs qui gênent l'usinage (Figure 13).

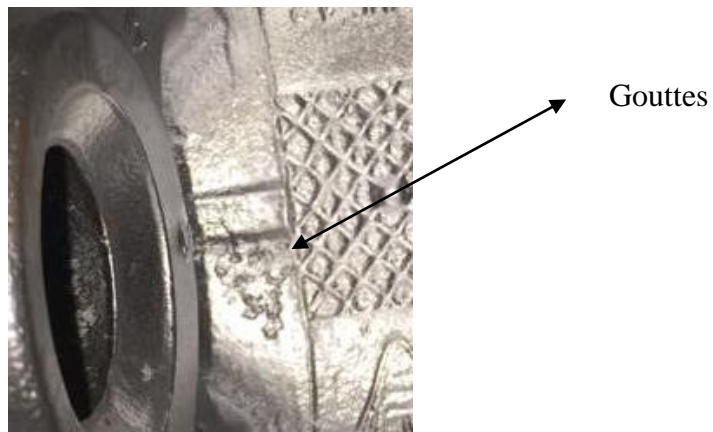


Figure 13 : Gouttes froides

4.2.2 FLOU

C'est un défaut de surface apparenté aux reprises. Il nuit à la bonne présentation de la pièce. Un excès d'humidité en est la principale cause.

4.2.3 PIÈCES DÉFORMÉES ET VOILÉES

Ces défauts proviennent d'un refroidissement irrégulier des différentes parties de la pièce, de la résistance des noyaux ou du moule s'opposant au retrait, enfin du traitement thermique.

4.2.4 LES RETASSURES

Les retassures (Figure 14) sont dues aux changements de volume de la pièce coulée jusqu'à sa solidification complète. Elles peuvent être externes ou internes. La présence de retassure réduit fortement les caractéristiques mécaniques de la pièce considérée.



Figure 14 : Retassure interne

4.2.5 LES PIQÛRES

Elles sont dues aux dégagements partiels pendant la solidification, des gaz qui se trouvent en dissolution dans le métal liquide. Ces gaz peuvent avoir diverses origines (métal, fusion, moule).

4.2.6 LES SOUFLURES

Les soufflures se présentent sous forme de cavités ouvertes ou fermées, résultant d'air emprisonné à la coulée, ou de vapeur dégagées à travers le métal liquide par le moule ou les noyaux. On remarque en général deux sortes de soufflures : celles qui se produisent lorsque le métal est encore fluide et celles qui se forment lorsque le métal est devenu pâteux.

5 REMEDES AUX PROBLEMES DE FONDERIE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

L'étude des diverses causes des défauts de fonderie dans la SMFN a révélé que ceux-ci sont dus principalement à un certain nombre de facteurs contrôlables par le fondeur. En effet, les défauts de fonderie sont des résultats des petites erreurs d'appréciation, commises par le fondeur, sur certains paramètres du moulage. Il importe donc de maîtriser ces paramètres pour lutter efficacement contre les défauts de fonderie.

Les écarts de composition par rapport aux compositions chimiques peuvent avoir différentes causes :

5.1 COMPOSITION DES CHARGES

La fonderie de la SMFN utilise principalement des lingots avec un pourcentage de 50% d'aluminium, des jets ou alliages de deuxième fusion (rebuts) avec 30% ainsi que les masselottes avec 20%.

5.2 LES DÉFAUTS PROVENANT DE L'OUTILLAGE

Augmenter la température, compte tenu des prescriptions données pour la fusion de l'alliage Al-Si :

- Surveiller la température de fusion et éviter qu'elle ne prenne des valeurs élevées ;
- Surveiller l'étuvage des noyaux (dégagement de gaz) ;
- Placer des événements dans les régions où se produit le défaut ;
- Adjoindre des tirées d'air ou goupilles d'air ;
- Multiplier les attaques pour amener le métal sur place ;
- Augmenter le nombre de jets de coulée ;
- Tenir le jet de coulée toujours plein pour éviter les entraînements d'air.

5.3 TRAITEMENT DES ALLIAGES À L'ÉTAT LIQUIDE

Nous, n'aborderons ici que les traitements qui rentrent dans les remèdes que nous avons préconisés contre les défauts de fonderie. Il s'agit des traitements relatifs à la protection, à la désoxydation, à l'affinage et au dégazage du métal liquide.

5.4 LES IRRÉGULARITÉS DE SURFACE

5.4.1 LES GOUTTES

- Éviter les chutes exagérées du métal ;
- Prévoir un entonnoir de coulée de dimensions appropriées pour éviter le tourbillon.

5.5 PIÈCES DÉFORMÉES ET VOILÉES

- Attendre que le métal soit solidifié avant d'ouvrir le moule.

5.6 LES PIQÛRES

- Désoxyder le métal liquide.

5.7 LES SOUFLURES

- Aérer les noyaux d'air ;
- Diminuer la vitesse de coulée.

5.8 LES GRAINS ET POINTS DURS

- Éviter une surchauffe excessive du bain ;
- Dégazer le bain ;
- Désoxyder le bain.

5.9 PROTECTION DES BAINS

- La protection s'obtient en recouvrant la surface du bain avec un flux de couverture dont une des propriétés est de dissoudre l'alumine qui se forme.

5.10 DÉSOXYDATION

- Faire pénétrer au sein du métal liquide l'azote qui contient des solvants de l'alumine (fluorures) et dégagent des gaz inertes vis-à-vis de l'aluminium et de ses alliages. Ces flux plus légers remontent en surface, chargés d'alumine.

5.11 AFFINAGE

- Pour affiner une structure, c'est-à-dire avoir un grain fin, facteur de très bonnes caractéristiques, on doit ajouter aux bains certains éléments ayant des propriétés affinantes, tels que le titane, le bore et le phosphore.

6 CONCLUSION

Malgré le recours aux différents remèdes qu'on a traités ci-dessus, les défauts de fonderie continuent d'apparaître. L'adoption d'un procédé complémentaire pour la résolution des anomalies relevées est indispensable : c'est pourquoi, notre démarche consistera dans un premier temps de faire un calcul des masselottes et dégager des solutions simples qui permettent de pallier aux défauts de fonderie. Enfin, faire une conception du moule permanent sur CATIA et PROCAST.

CHAPITRE 3

ETUDE, CONCEPTION ET CARACTERISATION DU MOULE EN COQUILLE DU PISTON TREFLE

1 INTRODUCTION

Au cours de nos recherches documentaires internes et externes à la société Floquet Monopole, nous avons remarqué que la méthode générale de masselotte a été préconisée par le centre technique de la fonderie (CTIF de France).

Lorsqu'un alliage est versé dans une empreinte, c'est évidemment par les parois de cette dernière qu'il se refroidit. La solidification dite latérale se propage dans le sens de l'épaisseur, alors que, la solidification dite longitudinale s'effectue dans le sens de la plus grande dimension de la pièce.

Si la solidification se trouve naturellement dirigée dans l'extrémité de longueur E de la pièce, la solidification longitudinale, partant de la face d'extrémité, se conjugue le long de l'axe de la pièce avec la solidification latérale pour créer l'effet désiré. Cette partie sera saine si tous les gradients de température atteignent à n'importe quel endroit une valeur minimale critique en fonction de la nature de l'alliage.

Il est, d'autre part, possible de modifier l'allure des isothermes qui s'établira normalement dans la partie **B**, au moyen d'un certain nombre de tels que :

- En raccordant à une masselotte efficace ;
- En renforçant progressivement l'épaisseur de paroi (forte dépouille si possible) ;

Le raccordement de la pièce à une masselotte peut permettre d'obtenir une pièce entièrement saine sur une longueur **A** telle que les gradients de température y soient suffisants. Cette longueur **A** de la pièce saine due à la présence de la masselotte est appelée « rayon d'action » de la masselotte. Par analogie, un effet d'extrémité complémentaire dû à un refroidissement sera noté *E'*.

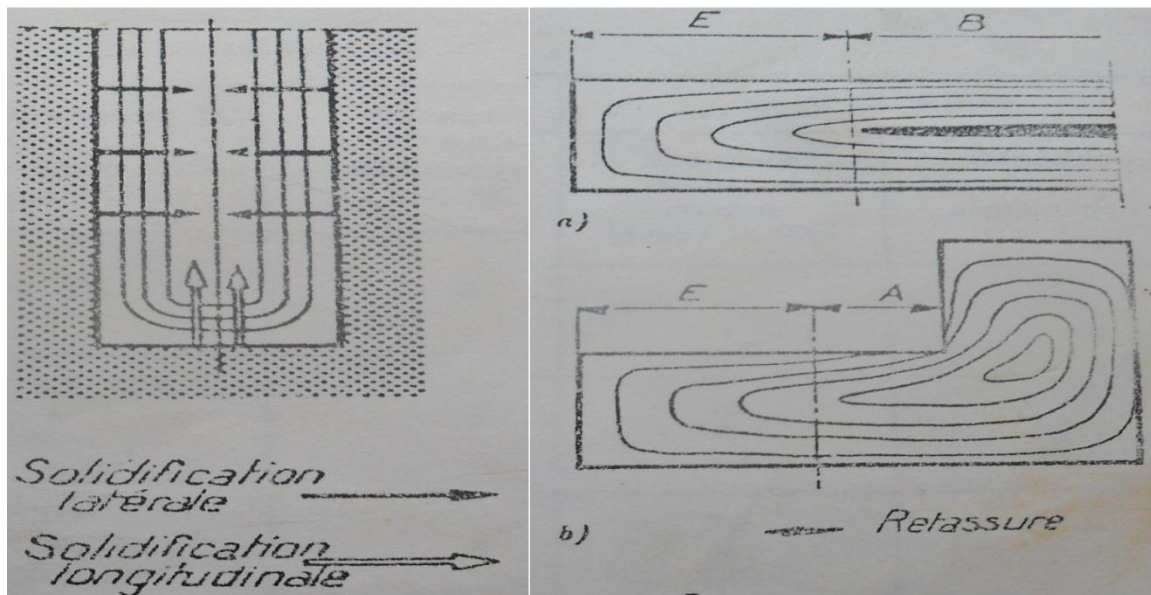


Figure 15 : Allure des isothermes dans une partie de pièce en cours de solidification

a) Sans masselotte avec extrémité E ;

b) Avec masselotte, rayon d'action A et extrémité E ;

D'après la figure, on constate que pour éviter les retassures on devra utiliser des masselottes.

2 LES MASSELOTES

Les masselottes sont la solution la plus efficace de compensation des variations de volume de la partie de pièce attenante au cours de sa solidification, ce procédé diminue également les défauts de fonderie de la pièce. Il faut en outre que la masselotte puisse jouer convenablement son rôle de réservoir compensateur jusqu'au moment où la pièce est entièrement solidifiée. Il est donc nécessaire, mais non suffisant, qu'au moins une partie de la masselotte reste liquide plus longtemps que la partie de pièce à laquelle elle est destinée.

2.1 REMARQUE

- En règle générale, les retraits ont toujours lieu. Les masselottes sont donc toujours nécessaires.
- Coefficient de sécurité ou de forme à donner aux masselottes: pour qu'une masselotte puisse jouer son rôle jusqu'à complète solidification, il faut que son temps de solidification soit supérieur à celui de la partie de la pièce à laquelle elle est destinée.
- En plaçant une masselotte sur les points chauds, la retassure se produira dans la masselotte et non dans la pièce.

