

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



**Mémoire de projet de fin d'études**

Pour l'obtention du diplôme

**D'Ingénieur d'Etat en Génie des Matériaux**

**Thème**

Etude de moulage et réalisation des  
mâchoires de frein destinées aux véhicules  
industriels

Présenté par : CHELAGHMA Nouredine et OUADIA Ouail Houssef Eddine

Présenté et soutenu publiquement le 18/07/2021

**Composition du jury**

Président	M. F. HELLAL	Pr	ENP
Encadreur	M. CHITROUB Mohamed	Pr	ENP
Co-Encadreur	M. AISSOU Kamel	Ing	SNVI
Examineur	M. A. DAIMELLAH	Dr	ENP
Examineur	M. M. KASSER	Dr	ENP

ENP 2021



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie



**Mémoire de projet de fin d'études**

**Pour l'obtention du diplôme**

**D'Ingénieur d'Etat en Génie des Matériaux**

**Thème**

Etude de moulage et réalisation des  
mâchoires de frein destinées aux véhicules  
industriels

Présenté par : CHELAGHMA Nouredine et OUADIA Ouail Houssein Eddine

Présenté et soutenu publiquement le 18/07/2021

**Composition du jury**

Président	M. F. HELLAL	Pr	ENP
Encadreur	M. CHITROUB Mohamed	Pr	ENP
Co-Encadreur	M. AISSOU Kamel	Ing	SNVI
Examineur	M. A. DAIMELLAH	Dr	ENP
Examineur	M. M. KASSER	Dr	ENP

## الملخص

السابكة هي إحدى عمليات تصنيع القطع الميكانيكية، ولها مجال واسع من الاستخدام مثل صناعة السيارات والطيران ... إلخ. تعتبر وسيلة اقتصادية للحصول على قطع ميكانيكية ذات أشكال معقدة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تصنيع سلسلة كبيرة من فك المكبح المخصصة للمركبات الصناعية عن طريق عملية الصب بالرمل، والسبائك المستخدمة في هذه العملية هي الصلب FGS 38-15 وينقسم هذا العمل إلى أربع مراحل: الدراسة الابتدائية، المحاكاة بواسطة Procast و Inspire Cast و مرحلة الانجاز، وأخيراً مراقبة جودة وخصائص القطع المصنعة.

**الكلمات المفتاحية:** السابكة، فك المكبح، الصب بالرمل، الصلب، المحاكاة، التوصيف.

## Abstract

Foundry is one of the processes of manufacturing mechanical pieces, it has a wide field of use such as the automotive industry, aviation ... etc. It is considered as an economical way of obtaining parts with complex shapes.

The main objective of this work is the manufacture of a large series of brake shoes for industrial vehicles by the process of sand casting, the alloy used is the cast iron FGS 38-15, this work is divided into four stages: pre-study, simulation by Procast and Inspire Cast, realization and finally the control and characterization of manufactured pieces.

**Key words:** foundry, brake shoe, sand casting, cast iron, simulation, characterization.

## Résumé

La fonderie est l'une des processus de fabrication des pièces mécaniques, elle à un large domaine d'utilisation tel que l'industrie d'automobile, d'aviation...etc. Elle est considérée comme un moyen économique d'obtention des pièces avec des formes complexes.

L'objectif principal de ce travail est la fabrication d'une série importante des mâchoires de frein destiné aux véhicules industriels par le procédé de moulage en sable, l'alliage utilisé est la fonte FGS 38-15, ce travail est divisé en quatre étapes : pré-étude, simulation par Procast et Inspire Cast, réalisation et finalement le contrôle et caractérisation des pièces fabriqués.

**Mots clés :** la fonderie, mâchoire de frein, moulage en sable, la fonte, simulation, caractérisation.

*Je dédie ce travail à :*

*A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de  
l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure  
bonne santé et longue vie.*

*A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents  
Et leur soutien moral,*

*A mon cher frère pour son appui et son encouragement,*

*A toute ma famille, et mes amis Haroune, Abdeldjalil  
.Sofiane et MOncef, A mon binôme Housseem eddine et toute la*

*Famille OUADEA.*

*Et à tous ceux qui ont contribué*

*De près ou de loin pour que ce projet soit possible*

*Je vous dis merci.*

*Noureddine*

*Je dédie ce travail à :*

*A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de  
l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure  
bonne santé et longue vie.*

*A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents  
Et leur soutien moral,  
A toute ma famille, et mes amis Haroune, Abdeldjalil,  
Moncef et Hamza, A mon binôme Nouredine et toute la famille*

*CHELAGMA.*

*Et à tous ceux qui ont contribué  
De près ou de loin pour que ce projet soit possible  
Je vous dis merci.*

*Houssein*

## *Remerciements*

*Nous remercions Dieu le tout puissant pour nous avoir données la santé, la force et la volonté afin d'arrivé à faire ce modeste travail.*

*Les travaux de recherche de cette mémoire ont été menés au niveau du Fonderie de Rouïba que nous remercions pour nous avoir donné la chance de mettre un pas dans le monde de l'industrie*

*Ainsi que de compléter notre formation d'ingénieur.*

*Nous exprimons notre gratitude et notre reconnaissance*

*À nos promoteurs Pr. Chitroub Mohamed*

*Pour leur patience, leur encadrement, qui nous ont permis de mener à bien*

*Ce projet de fin d'étude.*

*Nous adressons aussi nos remerciements à toutes personnes qui nous ont aidées au niveau de Fonderie de Rouïba*

*À l'égard de l'ensemble des membres du jury : Pr. F. HELLAL*

*Dr A. DAMELLAH et Dr. M. KASSER*

*Zui ont accepté de porter un regard critique sur ce*

*Projet de mémoire de fin d'études.*

*Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos familles pour leur soutien et leurs encouragements*

*Dans la poursuite*

*Et la réalisation de ce travail.*

# Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Symboles

Introduction générale.....13

## Partie 1 : théorique

### Chapitre 1 : Notions de base sur la fonderie

I.	Notions de base sur la fonderie.....	17
I.1	Introduction.....	17
I.2	Généralités sur les fontes .....	17
I.2.1	Diagrammes de phases fer – carbone .....	18
I.2.2	Les structures des fontes .....	19
I.2.3	Les types des fontes .....	19
I.2.4	Les Fontes grises.....	21
I.3	Le procédé de fabrication des moules.....	24
I.3.1	Moulage en sable silico-argileux à vert.....	25
I.4	Les procédés de fabrication des noyaux.....	26
I.4.1	Procédé silicate-CO <sub>2</sub> .....	26
I.4.2	Procédé Croning .....	27
I.5	Notion de série .....	27
I.6	Conclusion .....	28
II.	Phénomènes liées à la fabrication des pièces moulées.....	29
II.1	Introduction.....	29
II.2	Phénomènes métallurgiques.....	29
II.2.1	Retrait.....	29
II.2.2	Solidification .....	31
II.2.3	Notions de germination .....	32
II.3	Phénomènes hydrauliques .....	35
II.3.1	Équations de Bernoulli.....	36
II.3.2	Coulée faibles vitesses.....	36
II.3.3	Écoulement en milieu poreux.....	37
II.4	Phénomènes thermiques .....	38
II.4.1	Transfert de chaleur au travers des moules .....	38

II.4.2	Effets volumiques de la solidification sur la thermique .....	38
II.5	Conclusion .....	40
III.	Etude de moulage .....	43
III.1	Introduction.....	43
III.2	La fonction de la mâchoire de frein et ses conditions d'utilisation.....	43
III.2.1	Mâchoire de frein .....	43
III.2.2	Conditions d'utilisation .....	44
III.2.3	Choix de la nuance de fonte .....	46
III.2.4	Le choix de procédé de fabrication.....	47
III.2.5	Encombrement des pièces.....	49
III.2.6	Aspects économiques .....	49
III.3	Conception .....	49
III.3.1	Dessin de la pièce brute (Définition géométrique de la pièce de fonderie).....	50
III.4	La simulation numérique en fonderie .....	52
III.4.1	Les grandes étapes de la simulation par Procast et Inspire Cast .....	53
III.5	Les résultats.....	56
III.5.1	Le remplissage et refroidissement.....	57
III.5.2	Les défauts indiqués dans la simulation .....	58
III.5.3	Autre défauts courantes .....	62
III.5.4	Optimisation des défauts.....	63
III.5.5	Les résultats de simulation après l'optimisation des défauts .....	68
III.6	Conclusion .....	70
IV.	Réalisation des pièces.....	72
IV.1	Introduction.....	72
IV.2	Préparation de Plaques modèle .....	72
IV.3	Préparation de sable de moulage.....	73
IV.4	Noyautage .....	73
IV.5	Moulage .....	74
IV.6	FUSION .....	75
IV.7	Préparation du métal.....	75
IV.8	Poches de correction .....	76
IV.9	La coulée de la pièce.....	77
IV.10	Parachèvement.....	77
IV.10.1	Refroidissement et Décochage .....	77
IV.10.2	Grenailage.....	78
IV.10.3	Ebarbage.....	79
IV.10.4	Meulage.....	79
IV.11	Traitement thermique .....	80

IV.12	Peinture .....	81
IV.13	Conclusion .....	82
V.	Contrôles et caractérisation .....	84
V.1	Introduction.....	84
V.2	Caractérisation du sable de moulage .....	84
V.2.1	Aptitude au serrage .....	85
V.2.2	Compression .....	86
V.2.3	Cisaillement .....	86
V.2.4	Perméabilité .....	87
V.2.5	Humidité.....	87
V.2.6	Analyse granulométrique (indice de finesse AFS) : .....	88
V.2.7	Détermination des taux de matières volatiles et d'argile totale .....	90
V.3	Contrôles destructifs des pièces .....	92
V.3.1	Contrôle d'aspect interne de la pièce .....	92
V.3.2	Caractéristiques mécaniques.....	93
V.3.3	Composition chimique.....	102
V.4	Contrôle non-destructive des pièces .....	106
V.4.1	Contrôle d'aspect .....	106
V.4.2	Contrôle de géométrie.....	106
V.4.3	Contrôles d'aspect interne par ultrasons.....	107
V.5	Conclusion .....	107
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>108</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>110</b>
	<b>Annexe.....</b>	<b>111</b>

# Liste des tableaux

Tableau I-1 : composition chimiques des fontes FGL .....	21
Tableau I-2 : Principales caractéristiques des nuances de fontes à graphite lamellaire [4] .....	22
Tableau I-3 : composition chimiques des FGS .....	23
Tableau I-4 : Principales caractéristiques des nuances de fontes à graphite sphéroïdal [4] .....	24
Tableau I-5 : notion de série .....	27
Tableau III-1 condition d'utilisation des machoires de frein .....	45
Tableau III-2 composition chimique de FGS 38-15 .....	46
Tableau III-3 les caractéristiques de la FGS 38-15 .....	46
Tableau III-4 aide au choix des procédés de fabrication des fontes [4] .....	48
Tableau III-5 : Les dimensions des chassis .....	49
Tableau III-6 : Les masselottes de référence .....	65
Tableau V-1 : Caractéristiques du sable de moulage .....	85
Tableau V-2 : les résultats de caractérisation de six échantillons de sable de moulage .....	88
Tableau V-3 : la taille des grains de sable .....	89
Tableau V-4 : les résultats obtenus par l'essai Brinell .....	94
Tableau V-5 : les résultats de l'essai de traction .....	96
Tableau V-6 : résultats de l'essai de résilience .....	97
Tableau V-7 : la taille et la forme de graphite .....	100
Tableau V-8 : les types de matrice dans la fonte 38-15 .....	101
Tableau V-9 : la composition chimique de la fonte obtenue par la spectroscopie .....	103