3 MÉTHODE DE CALCUL DU SYSTÈME D'ALIMENTATION DES PIÈCES :

La figure ci-dessous présente la gamme d'usinage de piston (Figure 15).

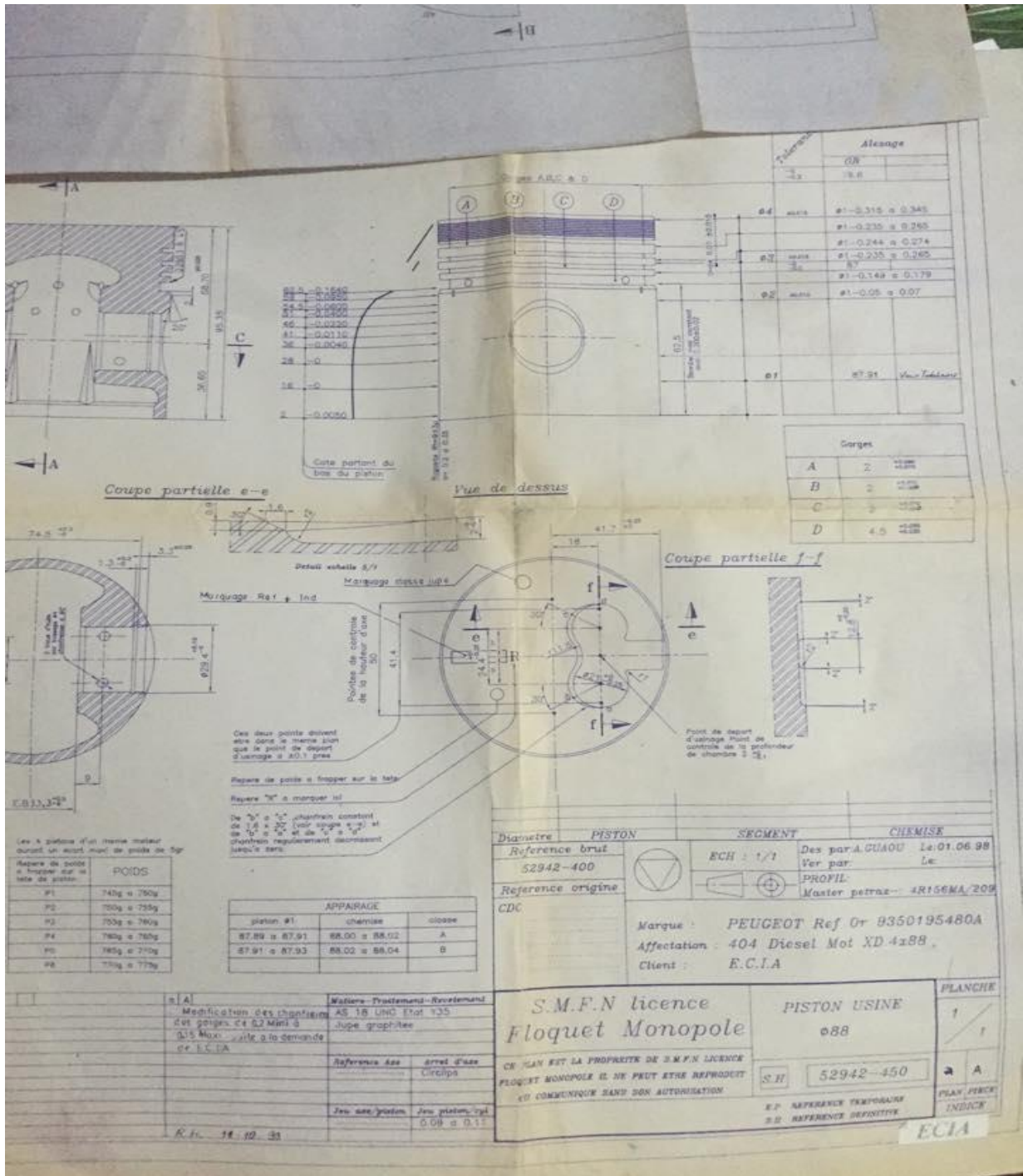


Figure 16 : Gamme d'usinage du piston

3.1 GAMME DE FABRICATION RÉELLE

3.1.1 INTRODUCTION

La méthode de calcul de masselotte en moulage par gravité préconisée par le Centre Technique des Industries de la Fonderie (CTIF de France) a pour objectif d'établir une orientation de la pièce de fonderie vers les masselottes. Pour ce faire, il applique :

- En premier lieu, l'analyse de la forme ;
- En deuxième lieu, les règles de masselotte.

3.1.2 PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Pratiquement, pour effectuer le calcul des masselottes sur une pièce donnée, le fondeur est amené à suivre la démarche suivante :

- Décomposer la pièce de fonderie en entités géométriques simples (analyse de la forme) :
 - Elément
 - Raccords
 - Bossage
 - Noyaux
- Déterminer le diagramme de la pièce de fonderie:
 - Temps de solidification ;
 - Module géométrique ;
 - Epaisseur équivalente.
- Etablir une solidification dirigée de la pièce vers les masselottes.
- Vérifier les règles de masselottes :
 - Règle des modules ou règle des épaisseurs équivalentes ;
 - Règle des rayons d'action ;
 - Règle des retraits.

3.1.3 DÉMARCHE À SUIVRE

Pratiquement, pour effectuer des masselottes sur une pièce donnée, le fondeur est amené à suivre la démarche suivante :

- Décomposer la pièce de fonderie en entités géométriques simples ;
- Calculer l'épaisseur équivalente de chaque entité ;
- Etablir le diagramme thermique de la pièce ;
- Positionner les masselottes ;
- Calculer les dimensions des masselottes ;
- Vérifier les règles de masselottes.

○ ANALYSE DE LA FORME

▪ INTRODUCTION :

Dans l'étude sur plan, toute pièce de forme complexe est décomposée en une juxtaposition d'éléments de forme géométrique bien déterminée et de raccordements. Les éléments à faces planes sont remplacés directement par leur plaque équivalente. Quand aux raccordements, ils sont rapportés à l'épaisseur d'une des parties afférentes corrigée par un coefficient de forme propre au type de raccordement.

3.1.3.1 LES BUTS D'ANALYSE DE LA FORME

- Déterminer l'ordre de solidification naturel des différentes parties d'une pièce ;
- Corriger cet ordre de solidification en jouant éventuellement sur les modifications de tracé ;
- Déterminer les « point chauds accessibles » ;
- L'analyse de la forme doit donc précéder toute étude d'alimentation, en d'autres termes toute étude de masselottes.

3.1.4 MARCHE À SUIVRE POUR L'ANALYSE DE LA FORME

- Considérer les différentes coupes de la pièce brute, c'est-à-dire, avec toutes les surépaisseurs tracées ;
- Décomposer la pièce en éléments simples et raccordements d'éléments à angles droits ;
- Utiliser nécessaire les ressources des parallélépipèdes ou rectangles exinscrits ;
- Déterminer les plaques équivalentes des éléments intermédiaires ;
- Détermination de la plaque équivalente : Cas des éléments simples (Figure 16).

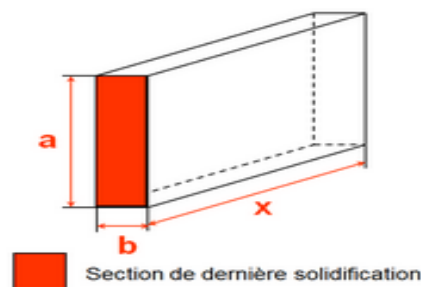


Figure 17 : Cote de calcul des éléments simples

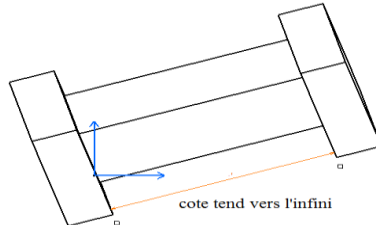
Soit un élément de pièce représenté par un parallélépipède exinscrit de dimensions a , b et x tel que :

- la section colorée est la surface par laquelle l'élément est alimenté en métal, elle est dite : section de référence ;

- x est repéré sur la normale de la section de référence ;
- a et b définissent respectivement la longueur et largeur de la section de référence ;

Avec deux conditions :

- toute dimension a ou x comprise entre deux sections chaude a pour valeur l'infini ;



- toute dimension comprise entre deux sections et une paroi de sable doit être multipliée par deux.

○ LE MODULE GEOMETRIQUE M_g

Il est défini par l'expression suivante : $M_g = \frac{V}{S} = \frac{x \cdot a \cdot b}{(2 \cdot a \cdot x + 2 \cdot x \cdot b + a \cdot b)}$

Où : V est le volume du parallélépipède rectangle

S est la valeur des surfaces du parallélépipède en contact avec le sable

L'épaisseur géométrique de la plaque équivalente :

Il sera noté désormais $e'(a, b, x)$ avec :

$$e'_g(a, x, b) = 2 * M_g = 2 * \frac{V}{S} = \frac{2 * x * a * b}{(2 * a * b + 2 * x * b + a * b)}$$

○ INFLUENCE DES BOSSAGES

- **Type I :** $l > 10h$ avec $l \leq L \leq \infty$

$$\text{Si } e'_p \geq \frac{h}{2}$$

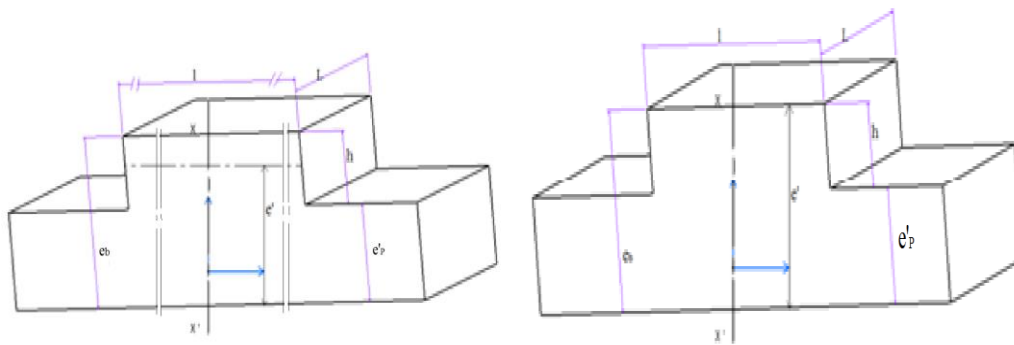
Plaque équivalente $e' = e_b$

$$\text{Si } e'_p < \frac{h}{2}$$

La plaque n'a pas d'influence sur le temps de solidification en XX' . Le bossage peut être alors considéré comme thermiquement indépendant.

Dans ce cas, section de référence en XX' poser :

$$\left\{ \begin{array}{l} a = L \\ x = \frac{l}{2} \\ b = e_b \end{array} \right\} \text{Noter } D_0 \text{ posé } \left\{ \begin{array}{l} a = x = \infty \\ b = e' = \frac{D_0}{6} \end{array} \right\}$$



Bossage de type II : $10h > l > 2h$ avec $l \leq L \leq \infty$

Plaque équivalente du bossage seul : section de référence= surface de liaison, poser :

$$\left\{ \begin{matrix} a = L \\ x = h \\ b = l \end{matrix} \right\} \text{Noter } D_o, \text{ poser } \left\{ \begin{matrix} a = b = \infty \\ x = e'_b = \frac{D_o}{6} \end{matrix} \right\}$$

(Faire coïncider la valeur de D_o trouvée avec $b = \infty$: sur l'échelle de x en face de $a = \infty$ lire la valeur de e'_b)

1. Si $e'_p \geq \frac{e'_b}{2}$

Plaque équivalente du raccordement en XX' :

$$e'' = e'_p + e'_b$$

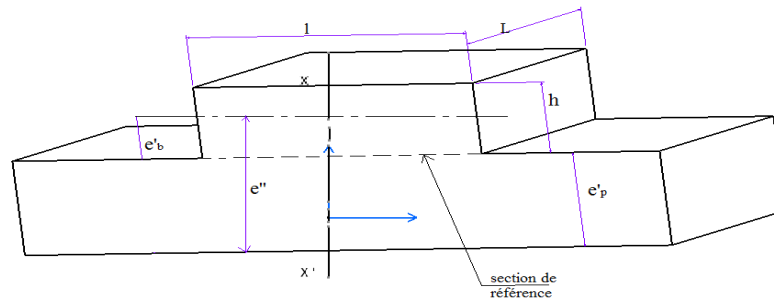


Figure 18 : L'influence des bossages

2. Si $e'_p < \frac{e'_b}{2}$

La plaque n'a pas d'influence sur le temps de solidification suivant XX' . Le bossage peut être alors considéré comme thermiquement indépendant.

Dans ce cas, section de référence en XX' ; poser :

$$\left\{ \begin{matrix} a = L \\ x = \frac{l}{2} \\ b = e_b \end{matrix} \right\} \text{Noter } D_o \text{ poser } \left\{ \begin{matrix} a = x = \infty \\ b = e' \end{matrix} \right\}$$

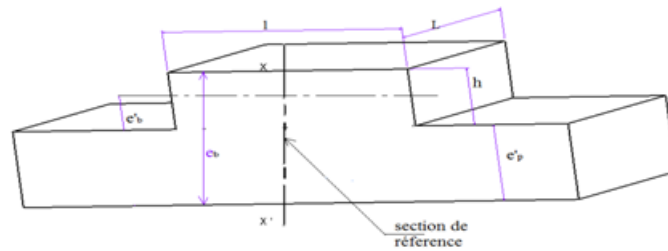


Figure 19 : L'influence de bossage

3.2 RÈGLE DE MASSELOTTE

Pour garantir une production de pièces exemptes de retassures, il est nécessaire de vérifier trois règles de masselottes :

- Règle des modules (épaisseurs équivalentes) ;
- Règle des rayons d'action ;
- Règle des retraits.

3.2.1 RÈGLE DES MODULES

Elle consiste à établir une solidification dirigée vers les masselottes, et exige que l'épaisseur équivalente de chaque entité doive être impérativement inférieure à celle d'une entité masselotte adjacente.

Les dimensions de chaque masselotte sont déterminées de manière que le diamètre D_0 de la masselotte de référence (masselotte de rapport $\frac{\text{hauteur}}{\text{diamètre}} = 1.5$) soit lié à l'épaisseur e' de la plaque équivalente de la partie de pièce à laquelle elle est destinée, selon la relation :

$$D = e' * (1 + K * \alpha) * \frac{1}{2 * \alpha} * J$$

Avec :

α : coefficient d'élanement du masselotte égale $\alpha = \frac{H}{d}$

Où H et d sont successivement la longueur et le diamètre du masselotte

Tableau 4 : coefficient d'élanement de la masselotte

Masselotte	$\alpha = \frac{H}{d}$
Cylindrique	≥ 1.5

cyindro-sphérique	2.0
Allonge	2.0

Les dimensions du piston traité dans la SMFN sont :

$$\alpha = \frac{H}{d} = \frac{70}{40.68} = 1.72$$

Puisque $\alpha=1.72 \geq 1.5$ donc la masselotte est sous forme d'un cylindre.

4 CONCEPTION DE MASSELOTAGE DU PISTON

Les masselottes peuvent ajouter beaucoup au poids total, il est donc important d'optimiser leur taille et leur forme. Dans un moulage bien conçu la solidification est orientée vers la masselotte, la masselotte doit se solidifier après la coulée et contenir suffisamment de métal pour alimenter la coulée ou partie d'une coulée. Le temps de solidification peut être prédit en utilisant la règle de Chvorinov.

$$\text{temps de solidification} = B \left(\frac{\text{Volume}}{\text{Surface}} \right)^n$$

N : Le paramètre est compris entre 1.5 et 2.

4.1 CALCULE DE LA CONSTANTE B

B est une constante qui dépend du matériau du moule, des propriétés du métal et de la température du moule et du métal lors de la coulée. Elle est basée sur des données expérimentales d'opérations antérieures effectuées.

Le transfert de chaleur dans le moule s'effectue de proche en proche, la chaleur passant spontanément du coulé la plus chaude aux chapes les plus froids.

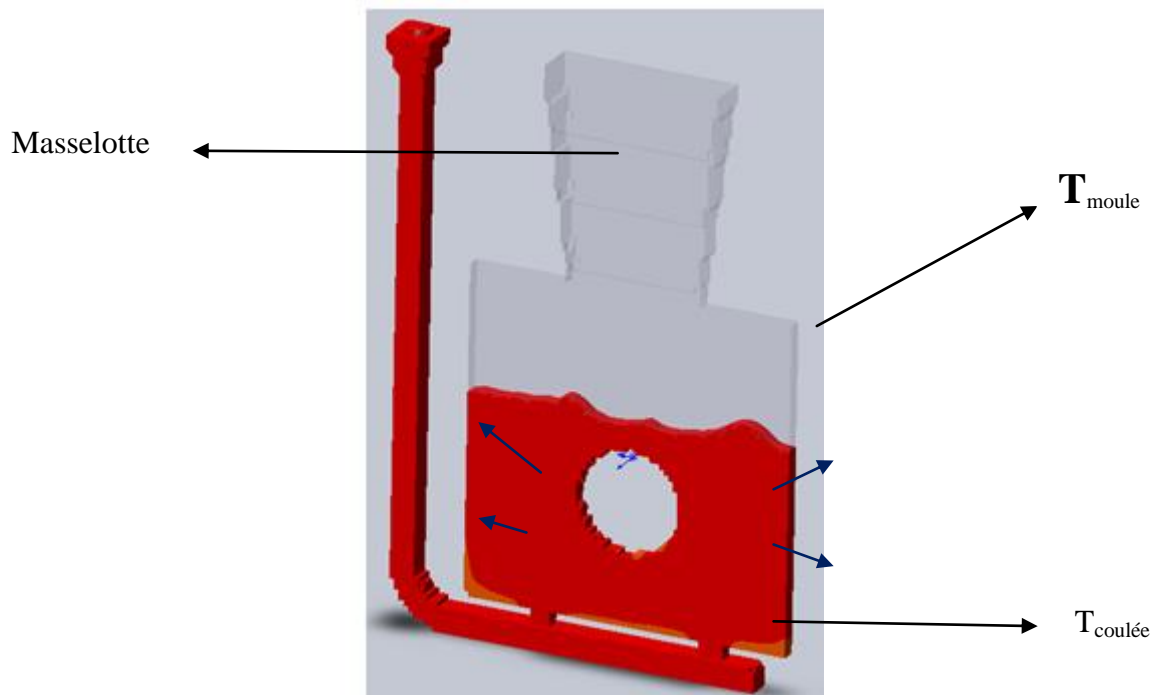


Figure 20 : Simulation d'un remplissage dans un moule ainsi le sens du transfert de chaleur

Le flux de chaleur d'une manière générale est présenté par la loi de Fourier qui fait exprimer le fait que toute différence de température entraîne un échange de chaleur dans le sens des températures décroissantes. Donc le flux de chaleur à l'interface du moule :

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{moule, x=0} = -k_{moule} \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{coulée} = -\sqrt{\frac{k_{moule} \rho_{moule} C_{moule}}{\pi t}} (T_{p\text{fusion}} - T_0)$$

- Q: flux de chaleur en watt (W) ;
- K: conductivité thermique du matériau (en $W.m^{-1}.K^{-1}$) ;
- A: surface du moule ;
- dT : différence de température ;
- x : axe considéré.

Après qu'on verse la coulée, cette dernière entraîne une augmentation dans la température du système. La quantité de chaleur qu'il faut fournir pour l'élever est appelée la capacité thermique présentée par la relation ci-dessous :

$$C = \frac{dQ}{dT} = \rho_{coulé} \Delta H \frac{dV}{dt} = \rho_{coulé} \Delta H A \frac{dS}{dt} \quad [JK-1]$$

En général:

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{coulé} = \rho_{coulé} \Delta H \frac{dS}{dt}$$

- ΔH : chaleur latente de fusion ;
- V : volume de métal solidifié ;
- A : surface de l'interface moule métallique ;
- S : épaisseur de métal solidifié (x).

Le flux de chaleur à travers la surface du moule est conservatif donc :

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{coulée} = \left(\frac{q}{A}\right)_{moule}$$

$$-\sqrt{\frac{k_{moule} \rho_{moule} C_{moule}}{\pi t}} (T_{pfusion} - T_0) = \rho_{coulé} \Delta H \frac{dS}{dt}$$

On intègre de $S = 0$ et $t = 0$ à $S = S$ et $t = t$:

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{T_{pfusion} - T_0}{\rho_{coulé} \Delta H_f} \right) \sqrt{k_{moule} \rho_{moule} C_{moule}}$$

On a $S = \frac{V}{A}$;

Après une simplification on aura la relation du temps de solidification :

$$t = \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho_c \Delta H_f}{T_m - T_0} \right)^2 \frac{1}{k_m \rho_m c_m} \right] \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

- C : coulé ;
- M : moule.

Tel que B la constante est :

$$B = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho_c \Delta H_f}{T_m - T_0} \right)^2 \frac{1}{k_m \rho_m c_m}$$

4.2 EXEMPLE

Bien que les méthodes de modélisation modernes facilitent l'optimisation de masselotage, une estimation initiale de la géométrie correcte est nécessaire. Avec des logiciels de CAO modernes, il est facile d'obtenir la zone de volume et de surface de la pièce.

Puisque on ne dispose pas d'accès à l'ensemble moderne de CAO, on se limitera de la décomposition en une série de cônes, cylindres, et d'autres entités et leurs volumes prismatiques.