# Liste des figures

Figure I.1 Diagramme Fer- Carbone .....	18
Figure I.2 Synoptique des diverses possibilités des phases et structure .....	20
Figure II.1 : schéma des différentes phases de retrait.....	30
Figure II.2 : principaux modes de solidification des fontes [4] .....	32
Figure II.3 : (a) Représentation schématique de la germination d'un solide sur un substrat et (b) évolution de la fonction $f(\theta)$ en fonction de l'angle $\theta$ .....	35
Figure II.4 : Contributions énergétiques en fonction du rayon du germe[3] .....	35
Figure III.1 : système de freinage a tambour .....	44
Figure III.2 : Esquisse 2D de la pièce.....	50
Figure III.3 le dissen 3D de la pièce avec Solidwork.....	51
Figure III.4 le dessin 3D de la grappe avec Solidworks .....	52
Figure III.5 : le degré de raffinement [8].....	53
Figure III.6 choix du maillage surfacique par Procast .....	54
Figure III.7 : degré de raffinement de maillage tétraédrique .....	54
Figure III.8 : définition de la direction de coulé par Procast .....	55
Figure III.9 : définition géométrique du châssis.....	55
Figure III.10 choix de la nuance de la fonte et les sables avec les conditions initiales.....	56
Figure III.11 : définition d'entonnoir de coulé par Inspire Cast .....	56
Figure III.12 : Simulation de remplissage et refroidissement par Procast .....	57
Figure III.13 : Prédiction d'un défaut de porosité par Inspire Cast .....	58
Figure III.14 : Prédiction d'un défaut de microporosité par Inspire Cast .....	59
Figure III.15 : Prédiction d'un défaut de reprise par Inspire Cast .....	59
Figure III.16 : Prédiction d'un défaut de soufflure par Inspire Cast .....	60
Figure III.17 : prédiction d'un défaut d'érosion par Inspire Cast .....	61
Figure III.18 : les caractéristiques des endroits qui contient le défaut de porosité .....	64
Figure III.19 : dimensions des masselottes par Inspire Cast .....	65
Figure III.20 : dessin 3D de la grappe après les changements .....	67
Figure III.21 : simulation de remplissage et refroidissement de grappe avec masselotte .....	68
Figure III.22 : module solide de la grappe avec masselotte par Procast .....	69
Figure III.23 : prédiction de porosité par Procast .....	69
Figure III.24 : évacuation des gaz par Procast.....	70
Figure IV.1 les plaques modèles .....	72
Figure IV.2 : boîte à noyau croning Chalco .....	73
Figure IV.3 : noyau croning.....	74
Figure IV.4 : machine de moulage .....	74
Figure IV.5 : fours de fusion et maintien à moyennes fréquences .....	76
Figure IV.6 : pièces sortant de la machine de décochage.....	78
Figure IV.7 : grenailleuse a tapis métallique.....	78
Figure IV.8 : coupe des masselottes par chalumeau .....	79
Figure IV.9 : four pousse de traitement thermique .....	80
Figure IV.10 : cycle de traitement thermique de ferritisation de la FGS 38-15.....	80
Figure IV.11 : Machine de peinture .....	81
Figure IV.12 : La pièce finale.....	81
Figure V.1 : la machine qui mesure l'aptitude de serrage .....	85

Figure V.2 : dispositif polyvalent pour les aisées de cisaillement et compression du sable .....	86
Figure V.3 : Machine de mesure de la perméabilité.....	87
Figure V.4 : dispositif de tamisage avec des tamis de différente taille .....	89
Figure V.5 : Histogramme de refus en fonction de numéro des tamis .....	90
Figure V.6 : dispositif de mesur du taux d'argile.....	91
Figure V.7 : Coup d'une pièce représente un défaut de retassure .....	93
Figure V.8 : Appaillage de mesure de dureté.....	94
Figure V.9 : appareille de l'essai de traction .....	95
Figure V.10 : les courbes de l'essai traction.....	96
Figure V.11 : l'essai de résilience.....	97
Figure V.12 : Machine de polissage des échantillons pour examens métallographiques. ....	98
Figure V.13 : Microscope optique. ....	99
Figure V.14 : structure de la FGS 38-15. ....	99
Figure V.15 : la microstructure de la fonte 38-15 après l'attaque chimique .....	101
Figure V.16 : spectroscopie d'émission optique .....	102
Figure V.17 : Leco CS 200 « carbon suflur determinator » .....	105
Figure V.18 : Machine de contrôle dimensionnelle 3D de la pièce.....	106
Figure V.19 Contrôle de structure de la pièce par ultrasons .....	107

# Liste des abréviations et symboles

DAO : Dessin Assisté par Ordinateur.

CAO : Conception 3D Assistée par Ordinateur.

SNVI : l'Entreprise Nationale des Véhicules Industriels.

EPE : Entreprise Publique Economique.

$R_e$  : Limite apparente d'élasticité.

AD : Allongement élastique + allongement plastique réparti.

$R_m$ : Résistance à la traction.

A % : Allongement à la rupture.

E : Module de Young.

$\Delta G_m^{l-s}$ : La force motrice de transformation de phase liquide  $\rightarrow$  solide.

$\Delta T$  : La surfusion.

$\Delta H_f$  : L'enthalpie de fusion molaire.

$\Delta G^*$  : L'énergie critique de germiation.

$r^*$ : rayon critique.

I : Vitesse de germination.

$V_s$ : Le volume de la calotte.

$A_{sl}$ : L'aire de la surface entre solide et liquide.

$A_{ms}$  : L'aire du substrat.

$\rho$  : La masse volumique.

g : L'accélération de la pesanteur.

P: La pression.

Re :Le nombre de Reynolds.

K : Perméabilité.

$f_s$ : La fraction solide.

d : Diamètre des canaux de circulation.

$C_p$ : Capacité calorifique massique.

$\lambda$  : Conductivité thermique.

a : Diffusivité thermique

s(t): Position du front de solidification à l'instant t.

$T_F$  : Température de fusion.

# Introduction générale

A notre époque, nous vivons un grand développement de l'industrie, où les machines sont présentées dans tous les aspects de notre vie, et lorsque on parle de l'industrie on doit mentionner la méthode qui était utilisée dans la fabrication des pièces à travers les âges, c'est la fonderie.

La fonderie est l'une des techniques de mise en forme des métaux. Elle consiste à fondre puis à couler un métal ou un alliage dans l'empreinte d'un moule, reproduisant à la fois les formes extérieures et intérieures d'une pièce donnée. C'est un procédé de fabrication précis (formes et dimensions), le plus direct entre la conception d'une pièce et son utilisation. Ce procédé consiste, d'une part, à fabriquer un moule à partir du dessin d'une pièce et d'autre part, à élaborer un alliage correspondant à la destination de celle-ci.

La fonderie est l'un des plus anciens métiers de l'homme et est connue depuis l'Antiquité. L'évolution de la coulée des métaux, qui remonte à au moins 3000 avant J.C, revêt une grande importance technique et culturelle. La coulée est une opération fondamentale dans la mise en forme des métaux.

De nombreux objets de l'histoire de la culture n'auraient pas vu le jour sans une très ancienne maîtrise du moulage comme les outils, les armes, les cloches...etc. En Chine, et dès avant le début de notre ère, la fonderie avait déjà atteint un stade de développement bien en avance sur celui de l'Europe pour la coulée de la fonte et pour la production en série des pièces moulées.

D'après Hua-Jue-Ming, on peut indiquer quelques repères historiques :

- A partir de 1 600 avant J.C : coulée de métal dans des moules en argile cuite pour les symboles de puissance et de culture.
- 500 avant J.C : coulée de fonte pour instruments ménagers.
- 300 avant J.C : coulée en coquille, traitement thermique de fonte malléable.
- Au début de notre ère : coulée en grappes pour la production de boîtes d'essieux pour chariots.
- En 900, 1000 après J.C : coulée des pièces particulièrement lourdes en fonte (lion de Kangzhou de 40 t, Bouddha de Zhengyang de 50 t).

À partir de 1100 avant J.C, le fer obtenu par réduction à l'état solide, se répand au Proche-Orient et gagne l'Europe entre 1100 et 700 avant J.C. Le premier âge du fer a recours au nouveau métal pour la réalisation des motifs décoratifs et d'armes. En France, les premiers objets en fer apparaissent à la fin du IXe siècle avant notre ère, et l'âge du fer se met progressivement en place entre 800 et 650 avant J.C. Toutes ces techniques connaissent un grand développement Au XIIIe siècle apparaissent les premiers hauts fourneaux primitifs dans la région de Siegen (Ruhr), où aurait eu lieu la première coulée de fonte grise. Il faut attendre la seconde moitié du XVe siècle et le XVIe siècle pour voir la fonte se banaliser dans la fabrication des poêles, ustensiles de cuisine, canons, boulets.

L'apparition des nouvelles techniques et des nouveaux alliages (par exemple, les fontes GS en 1948) a accéléré beaucoup l'évolution des fonderies, qui conduit à une augmentation rapide de la production des pièces destinées aux industries d'automobiles et de transport, du bâtiment, de production d'énergie...etc [1].

La fonderie est beaucoup développée au cours des années précédentes, il existe de nombreux centres de recherche et d'entreprises qui travaillent dans ce stade de recherche pour bien comprendre les phénomènes physico-chimiques liés au moulage, développer des logiciels de simulation qui facilitent la compréhension de ces phénomènes et bien maîtriser les procédés de fabrication pour l'objectif de fabriquer des pièces a bonne qualité .

La fonderie a également un rôle d'assistance pour l'évolution des autres techniques. Les progrès de l'automobile, de l'aviation, le développement de l'industrie nucléaire... n'auraient certainement pas été possibles sans une évolution considérable de la fonderie vers plus de performances et de qualité grâce à de nouveaux procédés de fabrication et de contrôle, à de nouveaux alliages et à de nouveaux produits. La fonderie a joué un rôle très important dans l'évolution de toutes les branches de l'activité humaine. C'est pourquoi elle est considérée comme un moteur du progrès.

Dans cette recherche, nous allons faire une étude approfondie suivie par des étapes à prendre en compte afin de fabriquer une série importante des mâchoires de frein destinée aux véhicules industriels.

Nous effectuons ce travail au niveau de EPE Fonderie de Rouïba. C'est une filiale de l'Entreprise Nationale des Véhicules Industriels (SNVI), qu'est une Entreprise Publique Economique (EPE) destinée à la conception, la fabrication, la commercialisation et le soutien après-vente d'une importante gamme de produits. La SNVI construit des camions, des camions-tracteurs, des autocars, des autobus, des équipements de carrosserie industrielle et des équipements ferroviaires...etc [2].

La fonderie de Rouïba a été mise en exploitation en 1983. Sa principale mission est la fabrication de bruts de fonderie en fonte grise sphéroïdale GS et fonte grise lamellaire GL avec le procédé de moulage en sable ainsi que des pièces en aluminium avec le procédé de moulage en coquille. Pour le secteur mécanique et pour d'autres secteurs tels l'hydraulique, les matériels agricoles et les travaux publics...etc. Sa capacité de production installée est de 9000 tonnes par ans de fonte grise et de 300 tonnes par ans d'aluminium [2].