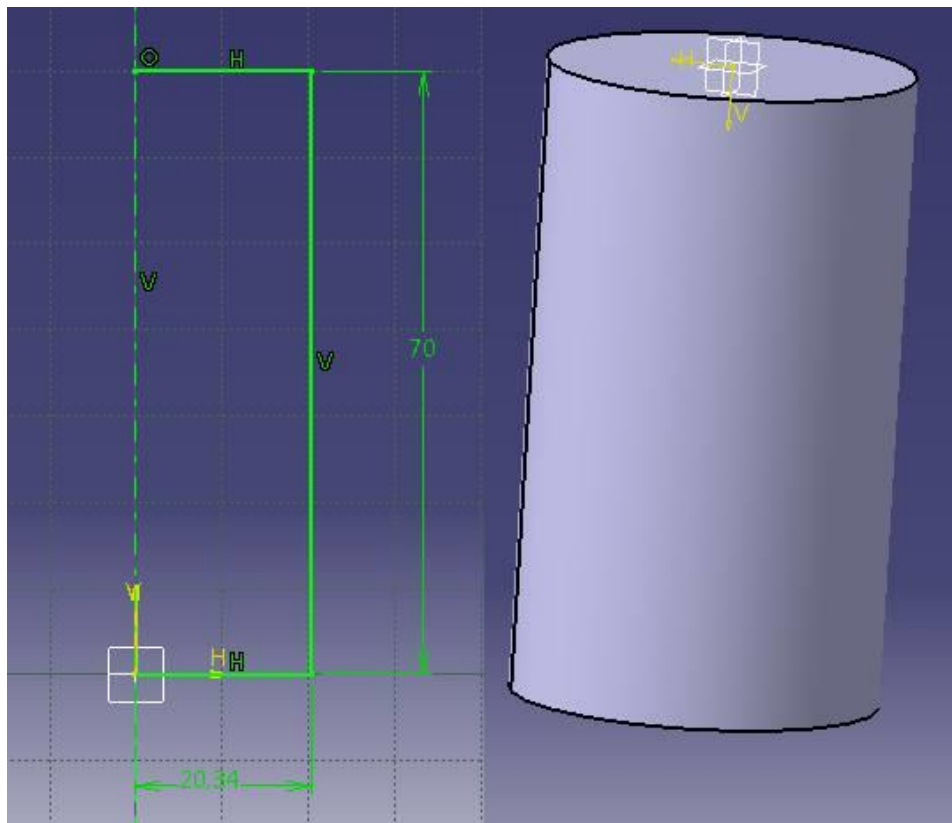


Figure 21 : Mesure d'une masselotte cylindrique sur CATIA V5

4.2.1 CALCUL DU MASSELOTTE

- SURFACE DE CYLINDRE: $S=2 \pi R h$;
- VOLUME DU CYLINDRE: $V = \pi r^2 h$;
- APPLICATION NUMERIQUE:

$$S=2 \pi R h = 2 (20.34)(70) = 8480 \text{ mm}^2 .$$

$$V = \pi R^2 h = \pi (20.34)^2(70) = 90980 \text{ mm}^3$$

Temps de solidification :

La constante du moule est donnée par : $B = 2 \text{ s / mm}$.

$$T_{\text{masselotte}} = B \left(\frac{V}{A} \right)^{1.5}$$

$$= 2 \left(\frac{29321.53}{5830.86} \right)^{1.5} = 64.92 \text{ s} = 1.08 \text{ min}$$

Tableau 5 : Temps de solidification du piston 57110FM

La référence du piston

Temps de solidification en seconde

57045 FM	91.49			
57110 FM	90	AS18	2.40	120
57110 PC	90	AS18	1.40	120
57110 ECIA	90	AS18	1.40	120

- Remarque :

La masselotte est la dernière région de liquide à se solidifier donc on aura :

$$T_{\text{masselottes solidification}} = 1.08 \text{ min} < T_{\text{solidification pièce}} = 1.32$$

4.3 L'EMPLACEMENT DU MASSELOTTE SUR LE PISTON

4.3.1 POSITIONNEMENT DU MASSELOTTE EN SE BASANT SUR SOLIDWORKS

Pour préciser l'emplacement de la masselotte, il faut d'abord déterminer les points critiques de la pièce qui se compose des points chauds qui restent liquides alors que leur voisinage devient solide. On le considère généralement le dernier à se solidifier.

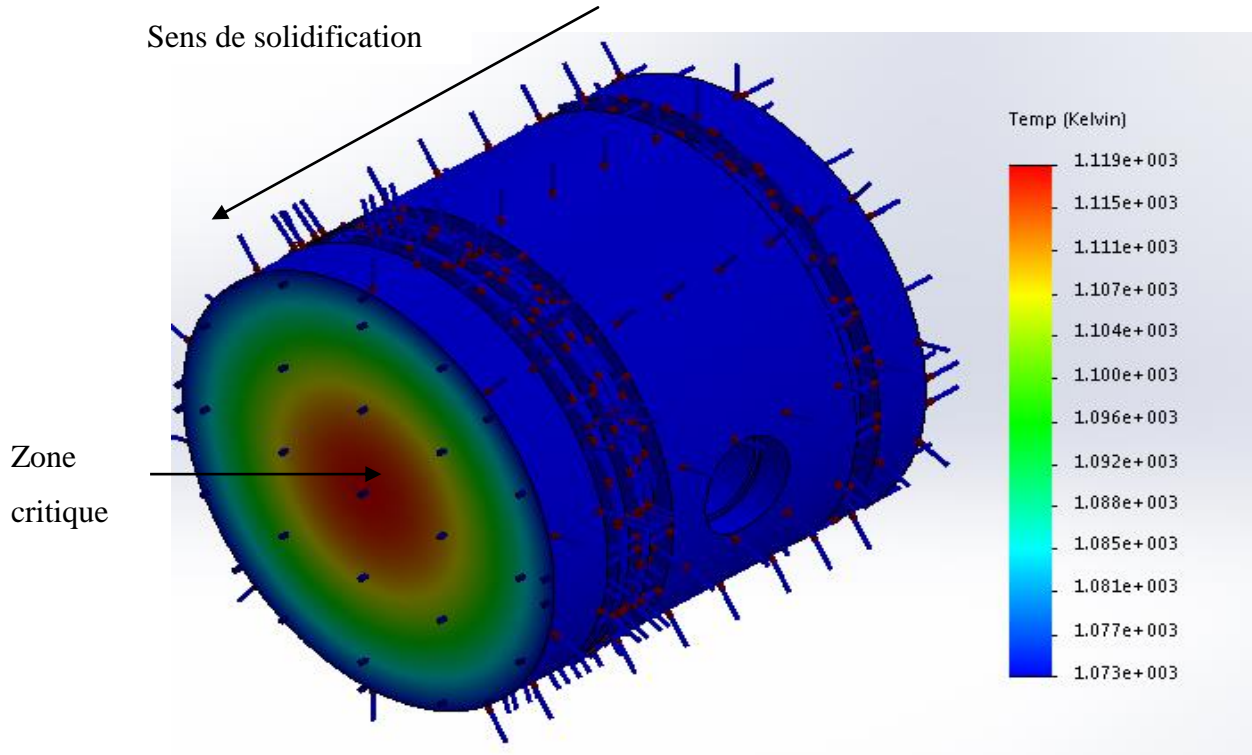


Figure 22 : Simulation thermique sur SOLIDWORKS

La solidification se fait toujours des parties fines vers les parties massives (Figure 22).

Les points critiques se trouvent essentiellement dans les parties massives qui sont en déficit de métal et doivent être masselottées.

On considère en général le point critique comme étant le dernier à se solidifier. Dans ce cas, on place la masselotte sur la surface critique du piston.

4.3.2 POSITIONNEMENT DU MASSELOTTE PAR LA DÉCOMPOSITION EN ÉLÉMENTS SIMPLE

Pour réaliser ce calcul, il faut découper la pièce en volumes simples et rechercher pour chacun d'eux le module de refroidissement.

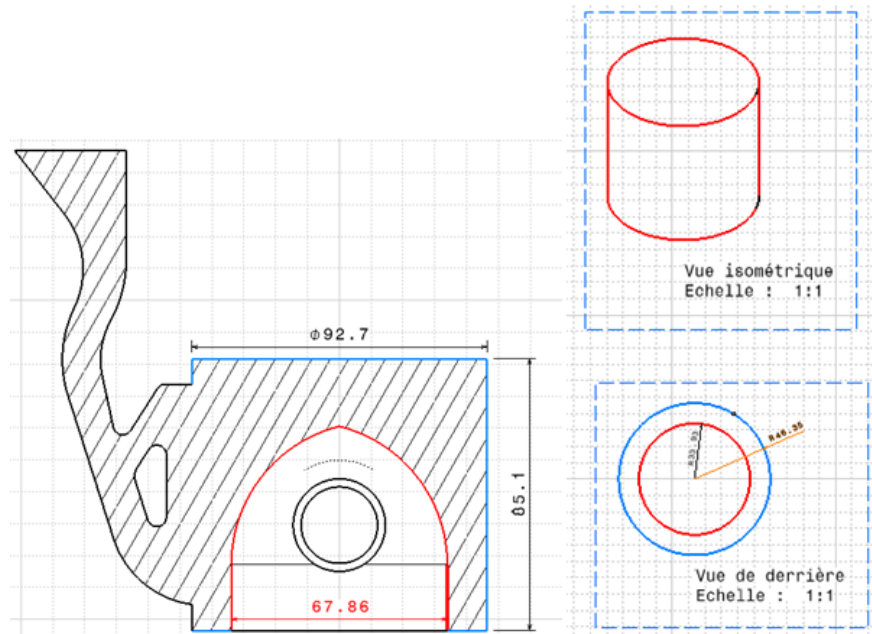


Figure 23 : Mise en page d'un piston sur CATIA V5

Le découpage réalisé fait apparaître les deux cylindres : rouge et bleu.

Calcul de module de refroidissement :

	Volume en cm ³	Surface en cm ³	Module
Cylindre en rouge	$V_1 = \pi r^2 h$ $= \pi (33.39)^2 50$ $= 180.83 \text{ cm}^3$	Surface creuse : $S_1 = 2 \pi R h + 2 \pi r h$ $= 2 \pi (46.35) 50 + 2 \pi (33.936) 50$ $= 25.22 \text{ cm}^3$	$M_1 = \frac{V_1}{S_1} = 7.17$
Cylindre en bleu	$V_2 = \pi r^2 h$ $= \pi (46.35)^2 85.1$ $= 574.35 \text{ cm}^3$	$S_2 = 2 \pi R h$ $= 2 \pi (46.35) 85.1$ $= 24.78$	$M_2 = \frac{V_2}{S_2} = 23.17$

On détermine aussi l'ordre de solidification des formes de base :

1^{ère} solidification :

$M_1 = 7.17$

2^{ème} solidification :

$M_2 = 23.17$

4.4 CONCLUSION

Plus le module de refroidissement est grand, plus la partie de la pièce considérée refroidit lentement, donc la zone en bleu qui a le plus grand module de refroidissement, est solidifiée en dernier. On placera donc la masselotte sur cette surface.

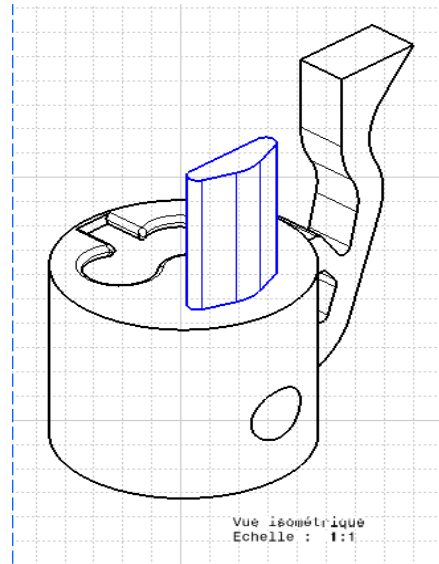


Figure 24 : L'emplacement de la masselotte

5 CONCEPTION DU MOULE

5.1 MOULAGE EN MOULE PERMANENT

5.1.1 PROBLÉMATIQUE

Le souci pour le fondeur de Floquet Monopole, de pouvoir réutiliser plusieurs fois un même moule, l'a amené à rechercher la performance de l'empreinte moulante. Lorsque l'alliage est à l'état liquide, les conditions thermiques sont très contraignantes. Il s'agit à cet effet de réussir une éjection permettant de préserver les formes et les dimensions, ce qui implique la nécessité de la recherche d'un matériau constitutif particulier du moule.