Afin de traiter le sujet et de répondre aux questionnements émis, nous avons établi un plan de recherche. Tout d'abord, Nous avons fait une recherche bibliographique sur les bases de fonderie et les phénomènes associés (partie 1). Nous avons fait également une partie expérimentale qui contient l'étude et la simulation avec des logiciels spéciales de moulage (partie 2 chapitre 1), suivie d'une réalisation des pièces (partie2 chapitre 2), et en fin une partie spéciale sur le contrôle des pièces et la caractérisation du métal et du sable que nous avons utilisé dans la fabrication (partie 2 chapitre 3).

Première partie :  
Recherche  
bibliographique

**CHAPITRE 1 :**  
**NOTIONS DE BASE SUR**  
**LA FONDERIE**

## I. Notions de base sur la fonderie

### I.1 Introduction

La fonderie est un domaine très vaste qui contient dans laquelle plusieurs procédés de moulage comme le moulage en sable, moulage en coquille, sous pression, modèle perdu...etc. Et offre une gamme d'alliages pratiquement illimitée, parmi lesquels on peut noter : les alliages ferreux courants (fontes, aciers), les alliages non-ferreux (aluminium, bronze, magnésium...), les alliages spéciaux (aciers inoxydables, réfractaires...).

Dans cette mémoire, nous n'intéressons qu'aux procédés et alliages utiliser pour la fabrication des pièces mécaniques au niveau d'EPE Fonderie de Rouïba. C'est pour ça nous allons rappeler dans ce chapitre que des notions générales sur le moulage des fontes grises avec le procédé de moulage en sable.

### I.2 Généralités sur les fontes

On entend par fonte des alliages à base de fer avec le carbone comme principal élément d'alliage (teneur supérieur à 2,1% C). La particularité de ces alliages est de posséder un eutectique à 4,3% C, ce qui en fait des alliages de fonderie par excellence (la coulabilité étant maximale pour la composition eutectique).

En pratique, les éléments constitutifs principaux des fontes non alliées sont :

Carbone en général 3 à 4 %.

Manganèse 0,5 à 1,5%.

Silicium 0,5 à 3%.

Phosphore < 0,15%.

Soufre < 0.15 %.

Les fontes sont l'un des alliages de fonderie les plus courants. Elles ont des applications aussi variées que des pièces pour l'industrie automobile ou les camions (carter moteur, collecteurs d'échappement, porte-fusée, cylindre bloc, mâchoire de frein ...etc), des pièces de canalisation (tuyaux, corps de pompes, vannes...etc), des composants de machines-outils... etc. Comme le nombre de type des fontes et leurs propriétés sont extrêmement variés, leur utilisation est très vaste.

**I.2.1 Diagrammes de phases fer – carbone**

Les phases des alliages fer – carbone peuvent être décrites à l’aide de deux diagrammes Figure I-1

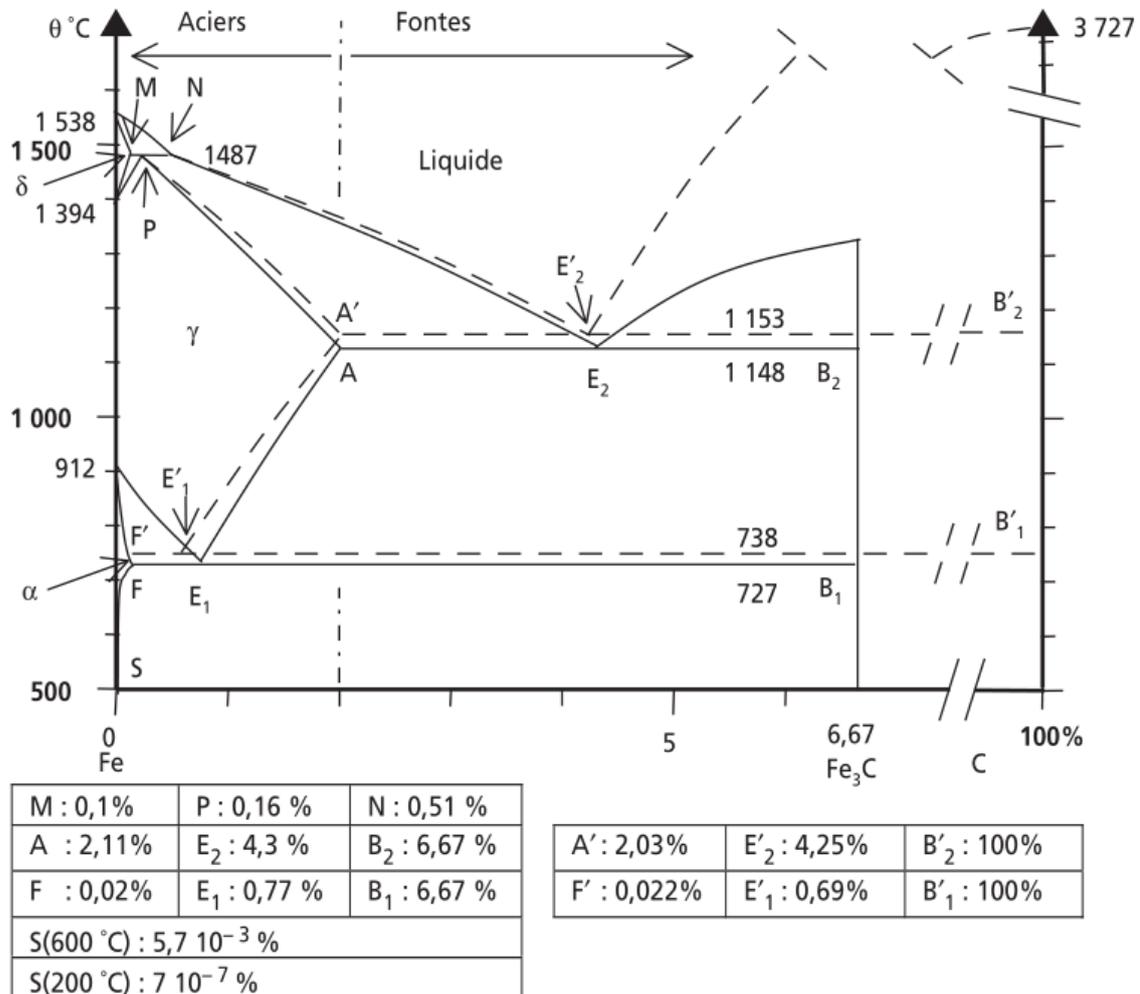


Figure I.1 Diagramme Fer- Carbone

En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe – Fe<sub>3</sub>C [3]

- le diagramme Fe – Fe<sub>3</sub>C, représentant des états métastables ;
- le diagramme Fe – C, représentant les états stables.

En effet, la cémentite Fe<sub>3</sub>C se forme lors du refroidissement rapide des mélanges fer – carbone (on parlera alors de fonte blanche) et elle est métastable et a tendance à se décomposer en fer et graphite (Fe<sub>3</sub>C → 3 Fe + C) avec une cinétique qui se déclenche par la température. Les refroidissements très lents sont décrits par le diagramme Fe – C au moins dans le domaine des températures supérieures à 800 °C (on parlera de fonte grise).

Les fondeurs jouent aussi sur les éléments d'addition pour favoriser une phase ou l'autre. Notons en particulier l'effet du silicium et certains éléments d'addition graphitisants comme P, Al, Ni, Cu, Ti, Zr...qui tend à écarter les deux eutectiques et favoriser l'équilibre Fe-C. D'autres éléments comme les éléments carburigènes comme Mn, Cr, Mo, S, V, W, B...tendent au contraire à favoriser l'équilibre Fe- Fe<sub>3</sub>C. Enfin il est courant de recourir à des agents d'inoculation qui favorisent la formation du graphite comme le ferro-silicium ou celle de la cémentite.

### 1.2.2 Les structures des fontes

Pendant son refroidissement, l'austénite doit se transformer en ferrite + C. En dessous de 723-738 °C, l'austénite disparaît complètement. Cette réaction n'est jamais simple et dépend fortement de la composition de l'austénite et de la vitesse de refroidissement. Comme pour les aciers, plusieurs types de structure peuvent être obtenus :

- **martensite** : c'est une phase métastable hexagonale ; dans ce cas la transformation dite martensitique est instantanée et n'implique aucune diffusion. Les atomes de carbone en insertion sont figés sur place. Cette phase est extrêmement dure et fragile. Elle s'obtient par refroidissement très rapide.
- **bainite** : (inférieure ou supérieure) obtenue par diffusion des atomes de carbone depuis la phase martensitique.
- **perlite** : la perlite est une structure eutectoïde avec %C=0.77-0.69 constituée de fines lamelles de ferrite et cémentite. Elle résulte généralement d'une transformation eutectoïde lente.
- **austénite** : est une phase stable à des températures supérieures à la température eutectoïde avec une structure cubique à faces centrées on peut être obtenue cette phase sous forme stable à basse température seulement avec des fortes additions d'éléments gamagènes comme Ni ou Cr.

### 1.2.3 Les types des fontes

La microstructure résultant de la solidification et du refroidissement est composée de phase carbone qui peuvent prendre plusieurs formes de lamellaire à sphéroïdal en passant par une forme dendritique. Ainsi qu'une matrice qui peut prendre toutes les formes de martensitique à perlitique. Il existe donc un grand nombre de combinaisons possibles, par conséquent il existe un nombre tout aussi grand de type de fonte. Le classement des fontes dépend de la combinaison de ces deux éléments de la microstructure.

L'organigramme présenté sur la *Figure 1-1* donne les diverses possibilités de phases et structure des alliages fer – carbone et aussi les classements des fontes résulte a ces combinaison.

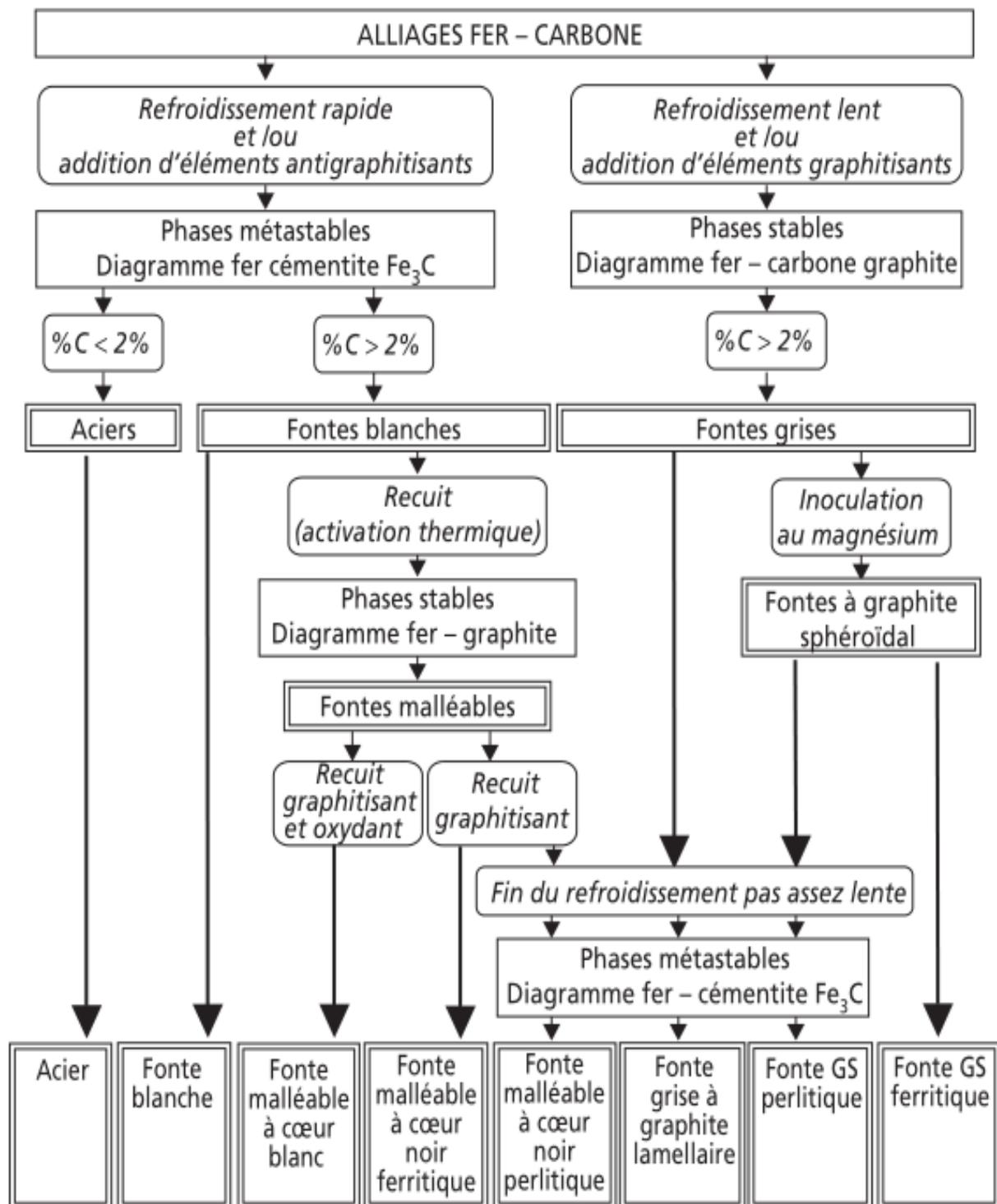


Figure I.2 Synoptique des diverses possibilités des phases et structure

Des alliages fer – carbone [3].

La fonderie de ROUIBA utilise seulement les fontes grises soit à graphites sphéroïdales FGS soit à graphites lamellaires FGL, pour cela on parle seulement sur lesquelles.

### I.2.4 Les Fontes grises

Dans les fontes grises, le carbone est sous forme de graphite. L'étude de ces fontes peut se faire à l'aide du diagramme stable fer-graphite (Figure I-1).

Elles sont des fontes hypo-eutectiques avec une composition généralement de carbone compris entre 3 et 4%, de manganèse et silicium varié selon le type de fonte grise. Le phosphore est sous la barre des 0,1% et le soufre entre 0,01 et 0,12 %, il est possible d'ajouter quelques % de magnésium pour obtenir une structure sphéroïdale. Ces fontes sont coulées généralement vers 1400 °C dans un moule en sable .

#### I.2.4.1 Fontes grises à graphites lamellaires (FGL)

Les fontes grises sont inoculées au ferrosilicium pour favoriser la formation du graphite lamellaire alors cette fonte dits à graphites lamellaires (FGL). La composition de ces fontes est généralement la suivante :

Tableau I-1 : composition chimiques des fontes FGL

Elément	Carbone	silicium	manganèse	Soufre	Phosphore
%	3,16 à 3,36	1,6 à 1,9	0,6 à 0,9	< 0.1	P < 0,15

Les FGL eutectiques inoculées se solidifient par germination hétérogène. Le graphite se forme de lamelles. Les fontes hypo-eutectiques montrent par contre des dendrites de ferrites (austénite transformée) entre lesquelles les rubans de graphite se développent. Il arrive que de la perlite fine se forme au lieu de l'austénite initiale. La matrice des fontes FGL peut être ferritique, perlitique, bainitique ou martensitique. Suivant les traitements thermiques qu'elles subissent.

Les fontes grises lamellaires FGL sont utilisé essentiellement pour leurs caractéristiques de faible retrait à la solidification (le graphite gonfle), point de fusion basse, bonne usinabilité (effet lubrifiant du graphite), bonne absorption des vibrations et bonne conductivité thermique [14].

Notons tout de même la fragilité des fontes à graphite lamellaire, qui reste leur principal défaut.

Le tableau I-2 représente les principales caractéristiques des nuances de la fonte à graphite lamellaire

Tableau I-2 : Principales caractéristiques des nuances de fontes à graphite lamellaire [4]

Caractéristiques	Symbole	Unité SI	Matériau					
			EN-GJL-150 (EN-JL-1020)	EN-GJL-200 (EN-JL-1030)	EN-GJL-250 (EN-JL-1040)	EN-GJL-300 (EN-JL-1050)	EN-GJL-350 (EN-JL 1060)	EN-GJL-350 (EN-JL-1060)
			Structure de base					
			Ferritique/perlitique	perlite				
Résistance à la traction	$R_m$	$N/mm^2$	150 à 250	200 à 300	250 à 350	300 à 400	350 à 450	
Limite conventionnelle d'élasticité à 0.1%	$R_{p0.1}$	$N/mm^2$	98 à 165	135 à 195	165 à 228	195 à 260	228 à 285	
allongement	A	%	0.8 à 0.3					
Résistance à la compression	$\sigma_{db}$	$N/mm^2$	600	720	840	960	1080	
Limite d'élasticité en compression	$\sigma_{d0,1}$	$N/mm^2$	195	260	325	390	455	
Résistance à la flexion	$\sigma_{dB}$	$N/mm^2$	250	290	340	390	490	
Résistance au cisaillement	$\sigma_{aB}$	$N/mm^2$	170	230	290	345	400	
Résistance à la torsion	$\tau_{tB}$	$N/mm^2$	170	230	290	345	400	
Module d'élasticité	E	$KN/mm^2$	78 à 103	88 à 113	103 à 118	108 à 137	123 à 143	
Coefficient de poisson	$\nu$	—	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	
Résistance à la fatigue par flexion	$\sigma_{bW}$	$N/mm^2$	70	90	120	140	145	
Limite d'endurance en traction/compression alternée	$\sigma_{zdw}$	$N/mm^2$	40	50	60	75	85	
Ténacité à la rupture	$K_{Ic}$	$N/mm^2$	320	400	480	560	650	

### I.2.4.2 Fontes grises à graphite sphéroïdal (FGS)

Pour ces fontes, le carbone est sous forme de graphite sphéroïdale. Elles subissent systématiquement un traitement au Mg (0,03 à 0,06 % sous forme de Ferromagnésium) pour favoriser la sphéroïdisation du graphite. La composition de ces fontes est généralement la suivante :

Tableau I-3 : composition chimiques des FGS

Elément	Carbone	silicium	manganèse	Soufre	Phosphore	Magnésium
%	3,4 à 4	2 à 3	0,1 à 0,8	< 0.02	P < 0,1	0.02 à 0.1

Elles sont coulées vers 1350 à 1410 °C dans des moules en sable. La solidification se fait par germination des nodules de graphite puis formation de l'austénite autour. Elles sont utilisées essentiellement pour :

- leur très bonne ductilité (allongement atteignant 20 %).
- leur bonne usinabilité.

Le tableau suivant représente les Principales caractéristiques des nuances de fontes à graphite sphéroïdale

Tableau I-4 : Principales caractéristiques des nuances de fontes à graphite sphéroïdal [4]

Caractéristiques	Unité SI	Matériaux							
		EN-GJS-350-22 (EN-JS-1010)	EN-GJS-400-18 (EN-JS-1020)	EN-GJS-450-10 (EN-JS-1040)	EN-GJS-500-7 (EN-JS-1050)	EN-GJS-400-3 (EN-JS 1060)	EN GJS 700-2	EN-GJS-800-2 (EN-JS 1080)	EN-GJS-900-2 (EN-JS 1090)
Résistance au cisaillement	N/m $m^2$	315	360	405	450	540	630	720	810
Résistance à la torsion	N/m $m^2$	315	360	450	450	540	630	720	810
Module d'élasticité E (tension et compression)	GN/m <sup>2</sup>	169	169	174	176	176	176	176	176
Coefficient de poisson	—	0.27 5	0.275	0.27 5	0.275	0.27 5	0.27 5	0.275	0.275
Résistance à la compression	N/m $m^2$	—	700	700	800	870	100 0	1150	—
Ténacité à la rupture	MPa* $\sqrt{m}$	31	30	23	25	20	15	14	14

### I.3 Le procédé de fabrication des moules

En fonderie de fonte le procédé de moulage le plus courant et largement utilisé est le moulage en sable, il contient plusieurs types qui ils diffèrent d'une manière générale par :

- La nature des sables de moulage utilisés.
- Les moyens manuels ou mécaniques employés pour leur mise en œuvre.
- Le type des modèles permanents ou perdus.

### **I.3.1 Moulage en sable silico-argileux à vert**

C'est le procédé le plus courant et il reste le plus économique du fait de la simplicité de sa régénération. De nos jours, l'agglomérant utilisé pour la confection du moule est une argile, de type bentonite. Cette argile, ajoutée avec de l'eau au sable siliceux, donne au moule une bonne plasticité pour conserver l'empreinte de la pièce après l'extraction du modèle dans l'opération de démoulage.

Le taux d'argile dans le sable silico-argileux pour pièces mécaniques en fonte est assez variable en fonction de la masse. On peut retenir des taux de l'ordre de 5 à 10 % d'argile active.

Les sables non étuvés sont des sables appelé (« à vert »). Aujourd'hui, l'évolution des produits de moulage et de leurs techniques de serrage a fortement contribué au quasi disparition des sables étuvés, pour les pièces mécaniques.

Toutefois, le procédé de moulage en sable silico-argileux à vert ne peut s'appliquer aux pièces des grandes dimensions. En effet, quelles que soient les pressions de serrage, la résistance de ce matériau à la pression ferrostatique et aux efforts dynamiques de la fonte lors de la coulée est limitée.

Il existe deux techniques de moulage en sable silico-argileux à vert :

- Le moulage serré manuellement, appelé « moulage main ».
- Le moulage serré mécaniquement, appelé « moulage mécanisé » [5].

#### **I.3.1.1 Moulage main (en sable « à vert »)**

Ce procédé, est destiné à la fabrication de pièces unitaires ou de quelques pièces répétitives, jusqu'à 1 à 2 tonnes environ. Le serrage du sable pour la confection des différentes parties du moule s'effectue manuellement à l'aide des outils habituels du mouleur main (fouloir, batte, fouloir pneumatique...etc) [5].

#### **I.3.1.2 Moulage mécanisé (en sable « à vert »)**

Pour les pièces de série, on recourt à l'emploi de machines à mouler, de conception très diverses, qui sont intégrées dans des installations (ou chantiers) semi-automatiques ou, le plus souvent automatiques.

On distingue selon la pression de serrage :

- Les machines à mouler basse pression, basées sur des principes combinés de serrage par secousses-pression ou vibrations-pression. Elles permettent l'utilisation de modèles en bois fixés sur une plaque-modèle. De par la nature de l'outillage, cette méthode est économique et donc bien adaptée aux petites et moyennes séries.

- Les machines à mouler à moyenne et haute pressions, avec lesquelles le serrage intense du sable, obtenu par pression hydraulique, soufflage, détente d'air comprimé ou impact par explosion, augmente la rigidité du moule. On obtient alors une amélioration de la précision dimensionnelle et géométrique des pièces ainsi moulées et de leur compacité. Cette technologie est en principe réservée à la production de pièces en moyennes et grandes séries. Elle nécessite d'employer des modèles beaucoup plus résistants (en bois stratifiés ou bakélisés, en résines époxydes ou polyuréthanes, en métal...etc) [5].