5.2 LE MATÉRIAU CONSTITUTIF DU MOULE

La SMFN utilise des moules permanents généralement fabriqués en acier qui ont des points de fusion élevés $T=1700^{\circ}\text{C}$. Ce métal est choisi en raison de leur résistance à l'érosion et à la fatigue thermique. Le moule est ouvert dès que la coulée est solidifiée.

5.3 TEMPÉRATURES À L'INTERFACE MOULE/MÉTAL

5.3.1 INTRODUCTION

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

- L'interface est composée de plusieurs milieux distincts ayant des caractéristiques propres ;
- Il se crée un interstice entre le moule et l'échantillon d'aluminium durant la solidification sous l'action du retrait linéaire (différence de densité solide/liquide) ;
- Le positionnement d'un appareil de mesure, non influent sur les résultats, exactement à l'interface est techniquement très difficile.

Il faut donc déterminer le coefficient de transfert de chaleur par une voie détournée de calcul de h à l'interface du moule et du métal.

5.4 MODÉLISATION GÉNÉRALE EN DIFFÉRENCES FINIES

5.4.1 CALCUL DES TEMPÉRATURES DANS LE MOULE

Nous sommes dans un cas de conduction simple. Dans un milieu homogène et isotrope entre deux points 1 et 2 distants de Δx sur un axe x de températures T_1 et T_2

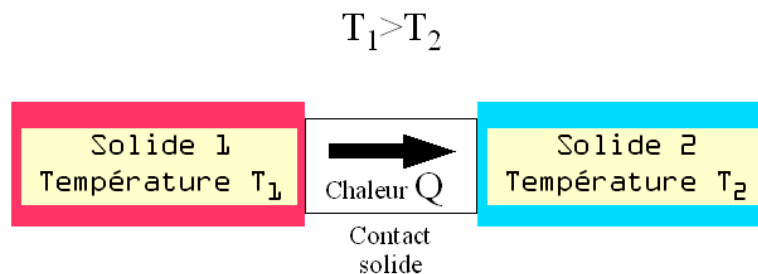


Figure 25 : Représentation schématique du transfert thermique par conduction

La puissance calorifique q (on raisonne sur l'unité de temps) transférée par conduction à travers une surface S , perpendiculaire à x s'écrit :

$$q = -kS \frac{\partial T}{\partial x}$$

où dT/dx est la limite de $(T_2 - T_1) / \Delta x$ quand $\Delta x \rightarrow 0$.

k est la conductivité thermique du matériau ($Wm^{-1} \cdot C^{-1}$).

Considérons maintenant une tranche de ce matériau, perpendiculaire à x et dont les parois sont situées à x et à $x+dx$. Son épaisseur est donc dx .

Écrivons son bilan thermique constitué de quatre termes :

- Flux entrant par la face située à x :

$$q_x = -kS \frac{\partial T}{\partial x}$$

- Flux sortant à la face située à $x+dx$:

$$q_{x+dx} = -S \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{d}{dx} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$$

Où q est l'énergie générée par unité de volume ;

- Chaleur absorbée dans le volume considéré pour élever la température ;

$$\rho C p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Où :

- c est la chaleur massique du matériau ($J.kg^{-1}K^{-1}$) ;
- p est la masse volumique ($kg.m^{-3}$) ;
- t est le temps (s).

La somme des termes conduit à :

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx = \rho C p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dans un repère tridimensionnel, on a :

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho C p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Où :

$$k \nabla(\nabla T) = \rho C p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Remarque

Afin de résoudre ce système pour les valeurs expérimentales, on utilise la méthode de différences finies. Il s'agit, lors d'une modélisation, de décomposer le système en un maillage simple.

5.5 IMPORTANCE DU MAILLAGE

La préparation d'un tel calcul commence par la description géométrique de la pièce sous la forme d'un maillage comme celui de la (figure 26). Les masselottes éventuelles doivent être incluses dans cette description. Il est important que ce maillage soit adapté aux problèmes à résoudre, hors en dehors de recommandations générales sur la densité et la forme des mailles

dans les calculs aux éléments finies. Il faut tenir compte que la solidification de la pièce dans ce moule commence par le choc thermique du métal liquide en contact avec le moule froid. La modélisation prendra comme état initial la fin du remplissage.

Les équations ont été développées par Fortin. On a le système suivant :

$$a_i T_{i-1} + b_i T_i + c_i T_{i+1} = T_i$$

Où a, b et c sont des facteurs,

- i est l'indice désignant la cellule considérée ;
- T* représente la valeur à l'instant t-At (At est l'intervalle de temps considéré, soit 0,5 secondes).

Cette équation s'écrit sous la forme d'un système matriciel. La distance de discrétisation spatiale dans le moule est de 1 millimètre.

Grâce aux valeurs des thermocouples (conditions limites), on trouve la solution à ce problème.

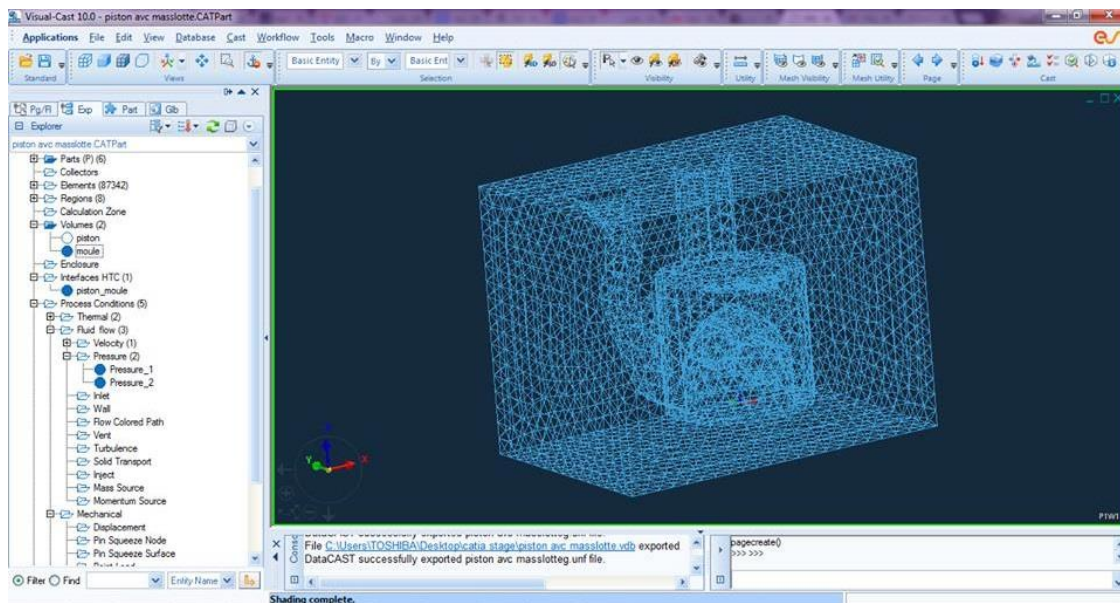


Figure 26 : Maillage du moule de piston sur PROCAST

5.6 LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DU MOULE

Lors de la phase de conception, le dimensionnement du moule est amorcé. Dans un premier temps, la modélisation géométrique des concepts est faite avec l'aide de logiciel (CAO), CATIA. Cette modélisation est développée à partir de la structure fonctionnelle, de la configuration physique ainsi que des schémas des concepts. Les technologies, les matériaux, les composants, etc. sont choisis en fonction des contraintes du projet. Des justifications suffisantes viennent

appuyer les choix de conception. Ensuite, des calculs qui ont servi au dimensionnement global de chacun des sous-systèmes. Par la suite, chacun des sous-systèmes sera repris afin de présenter leur dimensionnement détaillé.

5.6.1 LES CHAPES

Elles donnent toute la forme extérieure du piston suivant la configuration de la semelle. Dans le cas ci-dessous les chapes ne comportent que le système de remplissage et d'alimentation. Ainsi que le positionnement du noyau.

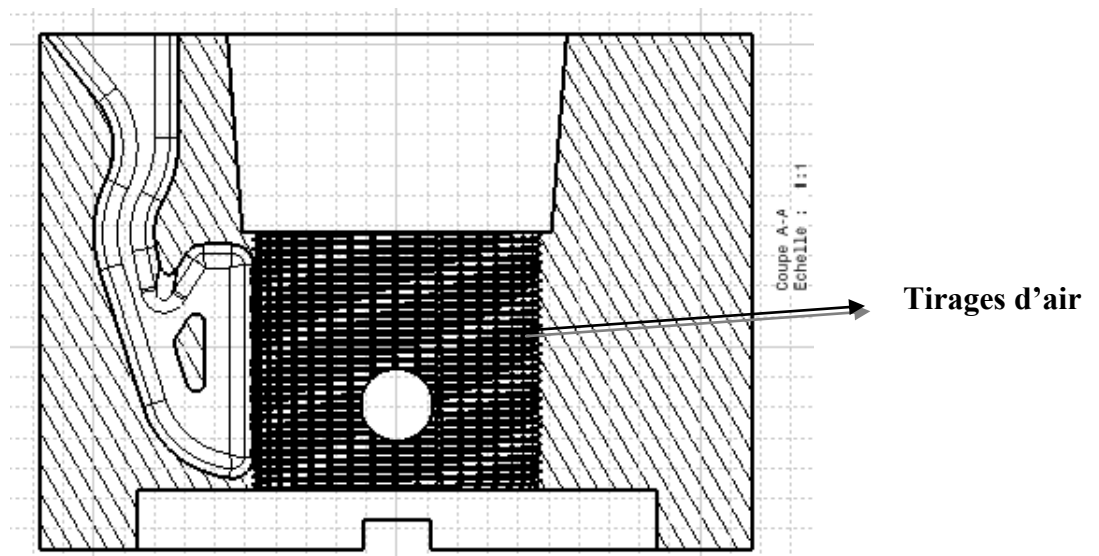


Figure 27 : Les chapes du piston 52942-450

L'évacuation de l'air dans les chapes s'effectue par des joints naturels du moule. Les tirages d'air sont constitués par des petits canaux de 0,1 à 0,2 mm de profondeur fraisés au plan de joint pour améliorer la ventilation de l'empreinte (Figure 27).

Pendant la coulée du métal en fusion, il faut assurer le centrage relatif des chapes. Dans ce cas on utilise une bague cylindrique (Figure 28) fixée par 4 goujons HFH (figure 29).