## **I.4 Les procédés de fabrication des noyaux**

### **I.4.1 Procédé silicate-CO<sub>2</sub>**

C'est l'un des procédés à prise par gazage ; avec ces procédés, le durcissement du sable qui contient un liant alcalin (silicate de soude par exemple) ou un liant organique (résine), est obtenu presque instantanément par injection dans le mélange, d'un catalyseur et d'un coréactant (on les prend soit ensemble soit séparé) ou accélérateur sous forme gazeuse.

Les procédés à prise par gazage permettent la production des noyaux, en moyennes et grandes séries, mais dont l'importance volumique reste limitée.

De par les cadences élevées qu'ils autorisent, ils sont davantage destinés à des productions sur machines (en noyautage par exemple, sur des machines à souffler ou à tirer les noyaux). Toutefois, ils peuvent être employés en moulage, et pour certains en noyautage main.

Dans ce procédé, c'est le silicate de soude de module ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) égal à 2,4 et contenant 44 % de matières sèches qui est le plus généralement employé car il constitue le meilleur compromis avantages/inconvénients. Le durcissement (par « gélification » du silicate) se produit sous l'insufflation de gaz carbonique. La faible acidité de ce dernier provoque la neutralisation de la soude du silicate et la formation d'un acide polysilicique stable.

Avec ce procédé, certaines précautions doivent être prises lors l'utilisation d'outillages en bois ou en aluminium : ils doivent présenter des surfaces lisses, propres et convenablement protégées (vernis, peinture...).

Il s'adresse à des fabrications des noyaux d'encombrement limité (pour des raisons de facilité de gazage), pour des petites, moyennes et grandes séries; l'un de ses avantages est son faible coût de revient (matières, préparation, mise en décharge) ; ses principaux inconvénients sont sa mauvaise aptitude au débouillage, et des problèmes liés à la reprise d'humidité et à l'effritement [11].

### I.4.2 Procédé Croning

Le procédé Croning est un procédé à prise thermique. On met en place, par simple gravité ou par soufflage, un sable pré-enrobé d'une résine phénolique solide thermoplastique, additionnée d'un agent de réticulation. Au contact d'un outillage métallique chauffé entre 200 à 300°C, le mélange durcit par polymérisation et permet la formation d'un noyau.

Ce procédé permet d'obtenir des noyaux avec une bonne précision dimensionnelle et très bel état de surface. Cependant, il nécessite de recourir à des outillages métalliques coûteux, usinés à partir d'ébauches. Ce procédé offre l'avantage d'une excellente aptitude au stockage, au déburrage et au décochage des noyaux [11].

### I.5 Notion de série

La notion de série caractérise une quantité de pièces identiques à fabriquer. Elle est renouvelable mensuellement ou annuellement, et ça dépend du type de la série : avec retours ou sans retour de commandes. Ces derniers peuvent être d'ailleurs cycliques dans le temps ou non, par le client. On parle alors de retours réguliers ou irréguliers. Toutefois, on peut considérer d'une façon générale les correspondances suivantes :

Tableau I-5 : notion de série

Type de série	Nombre de pièces correspondantes
Série unitaire	Une à quelques pièces
Petite série	Quelques dizaines de pièces
Moyenne série	Quelques centaines de pièces
Grande série	Quelques milliers à quelques dizaines de milliers de pièces
Très grande série	Plusieurs dizaines, voire centaines de milliers de pièces

La notion de petites, de grandes ou de très grandes séries est finalement très subjective et liée aux moyens de fabrication dont dispose l'entreprise. En effet, une série considérée comme petite par une fonderie de l'automobile, peut constituer une série importante pour une petite fonderie de pièces diverses, moulées en sable.

En fait cette notion de série est liée au procédé de moulage et au choix de l'outillage qui en dépend. En générale, on peut admettre que le procédé sable couvre toutes les séries, sachant

que le moulage main est plutôt réservé aux séries unitaires ou petites séries non répétitives, alors que pour des séries plus importantes, le moulage mécanisé est mieux approprié.

Enfin il faut aussi souligner que cette notion de série dépend du poids de la pièce. En effet, les pièces de poids important appartient à la série unitaire, tandis que l'on trouve dans le domaine de la petite série et de la grande série, des pièces de dimensions et de poids généralement beaucoup plus faibles ; vue la taille limitée des installations mécanisées.

## **I.6 Conclusion**

La bonne coulabilité et résilience, la résistance mécanique élevée, le faible cout de production par rapport aux aciers, et plusieurs autres caractéristiques étonnantes font les fontes grises les alliages de fonderie les plus utiliser , nous avons vu que le procédé de moulage en sable reste le procédé le plus utilisé dans la fonderie des fontes ,qui ré pand aux plusieurs exigences demandé tel que la forme complexe des pièces, la grande précision dimensionnelle et le bas cout de fabrication.

**CHAPITRE 2 :**  
**PHENOMENES LIEES**  
**A LA FABRICATION**  
**DES PIECES MOULEES**

## II. Phénomènes liés à la fabrication des pièces moulées

### II.1 Introduction

Au cours de la coulée et le refroidissement des pièces de fonderie, plusieurs phénomènes se produisent, ces derniers ont une relation directe avec les propriétés et la qualité des pièces à fabriquées.

Nous rappelons dans ce chapitre les principaux phénomènes métallurgiques, thermiques et hydrauliques qui régissent la réalisation d'une pièce moulée en fonte, que le fondeur doit parfaitement connaître pour atteindre à la qualité requise et répondre ainsi aux exigences de son client.

### II.2 Phénomènes métallurgiques

#### II.2.1 Retrait

##### II.2.1.1 Retrait volumique

Lorsqu'un alliage liquide est coulé dans un moule en sable, il se refroidit et subit diverses variations de volume et de structure qui ont lieu lors de son changement d'état. Ce dernier s'accompagne dans le cas des fontes, et notamment des fontes grises, par une contraction, plus ou moins marquée selon la nuance, que l'on nomme retrait volumique global de solidification ( $R$  en %) et qui correspond aux trois phénomènes cumulés suivants :

- la contraction de l'alliage à l'état liquide depuis la température de coulée ( $\theta_c$ ) jusqu'à la température du liquidus ( $\theta_l$ ). Cette variation volumique négative est proportionnelle à l'écart entre ces deux températures « la surfusion».
- la contraction de solidification liée au changement d'état liquide-solide entre la température du liquidus ( $\theta_l$ ) et la température du solidus ( $\theta_s$ ). L'écart entre ces deux températures est appelé : intervalle de solidification.  
Le retrait volumique global de solidification est compensé par le métal fourni par la (ou les) masselotte(s).
- le gonflement ( $G$  en %) qui correspond à la précipitation du graphite des fontes grises notamment. présentent, en comparaison aux autres alliages, la particularité de « gonfler » pendant l'intervalle de solidification. Ce gonflement est dû à la précipitation du graphite, ce dernier soit d'ailleurs sous forme lamellaire ou sphéroïdale. Toutefois ce phénomène est beaucoup plus marqué en fonte à graphite lamellaire FGL qu'en fonte à graphite sphéroïdal FGS. C'est ce qui explique que le taux de masselottage d'une pièce coulée en fonte FGS est toujours plus élevé, en comparaison à celui de la même pièce coulée en fonte FGL.

Cette expansion graphitique se traduit par une variation volumique positive qui, par exemple dans le cas des fontes grises lamellaires hyper-eutectiques, compense en presque totalité le retrait global de solidification  $R\%$  [4].

### II.2.1.2 Retrait linéaire

La contraction volumique qui se poursuit pendant le refroidissement de la pièce à l'état solide, depuis la température du solidus jusqu'à la température ambiante et après solidification complète, correspond au retrait linéaire de l'alliage. Ce retrait qui s'exerce dans les trois dimensions de l'espace, n'interfère plus sur la santé de la pièce, autrement dit sur sa compacité, mais intervient sur son aspect dimensionnel.

Il est donc indispensable que le mouleur en tienne compte lors de la réalisation des outillages. C'est ce qui explique que ces derniers sont légèrement surdimensionnés par rapport aux pièces à obtenir, proportionnellement à la valeur de ce retrait, afin de garantir la précision dimensionnelle souhaitée.

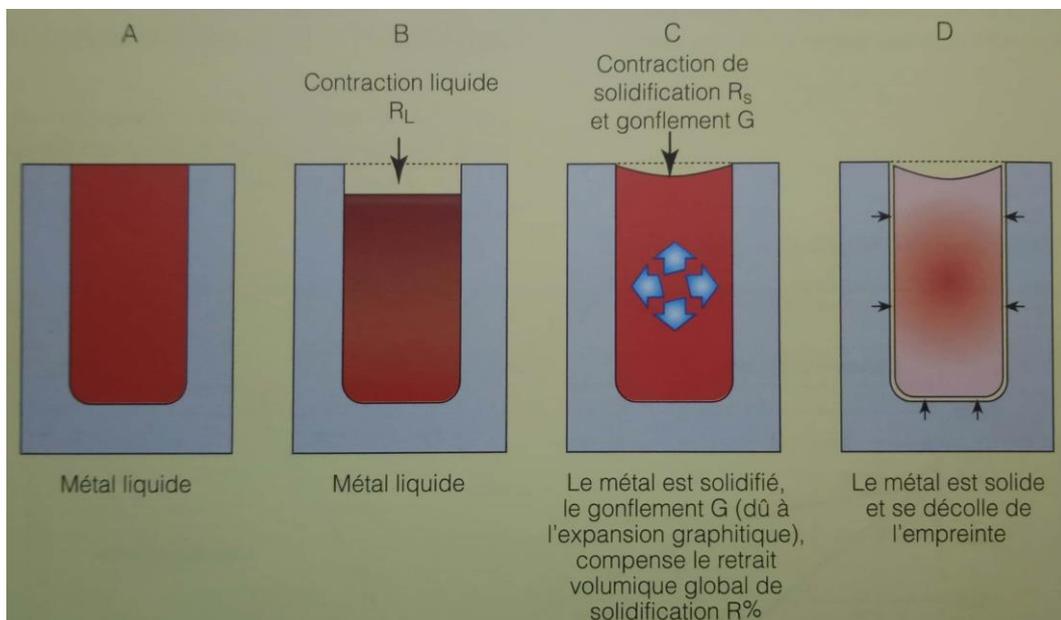


Figure II.1 : schéma des différentes phases de retrait

au cours de la solidification et de refroidissement d'une pièce en fonte grise [4]

A – volume de métal liquide dans l'empreinte, après remplissage (à température de coulée).

B – retrait à l'état liquide ( $R_L\%$ ) pendant l'écart de la température correspondant à la surchauffe.

C – contraction finale pendant l'intervalle de solidification.

D – retrait (linéaire) à l'état solide au cours du refroidissement.

## II.2.2 Solidification

Un alliage se solidifie de manière intrinsèque, ceci indépendamment des aspects relatifs au procédé d'élaboration et à la vitesse de refroidissement (gradient thermique) qui eux, modifient sensiblement son mode de solidification. Toutefois dans le cas des fontes, il y a lieu de distinguer la solidification primaire (P) de la solidification eutectique (E). En effet, une fonte grise hypo-eutectique par exemple peut très bien amorcer sa solidification (primaire) selon un certain mode, puis la terminer (solidification eutectique) selon un autre. Par soucis de simplification nous avons classé les fontes, selon leurs modes de solidification, en trois grandes catégories :

- Celles qui se solidifient à partir de la paroi du moule en couches épaisses avec une bande continue en cours de solidification ou « front continu » de largeur bien délimitée (solidification exogène).
- Celles qui se solidifient en couches épaisses, avec une zone pâteuse affectant toute l'épaisseur de paroi. Il s'agit d'un mode de solidification avec une bande ou « front discontinu », en couches épaisses (solidification endogène).
- Enfin. Celles qui présentent un mode de solidification intermédiaire entre les deux modes précédemment définis, en couches le plus souvent épaisses (solidification « mixte »).

Dans la première catégorie, on a affaire à une solidification exogène dite par « front continu » car il y a continuité du front quel que soit son contour dendritique. Lorsqu'il y a apparition de cristaux au sein même du métal liquide, il y a une discontinuité du front de solidification, on est en présence d'une solidification endogène dite à « front discontinu ». Le mode de solidification est en liaison avec l'intervalle de solidification ; les métaux purs et la plupart des alliages eutectiques considérés sans intervalle, se solidifient en couches minces, alors que les alliages à large intervalle de solidification se solidifient en couches épaisses.

C'est pendant cet intervalle de solidification que les cristaux solides prennent naissance, croissent et se répartissent au sein même de l'alliage liquide. Ce comportement cristallin qui diffère selon le mode de solidification de l'alliage permet de prévoir sous quelle forme va se présenter le retrait global de solidification (R%) ou déficit volumique final. En effet suivant le mode et l'épaisseur du front de solidification, ce déficit se présentera davantage sous forme de « non conformités » de type : macro ou micro retassures ou éventuellement criques.

Précisons que les alliages qui se solidifient par front continu en couches épaisses ont une tendance plus marquée à la macro-retassure axiale ; tandis que les alliages à solidification par front discontinu, également en couches épaisses, ont par contre tendance à la retassure dispersée ou micro- retassures [4].

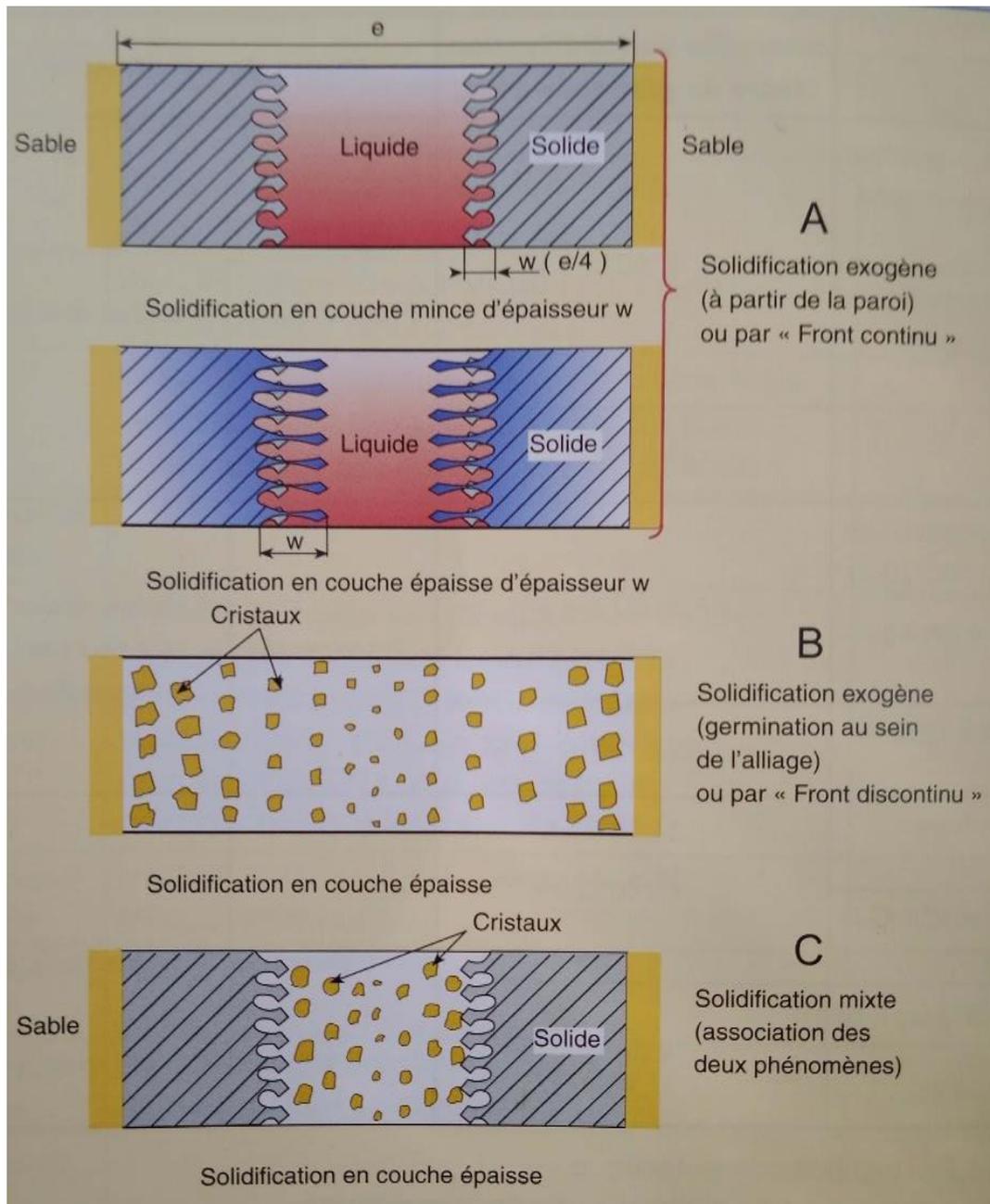


Figure II.2 : principaux modes de solidification des fontes [4]

### II.2.3 Notions de germination

La première étape de la transition de phase consiste à former des agrégats de nouvelles phases à l'échelle atomique, ce phénomène appelé germination.

Pour qu'une phase solide se forme elle doit vérifier la condition de stabilité. A une température donnée, la condition de stabilité peut être exprimée à partir des enthalpies libres et est donnée par la condition de Gibbs-Duhem :

$$G_m^s - G_m^l = \Delta G_m^{l-s} < 0 \quad \text{II.1}$$

Où  $\Delta G_m^{l-s}$  représente la force motrice de transformation de phase liquide  $\rightarrow$  solide. Pour des alliages dilués, à des surfusions modérées on peut considérer l'évolution de l'enthalpie des phases comme linéaire, cette force motrice est exprimée à partir de données plus faciles à déterminer expérimentalement :

$$\Delta G_m^{l-s} \approx -\Delta H_f \frac{\Delta T}{T_l} \quad \text{II.2}$$

$\Delta T = T_l - T$  est la surfusion et  $\Delta H_f = H^l - H^s$  est l'enthalpie de fusion molaire [6].

### II.2.3.1 Germination homogène

Dans la germination homogène, on suppose que les embryons en phase solide se forment spontanément à partir d'un liquide homogène. Afin de simplifier le problème on considère l'embryon solide comme une sphère de rayon  $r$ , et toutes les phases sont homogènes et décrites par leur enthalpie libre  $G$ . L'énergie interfaciale entre solide et liquide est donnée par  $\gamma_{s/l}$ . L'enthalpie libre est donnée par la relation suivante :

$$\Delta G = V_s \Delta G_V + A_s \gamma_{s/l} \quad \text{II.3}$$

Où  $V_s$  et  $A_s$  sont le volume et l'aire de la sphère de rayon  $r$ , et  $\Delta G_V = \Delta G^{l \rightarrow s} / V_m$  est la force motrice thermodynamique volumique et  $V_m$  est le volume molaire. Le terme volumique est toujours négatif et contribue à diminuer l'énergie globale du système. Le terme surfacique est toujours positif et s'oppose à la transformation. En combinant les équations II.4) et II.3), et en remplaçant  $V_s$  et  $A_s$  par leurs expressions, il vient :

$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\Delta H_f \Delta T}{V_m T_l} + 4\pi r^2 \gamma_{s/l} \quad \text{II.4}$$

La Figure II-3 montre dans le cas du fer pur, l'évolution des contributions volumique, surfacique et totale en fonction du rayon du germe. La courbe  $\Delta G(r)$  présente un maximum appelé barrière de germination, noté  $\Delta G^*$  et constitue l'énergie à fournir pour produire un germe de rayon critique noté  $r^*$ . Un germe sera énergétiquement favorable si  $r > r^*$  et pourra croître alors qu'un germe de taille  $r < r^*$  va refondre [6].

Pour calculer la valeur du rayon critique en dérivant l'équation II.4, on obtient :

$$r^* = -\frac{2\gamma_{s/l}}{\Delta G_V} = \frac{2V_m \gamma_{s/l} T_l}{\Delta H_f \Delta T} \quad \text{II.5}$$

En remplaçons la valeur de  $r^*$  dans l'équation II.4, on obtient la valeur de la barrière de germination :

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma_{s/l}^3}{3\Delta G_V^2} = \frac{16\pi\gamma_{s/l}^3 V_m^2}{3\Delta H_f^2} \left(\frac{T_l}{\Delta T}\right)^2 \quad \text{II.6}$$

Ces équations permettent de déterminer la taille du germe critique à une surfusion donnée.

La vitesse de germination, notée  $I$ , est donnée par l'équation suivante :

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{K_B T}\right) \quad \text{II.7}$$

### II.2.3.2 Germination hétérogène

La germination hétérogène favorise l'apparition des germes critiques à des surfusions plus faibles que celles de germination homogène. Les germes qui apparaissent son volume d'une calotte sphérique comme illustré sur Figure II-3 (a). Avec cette configuration, l'enthalpie libre donnée dans l'équation (II.3) devient :

$$\Delta G = V_s \Delta G_V + A_{sl} \gamma_{s/l} + A_{ms} (\gamma_{m/s} + \gamma_{m/l}) \quad \text{II.8}$$

Où  $V_s$  est le volume de la calotte,  $A_s$  est l'aire de la surface entre solide et liquide, et  $A_{ms}$  est l'aire du substrat sur laquelle le solide remplace le liquide. Après un calcul trigonométrique, cette énergie devient :

$$\Delta G = (V_s \Delta G_V + A_{sl} \gamma_{s/l}) f(\theta) \quad \text{II.9}$$

Où  $f(\theta) = \frac{(2+\cos\theta)(1-\cos\theta)^2}{4}$ ,  $f(\theta) \in [0,1]$  dont l'évolution est présentée sur Figure II-3 (b). Ce résultat signifie que la forme est identique à la germination homogène au facteur  $f(\theta)$  près, le rayon critique est le même et la barrière de germination est diminuée d'un facteur  $f(\theta)$ . Si l'on considère un angle  $\theta = 30^\circ$  ( $f(\theta) = 0,013$ ), la barrière de germination est diminuée quasiment d'un facteur 100, comme cela est illustré sur Figure II-4.

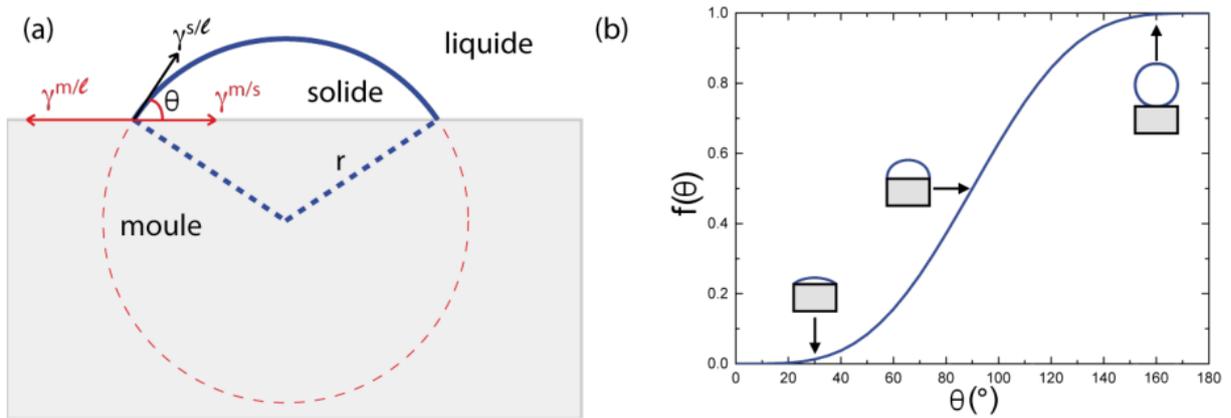


Figure II.3 : (a) Représentation schématique de la germination d'un solide sur un substrat et (b) évolution de la fonction  $f(\theta)$  en fonction de l'angle  $\theta$ .