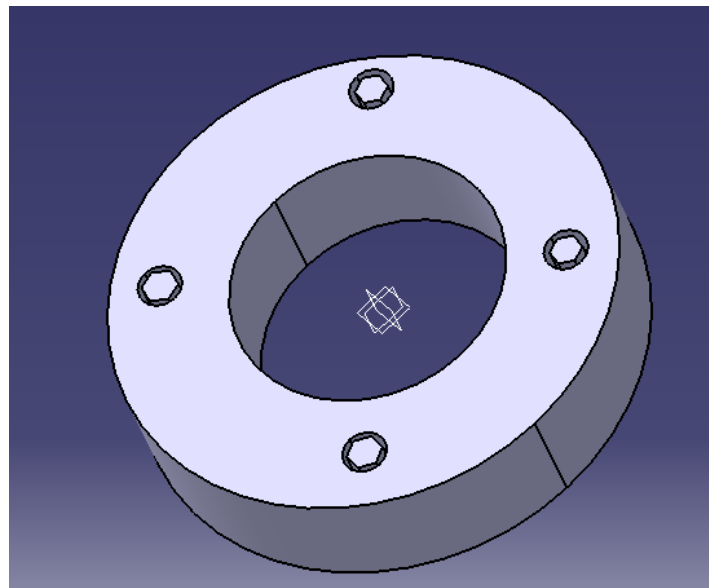


Figure 28 : Bague cylindrique

Les goujons HFH (Figure 29) utilisés sont pour une application à haute résistance, et pour des fixations mécaniques de grande qualité de corrosions.

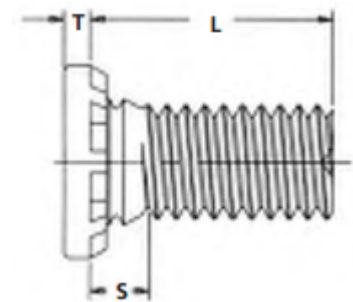


Figure 29 : Les goujons HFH

Tableau 6 : Mesure métrique de HFH

METRIQUE	Dimension du Filetage X Pas	Type			Code du Filetage	Code de Longueur "L" ±0.4 (Code de Longueur en millimètres)						Épaisseur min de Tôle	Diam. du Trou dans la Tôle +0.13	Diam du Trou Max. dans la pièce rapportée	H ±0.25	S Max.	T Max.	Dist. Min. de l'axe du Trou par rapport au bord.	
		Acier	Acier Inoxydable	Bronze (1) Phosphoreux		15	20	25	30	35	40 ¹⁵								50 ¹⁵
	M5x0.8	HFH	HFHS	HFHB	M5	15	20	25	30	35	40 ¹⁵	50 ¹⁵	1.3	5	6.5	7.8	2.7	1.14	10.7
	M6x1	HFH	HFHS	HFHB	M6	15*	20	25	30	35	40	50	1.5	6	7.5	9.4	2.8	1.27	11.5
	M8x1.25	HFH	HFHS	HFHB	M8	15	20	25	30	35	40	50	2	8	9.5	12.5	3.5	1.78	12.7
	M10x1.5	HFH	HFHS	HFHB ¹⁵	M10	15 ¹⁵	20	25	30	35	40	50	2.3	10	11.5	15.7	4.1	2.29	13.7

D'autre part, pour éviter le déplacement des chapes sous l'action de la poussée du métal, les mécanismes utilisés sont actionnés mécaniquement ou manuellement. On donne comme exemple : les crampes, étriers à came ou excentrique, pignons crémaillères et vérins pneumatiques.

5.6.2 LES BROCHES

Les broches sont les éléments moulant qui permettent l'orientation de la forme intérieure du piston, ils sont des broches de faible diamètre qui permettent de réaliser des alésages bruts.

Les broches comportent une dépouille pour faciliter le démoulage, il faut prévoir leur guidage et centrage, assurés par le corps cylindriques.

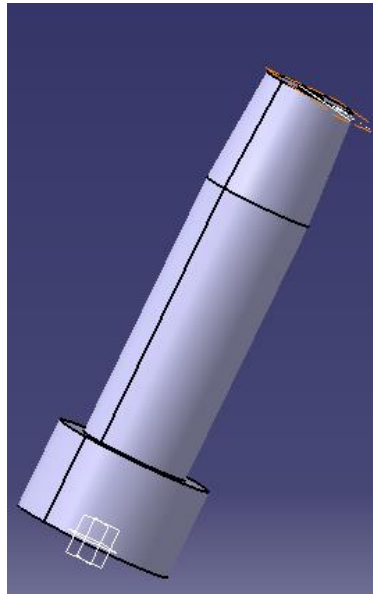


Figure 30 : Broche

On place les broches dans la cavité de la chape (Figure 31) :

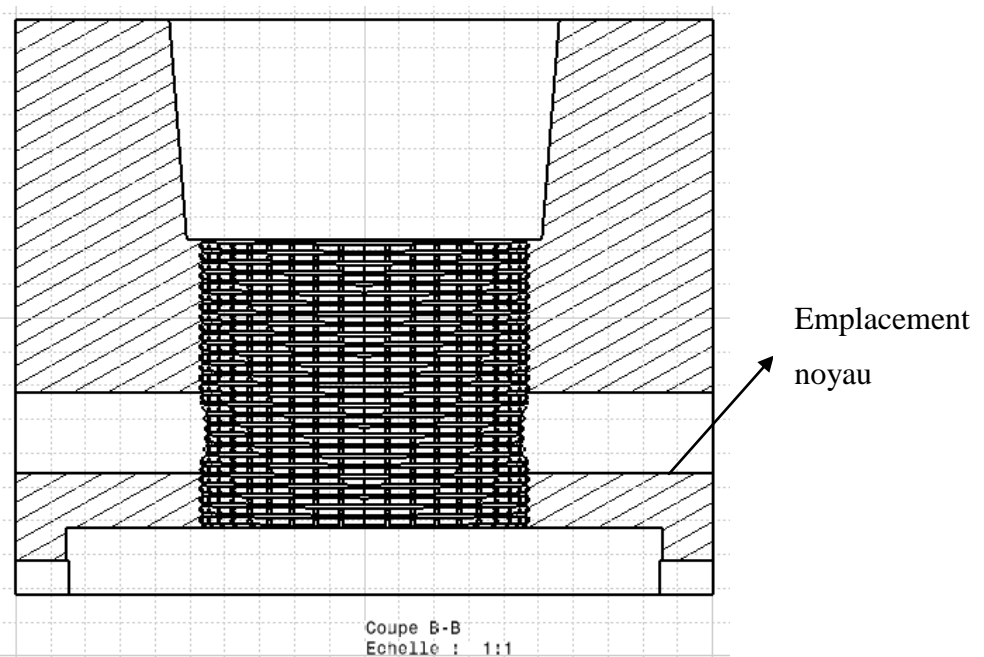


Figure 31 : L'emplacement de la broche dans la partie de la chape

5.6.3 LES NOYAUX

On place le noyau (Figure 32) dans le centre de la chape pour obtenir la forme complexe et creuse à l'intérieur du piston. Cette forme facilite l'ouverture du moule pour obtenir la pièce moulé.

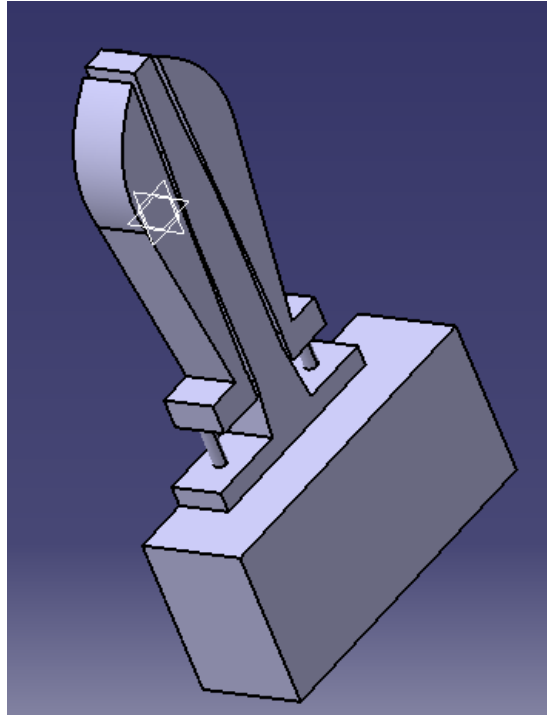


Figure 32 : Noyau donne la forme interne du piston

5.6.4 LES BROCHES SUPÉRIEURES

Ils sont des noyaux de grande longueur cylindrique. Elles assurent la venue des alésages et elles sont centrées à leurs deux extrémités (Figure 33).

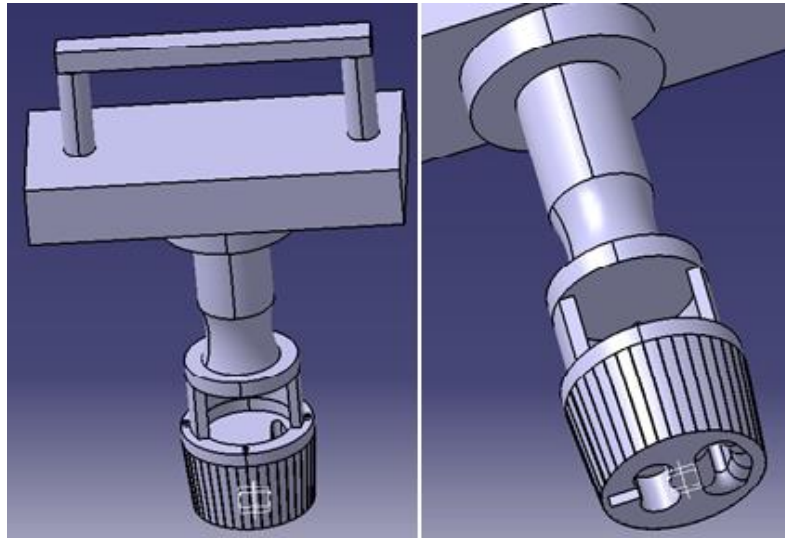


Figure 33 : Les faces de la broche

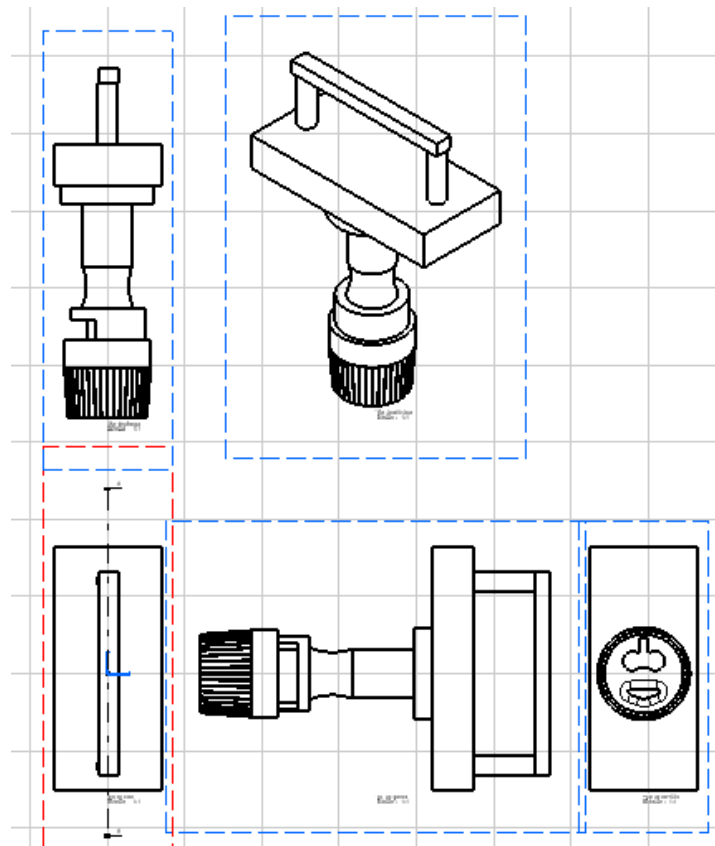


Figure 34 : Mise en plan de la broche

La broche comporte généralement deux parties essentielles :

- La zone de solidification de la masselotte ;
- La forme du trèfle sur la tête de piston (Figure 33).