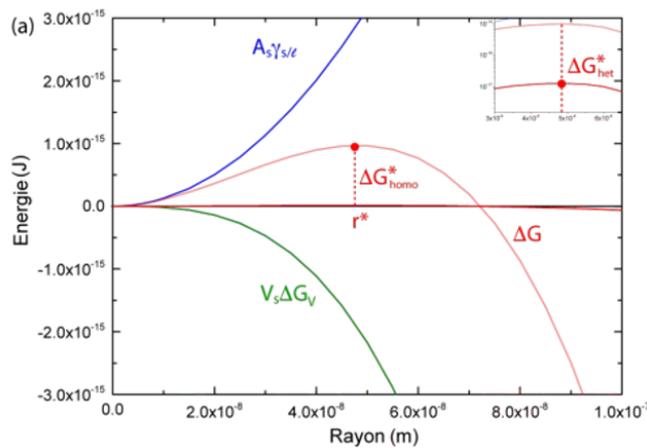


Figure II.4 : Contributions énergétiques en fonction du rayon du germe[3]

L'équation de la vitesse de germination, elle s'écrit ce la forme

$$I = I_0^{het} \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{K_B T} f(\theta)\right) \tag{II.10}$$

Dans le cas de la germination hétérogène, le terme pré-exponentiel est de l'ordre de  $10^{22} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ , ce qui est beaucoup plus faible que dans le cas de la germination homogène [6].

### II.3 Phénomènes hydrauliques

Le premier problème qui se pose au démarrage d'un produit nouveau Pour un fondeur, est le remplissage. Comment va-t-il s'y prendre pour remplir le moule à 100 % avant que l'alliage ne se solidifie ? Comment peut-il limiter les défauts occasionnés par l'écoulement du métal liquide, comme l'entraînement de bulles d'air, des peaux d'oxyde, d'inclusions...etc.

### II.3.1 Équations de Bernoulli

Les métaux liquides sont des fluides newtoniens de faible viscosité. Ils pénètrent facilement dans des canalisations comme l'eau. Les métaux liquides sont également des fluides incompressibles. L'équation fondamentale des écoulements est donc basée sur l'équation de Navier-Stokes qui exprime les variations du vecteur vitesse d'écoulement  $v$  en fonction des forces motrices gravitaires ( $\rho g$ , où  $\rho$  est la masse volumique de l'alliage et  $g$  l'accélération de la pesanteur) et des gradients de pression  $P$  et en prenant en compte l'effet frein de la viscosité [7]:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + (v \cdot \text{grad}).v = \rho g - \text{grad}(P) + \mu \Delta(v) \quad \text{II.5}$$

Néanmoins dans une première approche, il est possible de faire abstraction de la viscosité et des écoulements tournants ou rotationnels. Dans ce cas, l'équation de Bernoulli peut s'appliquer. Elle précise que, en régime permanent, la vitesse au carré  $v^2$ , la pression  $P$  et l'altitude  $h$  suivent une évolution telle, que l'expression entre parenthèses reste constante lorsque l'on suit une ligne d'écoulement. Cela est très utile dans un grand nombre d'applications [7].

$$\text{grad} \left[ \frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gh \right] = 0 \quad \text{II.6}$$

La conservation de la masse de fluide est une information à ne jamais oublier. En particulier lors de l'écoulement dans une conduite de section variable, la conservation donne :

$$D_m = \rho \cdot S_1 v_1 = \rho \cdot S_2 v_2 \quad \text{II.7}$$

Avec  $S_1$  et  $S_2$  sont les sections des tubes de flux aux deux endroits de l'écoulement, et  $V_1$  et  $V_2$  sont les vitesses d'écoulement du liquide aux deux endroits de l'écoulement.

### II.3.2 Coulée faibles vitesses

Pour les procédés comme la coulée gravitée, la basse ou la contre-pression, le squeeze casting, etc. Le métal s'écoule avec des faibles vitesses, comparé à la fonderie sous pression. En dehors des critères de production pour caractériser le remplissage, les principaux paramètres utilisés aujourd'hui pour valider une simulation de remplissage sont relatifs à la turbulence. L'idée sous-jacente est que la turbulence est responsable de l'entraînement de bulles d'air dans la pièce ainsi que de l'usure prématurée des revêtements de poteyage (avec l'entraînement d'inclusion qui lui est associé). Il est cependant préférable de choisir un nombre sans dimension comme

le nombre de Reynolds donné par l'équation [7] :

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} \quad \text{II.8}$$

avec  $\rho$  la masse volumique de l'alliage,  $U$  la vitesse moyenne à travers la zone d'écoulement,  $D$  une dimension caractéristique de l'écoulement et la viscosité de liquide (en Pa.s). Lorsque l'écoulement est tubulaire, la dimension caractéristique est le diamètre du tube. Il est communément admis que tant que  $Re < 1400$  l'écoulement est laminaire. Au-delà, il devient turbulent, avec une zone transitoire autour de 1400.

L'objectif étant d'obtenir un écoulement laminaire autant que possible, les marges de manœuvre sur le design du système de coulée sont les suivantes :

- Travailler avec des sections fines, au risque de voir le métal se dans les canaux s'il a une faible coulabilité.
- Limiter les vitesses d'écoulement par action sur les pressions (basse pression) ou les hauteurs de chute (gravité).
- Une troisième marge de manœuvre couramment employée est de disposer des freins à l'écoulement comme les filtres [7].

### II.3.3 Écoulement en milieu poreux

Lorsqu'un alliage est en cours de solidification, il se forme une zone pâteuse dans le domaine du mélange liquide + solide. La fraction liquide évolue lentement entre 100 % et environ 30 % (en fonction des alliages) sur une grande partie de l'intervalle de solidification. Proche de l'eutectique, la fraction liquide chute brutalement vers 0 %. Pendant toute la zone d'évolution lente, le solide prend une forme type de réseau dendritique plus ou moins ramifié. Le liquide peut se déplacer à travers ce squelette de solide, d'autant plus qu'il percole (c'est-à-dire qu'il peut joindre deux points quelconques sans traverser de mur de solide). Les forces motrices de l'écoulement sont toujours la gravité (surtout lorsque la densité évolue à cause de la ségrégation) et les gradients de pression au sein du liquide (résiduelle de mouvements du solide se contractant ou de pression appliquée dans les zones encore totalement liquides). Les freins à l'écoulement sont multiples cette fois-ci. Il reste bien la viscosité, d'autant que les sections de passage sont faibles. Il faut aussi ajouter des effets capillaires qui deviennent d'autant plus importants que la fraction solide croît. Les mouvements de fluides dans la zone pâteuse ont des effets importants dans les procédés de solidification lente (ou la zone pâteuse est large et évolue lentement). Ce sont eux qui sont en effet responsables de bon nombre de phénomènes de ségrégation des éléments. Lorsqu'on fabrique des pièces de grande épaisseur et à forte valeur ajoutée, il est souhaitable de maîtriser tous ces effets et d'éviter de recourir à des essais-erreurs. La pression industrielle rend les simulations numériques de ces écoulements en milieu semi-

## Chapitre 2 Phénomènes liées à la fabrication des pièces moulées

solide de plus en plus fréquentes. Pour simuler ces écoulements en milieu percolant, l'équation de Navier-Stokes (II.9) ne peut plus faire l'affaire. Il est commun, dans les milieux

scientifiques des milieux poreux, de faire appel à l'équation dite de Darcy. Le milieu poreux est caractérisé par une *perméabilité*  $K$  qui intègre l'effet de la porosité ouverte et de la capillarité [7].

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + (v \cdot \text{grad}).v = \rho g - \text{grad}(P) + \mu \Delta(v) - \frac{\mu}{K} v \quad \text{II.10}$$

La perméabilité varie avec la fraction solide et une corrélation, dite de Carma-Kozeny , permet de relier empiriquement la perméabilité à la fraction solide  $f_s$ , et le diamètre moyen  $d$  des canaux de circulation.

$$K = \frac{(1 - f_s)^2 d^2}{180 f_s^2} \quad \text{II.11}$$

### II.4 Phénomènes thermiques

#### II.4.1 Transfert de chaleur au travers des moules

L'évacuation de la quantité de chaleur, indispensable à la solidification du métal et à son refroidissement, s'opère principalement par conduction au travers du matériau de moulage, aussi bien pour les pièces moulées en sable que pour celles moulées en coquille.

#### II.4.2 Effets volumiques de la solidification sur la thermique

Le processus de solidification est un changement de phase du premier ordre. Il s'accompagne donc d'un dégagement de chaleur latente. Dans le sens de la solidification, la chaleur latente est toujours négative. Cela signifie que la transformation est exothermique. Lorsque le système est refroidi lentement et que le métal est un corps pur ou un eutectique, la transformation se produit à température constante ( $T$ ) malgré l'extraction de chaleur. C'est que la chaleur extraite correspond celle dégagée par la transformation. Si le métal est un alliage non eutectique, son changement de phase se produit sur un intervalle de solidification. La transformation ne se fait alors pas sur un palier de température, mais la courbe d'évolution de la température marque une inflexion au passage du liquidus et une autre au passage du solidus. Tous ces cas de figure simples montrent combien les transferts thermiques peuvent être complexes à prédire [7].

### II.4.2.1 Cas de variance de l'alliage égale à 1 (corps pur ou eutectique)

L'équation de la conduction de la chaleur s'applique dans le solide et, en première approximation dans le liquide. Dans chaque domaine, l'équation générale ou celle pour un problème unidirectionnel suivant  $x$  s'écrit donc sous les formes

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}[\lambda \text{grad } T] = 0 \quad \text{II.12}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{II.13}$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'alliage à l'état solide ou liquide,  $C_p$  capacité calorifique massique de l'alliage à l'état solide ou liquide,  $\lambda$  est la conductivité thermique de l'alliage à l'état solide ou liquide,  $a$  est la diffusivité thermique de l'alliage à l'état solide ou liquide.

Au niveau du front de solidification, il faut écrire les conditions de passage. Elles se présentent sous la forme de continuité de la température au point de changement de phase, d'une part, et de conservation d'énergie autour du front, d'autre part. La conservation d'énergie représente le bilan de l'énergie entrante du côté liquide et lié au changement de phase par rapport à l'énergie sortante du côté solide. Pour un problème unidirectionnel suivant la direction  $x$ , et en notant  $s(t)$  la position du front de solidification à l'instant  $t$ , ces équations s'écrivent :

$$T_s(s) = T_l(s) = T_f$$

$$\rho \Delta H_f \frac{ds}{dt} = \lambda_s \left[ \frac{dT}{dx}(s, t) \right]_s - \lambda_L \left[ \frac{dT}{dx}(s, t) \right]_l \quad \text{II.19}$$

Où  $\frac{ds}{dt}$  représente la vitesse du front de solidification. Cette dernière équation explique qu'au front de solidification, le gradient de température n'est pas continu alors que la température l'est. La pente des profils de température doit être plus accentuée dans le solide que dans le liquide [7].