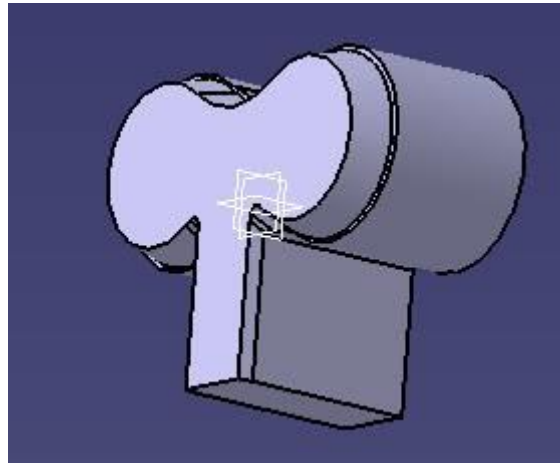


Figure 35 : Forme du piston

5.6.5 SYSTÈME D'ALIMENTATION

Dans le moule, la coulée se fait sur le coté dit une coulée latérale (Figure 36). Elle s'adresse aux pistons de hauteur moyenne et se caractérise par la favorisation d'une solidification correcte du métal. La pièce après l'arrêt de la coulée, continue à être approvisionnée par l'alliage liquide par sa descente grâce à sa gravité.

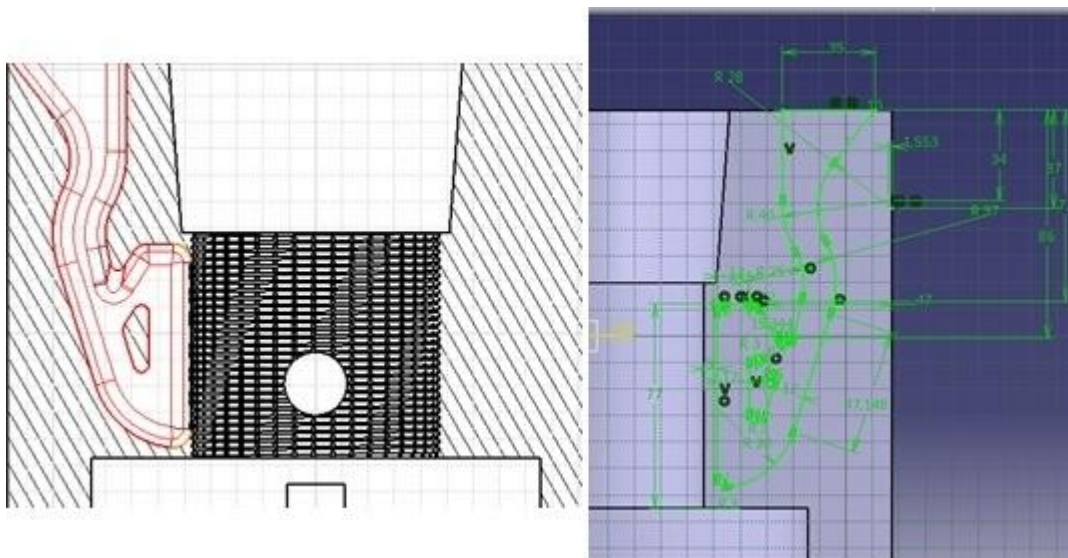


Figure 36 : Système d'alimentation

5.6.6 DESCENTE DE COULÉE

Les dimensions des descentes de coulée sont en fonction :

- Du volume de la pièce et la masselotte ;
- Du mode de coulée ;
- De la nature de l'alliage ;
- De la hauteur nécessaire de la descente de la coulée ;

- De la masse de la pièce.

Le métal pendant sa descente est ralenti par la forme du système de coulée.

5.6.7 VOLUME DE L'EMPREINTE

Le volume de métal coulé doit remplir toutes les formes prévues dans le moule. Il faut tenir compte également du retrait volumique lié au refroidissement du métal.

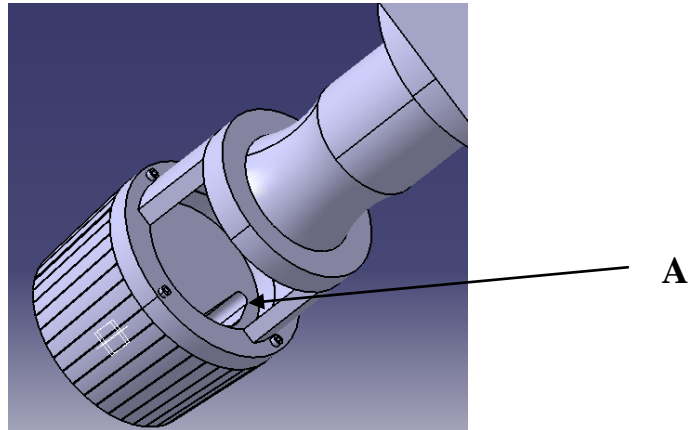


Figure 37 : Broche

Dans ce cas la, on éprouve que le volume est atteint par la vérification à œil nu du remplissage complet de masselotte (A).

5.6.8 TEMPS DE REMPLISSAGE

Le calcul du temps de remplissage ne donne pas une information complète sur le phénomène de remplissage. Chaque pièce y est considérée comme une boîte noire d'un certain volume. On ne sait rien de ce que sera réellement l'avancement de la surface libre dans le volume de la pièce.

5.6.9 ASSEMBLAGE DU MOULE

La figure suivante montre l'assemblage complet de la machine. Les principales composantes y sont identifiées.

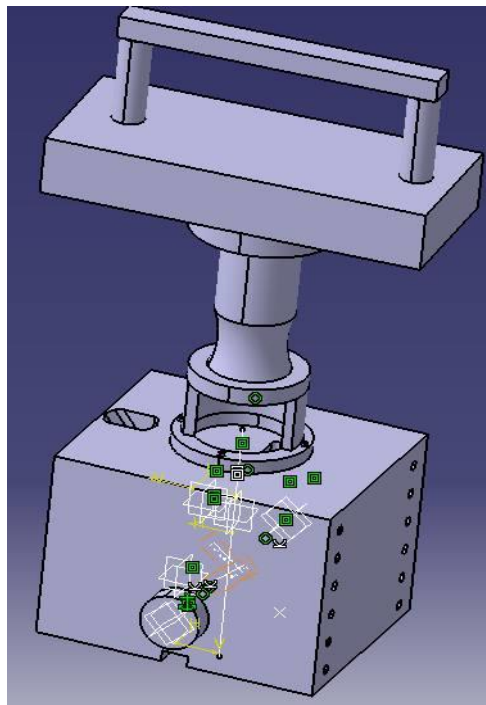


Figure 38 : Assemblage du moule sur CATIA

Les chapes sont solidement assemblées pendant la coulée du métal afin d'éviter leur séparation. Le métal liquide remplit les cavités du moule sous l'effet de son propre poids (par gravité). Les masselottes, le trou de coulée se situent dans le plan de joint avec des formes permettant le démoulage du piston.

6 ANALYSE SUR PROCAST

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

- L'interface est composée de plusieurs milieux distincts ayant des caractéristiques propres ;
- Il se crée un interstice entre le moule et l'échantillon d'aluminium durant la solidification sous l'action du retrait linéaire (différence de densité solide/liquide).

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

6.1 INTRODUCTION

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

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

- De simuler le remplissage du moule ;

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

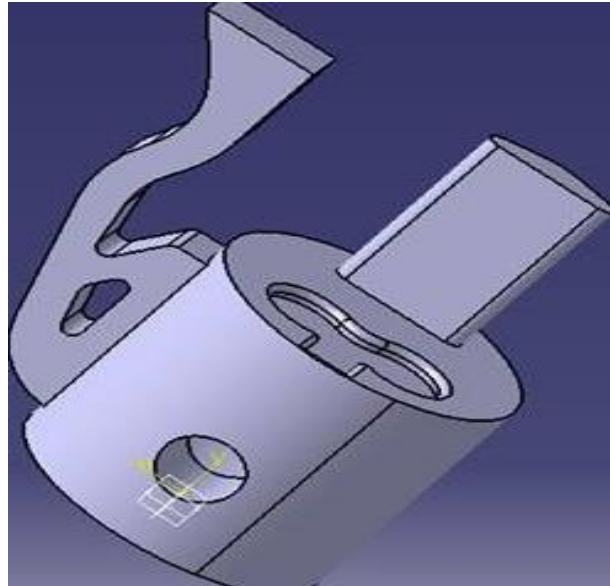


Figure 39 : Piston sous CATIA

6.2 LES ÉTAPES DE L'UTILISATION DE PROCAST

- **La géométrie :**

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

- **La mise en donnée :**

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

- **Exécution du solveur :**

Déroulement du calcul.

- **Résultats :**

Analyse

6.2.1 GÉOMÉTRIE

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

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

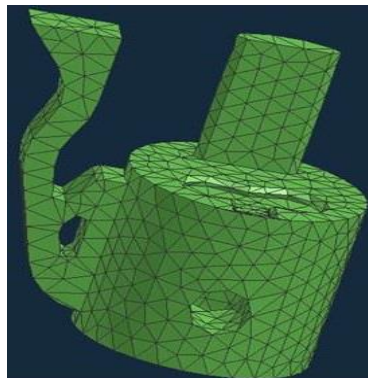


Figure 40 : Les attributs du procédé de fonderie

- **Limitation :**

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

6.3 LA MISE EN DONNÉE

6.3.1 CHOIX DU PROCÉDÉ

Choix du type de moulage :

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

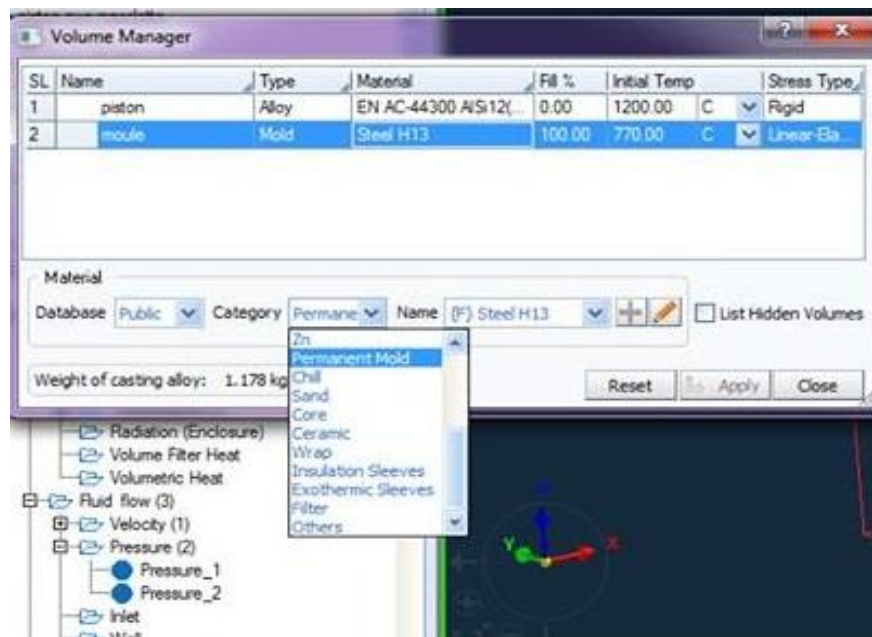


Figure 41 : Type de moulage

6.3.2 CHOIX DES MATÉRIAUX

- Pour la pièce à couler Alliage d'Aluminium AS-18 ;
- Pour le moule Acier.

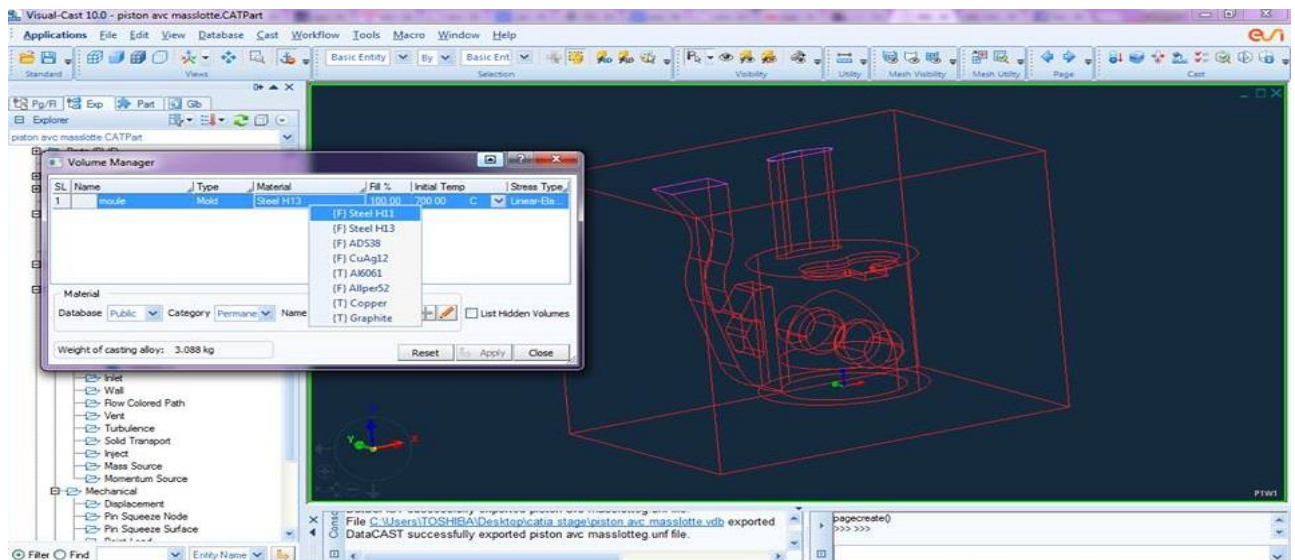


Figure 42 : Le jet de coulée

6.3.3 DÉFINITION DES CONDITIONS D'ENTRÉE DU MÉTAL

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

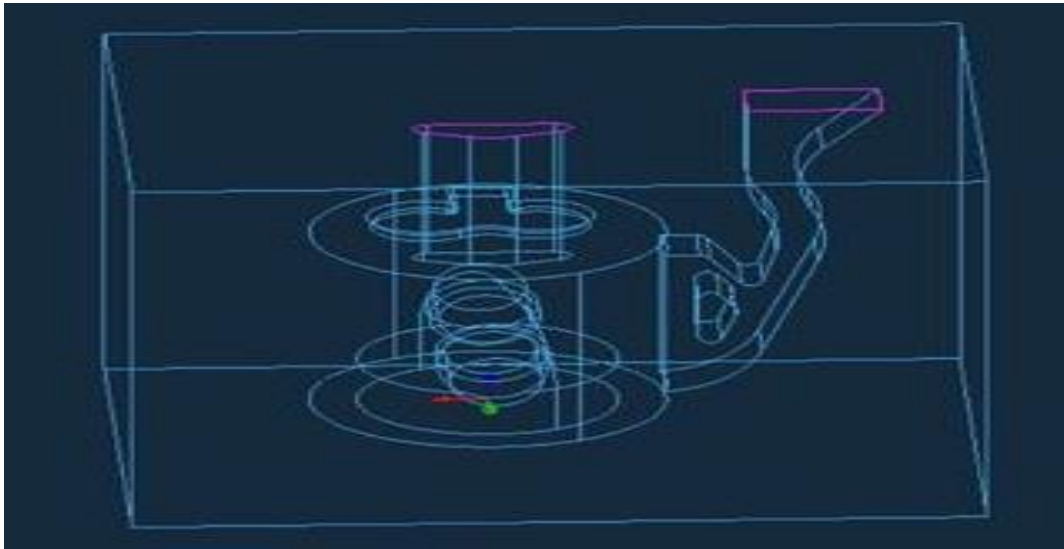


Figure 43 : Volume d'entrée de forme parallélépipédique

6.3.4 DÉFINITION DES CONDITIONS INITIALES DES CALCULS

la température initiale du métal (température du jet ou température initiale de l'empreinte en solidification seule)

la valeur de la pression (Pa) métallo-statique appliquée sur le volume d'entrée (uniquement en procédé gravité)

la température initiale du moule

Conditions initiales	
Conditions du procédé	
Température initiale (°C)	720
Valeur de la pression (Pa)	2000
Perméabilité du moule	120
Température initiale du moule (°C)	20

Figure 44 : Des conditions initiales des calculs

REMARQUE

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

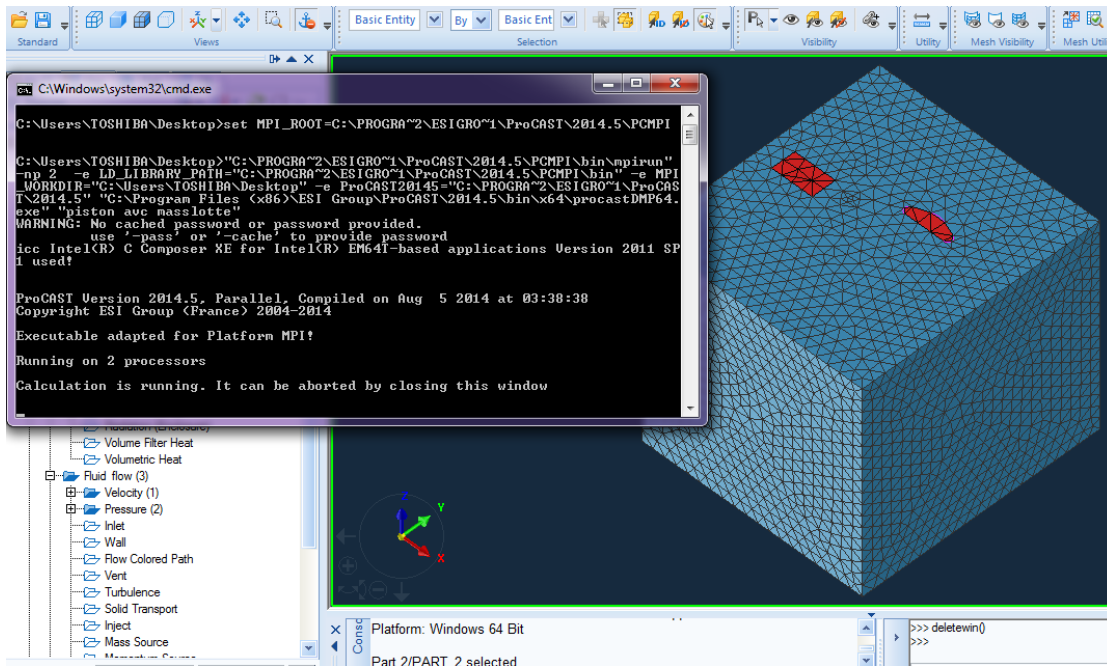


Figure 45 : Message d'erreur

CONCLUSION GENERALE

Dans notre stage de projet de fin d'études, on a eu l'opportunité de travailler sur un élément du moteur d'automobile. Le travail réalisé s'est avéré très enrichissant pour notre expérience professionnelle aussi bien en ce qui concerne le domaine technique que l'aspect humain. Il nous a permis d'avoir une vision détaillée sur la conception et la fabrication des pistons.

Notre projet de fin d'études consiste à étudier les différents défauts de fonderie des pièces en aluminium ainsi que l'étude, la conception et l'analyse d'un moule permanent d'un piston.

Au terme de ce travail, nous avons pu faire une analyse détaillée du problème, d'établir un cahier des charges fonctionnel et de le valider avec les équipes technique de Floquet Monopole.

Cependant, la durée de ce stage s'avère très courte par rapport à la réalisation d'un projet telle que l'étude et la conception d'un moule permanent. En effet la partie conception sur le logiciel PROCAST nous a pris beaucoup de temps. Ainsi, savoir organiser son projet et gérer son temps est un moyen efficace pour mener à succès un projet en génie mécanique.

Nous espérons compléter et améliorer notre projet d'une manière très professionnelle dans nos activités futures.

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

Pour conclure, ce stage nous a offert la possibilité de mettre en pratique les connaissances acquises lors de nos études et l'opportunité de nous initier dans le monde professionnel. Aussi le travail en équipe que nous venons d'accomplir s'avère le chemin le plus efficace, le plus enrichissant et le plus fiable pour la réussite et la promotion de toute démarche d'étude et de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) Professeur **A. EL BARKANY**, Cours des procédés de fabrication, LST CAM, Faculté des Sciences et Techniques de Fès, 2015.
- 2) R.D. PEHLKE, "Heat Flow Analyses for Solidification and Cooling State of the Art», Modeling of Casting and Welding Processes IV, Mineral & Material Society, 1988, pp.3 à 13.
- 3) FEDERIC MICHEL, Mémoire présenté à l'université du Québec à Chicoutimi comme Exigence partielle de la maîtrise en ingénierie.
- 4) Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, J. E. Hatch (editor), ASM, Ohio, U.S.A., 1984.
- 5) D. M. STEFANESCU, G. UPADHYA et D. BANDYOPADHYAY, "Heat Transfer - Solidification Kinetics Modeling of solidification of Castings", Metallurgical Transactions A, vole 21 A, 1990, pp. 997 à 1005.
- 6) ZUZANAK, "Contribution to the Metal Mold Interfacial Heat Transfer", Metallurgical Trans. B, vol. 22B, 1991, pp. 729.
- 7) E. GOZLAN at M. Bamberger, "Heat Flow and Solidification in a Metal Mould", Z. METALLKDE, VOL 78, 1987, pp. 677 à 682.
- 8) Tutorials PROCAST / Solid works / CATIA.
- 9) D. Morvan, Cours ESF de Thermique, 1991.
- 10) MICHEL COLOMBIE, Matériaux métalliques 2ème édition.