### II.4.2.2 Cas de variance de l'alliage égale à 2 (alliage dilué)

Puisque la solidification se produit sur un intervalle de température, il n'y a pas de discontinuité. Aussi il est possible d'écrire une équation de la conduction de la chaleur dans la zone pâteuse. En reprenant l'équation de bilan énergétique II.14) avec l'expression de l'enthalpie dans la zone pâteuse telle que II.15), l'équation dans la zone semi-solide devient (II.163).

$$H = f_s H_s + (1 - f_s) H_L \quad \text{II.17}$$

$$H = f_s(\rho_s C_{ps} T) + (1 - f_s)(\rho_L C_{pL} T + \rho_L \Delta H_F) \quad \text{II.18}$$

Où  $f_s$  est la fraction solide volumique qui est donnée par

$$f_s(T) = \frac{1 - \frac{mC_0}{T - T_F}}{1 - k} \quad \text{II.22}$$

Où  $T_F$  représente la température de fusion

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \rho \Delta H_f \frac{df_s}{dt} - \text{div}[\lambda \text{grad } T] = 0 \quad \text{II.193}$$

Où l'approximation  $\rho_s = \rho_l$  et  $C_{ps} = C_{pL}$  a été faite pour alléger l'écriture. Il reste à déterminer l'évolution de  $f_s$  avec le temps. C'est ici qu'il importe de connaître le mode de solidification de l'alliage induit par le transport des éléments d'alliage. Nous traitons dans la suite l'exemple simple de la solidification en équilibre thermodynamique d'un alliage binaire pour expliciter l'évolution de  $f_s$  [7].

En combinant les équations (II.22) et (II.203), on obtient

$$\left[ \rho C_p - \rho L \frac{mC_0}{1 - k} \frac{1}{(T_F - T)^2} \right] \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}[\lambda \text{grad } T] = 0 \quad \text{II.214}$$

## II.5 Conclusion

La bonne compréhension des phénomènes au cours de la coulée et le refroidissement du métal permet d'avoir un bon aperçu sur la façon de remplir les moules pour éviter l'apparition des défauts de fonderie liés au écoulement du métal, et également la manière de refroidir les pièces pour l'obtention d'une structure souhaitable, ainsi que les traitements thermiques qu'on doit effectuer pour atteindre les propriétés désirées.

Deuxième partie :  
Partie expérimentale

**CHAPITRE 3 :**  
**ETUDE DE MOULAGE**

### **III. Etude de moulage**

#### **III.1 Introduction**

Le savoir-faire du concepteur est de produire des pièces aussi économiques que possible et de répondre aux exigences du client, et vue que la production des pièces est un processus complexe qui dépendent de plusieurs paramètres, on doit donc faire une étude complète avant de commencer la production.

Dans cette étude on doit tenir compte du choix de procédé, l'alliage utilisé, la géométrie et le dessin de la pièce et plusieurs autres notions liées à la fabrication. On va faire une simulation par des logiciels développées pour avoir une meilleure idée sur la coulée et le refroidissement et connaître les potentiels défauts qui peuvent être formés pendant la solidification.

Pour cela, il est très important de comprendre la fonction exacte de la pièce et ses conditions d'utilisation.

#### **III.2 La fonction de la mâchoire de frein et ses conditions d'utilisation**

##### **III.2.1 Mâchoire de frein**

Grâce aux grands progrès technologiques dans l'industrie du transport, les véhicules sont devenus plus puissants et plus rapides. De ce fait, les systèmes de freinage doivent aussi suivre cette progression pour assurer un fonctionnement convenable avec les dernières améliorations. Le frein est un organe de sécurité, reste ainsi un sujet d'étude très actuel pour les ingénieurs.

De plus, avec la concurrence industrielle toujours croissante, les problématiques changent : en plus du souci d'efficacité, de fiabilité et de confort, s'ajoute ceux du moindre coût et du délai de fabrication. L'objectif pour l'ingénieur est de trouver le meilleur compromis entre ces exigences [15].

Les mâchoires de frein sont les supports des garnitures dans les systèmes à tambours de frein. Ceux sont des pièces métalliques incurvées sur lesquelles est fixé un matériau de friction.

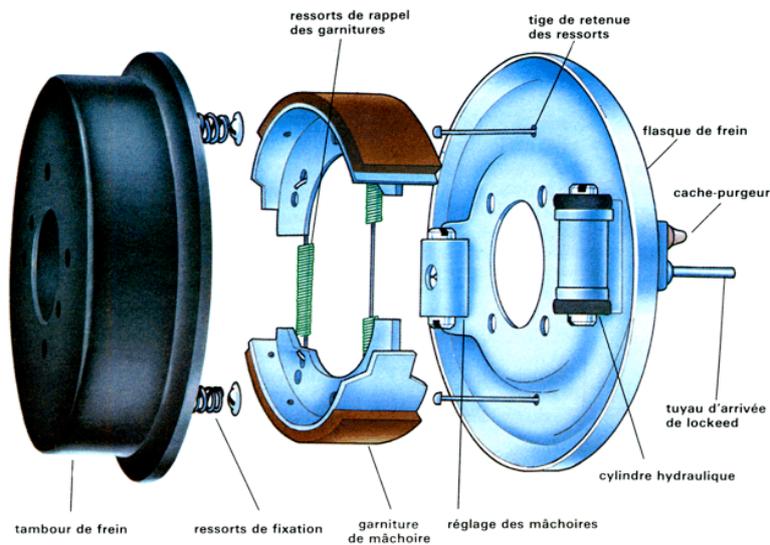


Figure III.1 : système de freinage a tambour

Lorsqu'on appuie sur la pédale de frein, un piston hydraulique (cylindre hydraulique) repousse les mâchoires de frein vers l'extérieur contre l'intérieur du tambour. Cela provoque une friction entre la garniture et le tambour qui permet au véhicule de freiner.

### III.2.2 Conditions d'utilisation

Pour comprendre la fonction exacte de la pièce et ses conditions d'utilisation on fait une pré-étude sur des pièces de même famille, et même des essais pour bien comprendre les sollicitations appliqué sur la pièce.

Cette "pré-étude" se fera en considérant un certain nombre de points, qui sont listés ci-dessous dans le tableau III-1 à titre d'exemple.

Tableau III-1 condition d'utilisation des mâchoires de frein

<b>caractéristique</b>	<b>Type</b>	<b>valeur</b>
<b>Sécurité Et maintenance</b>	type de sécurité	vitale
	coefficient de sécurité :	garantie, durable
	Maintenance	Démontage accessible
<b>Sollicitations statiques</b>	résistance en traction résistance en compression résistance en flexion résistance en cisaillement dureté ténacité	Elevée Elevée Elevée Elevée Elevée Elevée
<b>Sollicitations dynamiques</b>	Résilience	Elevée
<b>Sollicitations cycliques</b>	Résistance à la fatigue en flexion Résistance à la fatigue en Traction Résistance à la fatigue en compression,	Elevée Elevée Elevée
<b>Sollicitations physico-chimiques</b>	usure par frottement usure par abrasion température de travail résistance à la corrosion dilatation l'aspect de surface  contrainte de déformation vibration	Faible Faible ambiante Moyenne faible rugosité moyen peinturée élevée élevée

On va produire une série de 1000 pièce de mâchoires de frein destiné aux véhicules industrielles.

Lorsque ce travail de définition de la fonction de la pièce et de ses conditions d'utilisation, est bien mené ; il constitue déjà, pour la suite une aide très sérieuse à la rédaction du cahier des charges.

A ce stade, cette « pré-étude » doit normalement débaucher sur : une ébauche de la pièce, une ou plusieurs nuances d'alliages possibles et un ou plusieurs procédés de fabrication envisageables.

### III.2.3 Choix de la nuance de fonte

À partir des caractéristiques mécaniques mentionnées précédemment (tableaux III-1), qui doit contenir dans la pièce on peut choisir la nuance de fonte la mieux appropriée en comparaison par celle des principales familles de fonte (tableaux I-2 et I-4), ce choix de nuance est une question souvent complexe car les propriétés recherchées sont parfois incompatibles par exemple grande résistance à l'usure par abrasion et bonne usinabilité, on doit alors de choisir le meilleur compromis en hiérarchisant les exigences.

Pour cette pièce on travaille avec une fonte spéciale de la SNVI nommée FGS 38-15 avec la composition chimique suivant :

Tableau III-2 composition chimique de FGS 38-15

Elément	Carbone	silicium	manganèse	Soufre	magnésium	Phosphore
%	3,5 à 4	2,5 à 3	< 0,3	< 0,02	< 0,06	< 0,06

La FGS 38-15 c'est une fonte grise à graphite sphéroïdale avec des caractéristiques très proche de celle de la fonte FGS 400-18 mentionnée sur le tableau I-4, les caractéristiques de la FGS 38-15 sont les suivant :

Tableau III-3 les caractéristiques de la FGS 38-15

Nuance de la fonte	Résistance à la traction (N /mm <sup>2</sup> )	Limite élastique (N /mm <sup>2</sup> )	Allongement %	Résilience (daJ /cm <sup>2</sup> )	Dureté HB
FGS 38-15	380	270	15	1.5	137-170

### III.2.4 Le choix de procédé de fabrication

Chaque procédé de moulage, autrement dit de fabrication en fonderie, a ses avantages et limites. Celles-ci sont liées aux dimensions et au poids des pièces à réaliser et aussi les propriétés métallurgiques recherchées (une forme, une taille ou une certaine répartition du graphite, recherche d'une structure fine, absence de carbures...etc.), ou bien encore par des aspects économiques.

En effet, certains critères devront être pris en considération, car ils ont une incidence non négligeable sur le coût de conception et de production des pièces : notion de pièce unique ou de prototype, notion de petite, de moyenne ou de grande série...etc.

Dans le cas étudié on va fabriquer une grande série des mâchoires de frein, en premier temps on va fabriquer seulement 60 pièces destinées au contrôle pour donner l'accord à la fabrication de grande série, après l'accord de contrôle on démarre la fabrication de 1000 pièces pour cela on utilise des outillages métalliques en aluminium qui supportent bien les déformations mécaniques et l'érosion...par rapport aux outillages en bois et résine. Et pour but d'amortir le coût de la réalisation des outillages on peut utiliser des éléments standards (communs à plusieurs outillages comme par exemple les masselottes).

Le tableau III-4 représente un aide au choix des procédés de fabrication des fontes. Il prend en compte d'une part, les procédés de fabrication que l'on rencontre en fonderie de Rouïba, et d'autre part, des critères de sélection, tels que : limites de poids et de dimensions, notion de série, précision dimensionnelle, états de surface, surépaisseurs d'usinage...etc.

Suivant le tableau, nous avons choisis pour la fabrication du moule le procédé Silico-argileux « à vert » avec moulage machine et le procédé croning pour la fabrication des noyaux, parce qu'ils répondent aux exigences recherchées (bonne état de surface, les noyaux croning ont une grande durée de vie...etc).

Tableau III-4 aide au choix des procédés de fabrication des fontes [4]

Critères de comparaison	Procédé de moulage en sable			
	Silico-argileux « à vert »		Sable à prise par gazage « silicate-CO <sub>2</sub> »	Prise à chaud « Croning »
	main	machine		
Notion de série (quantité de pièces)	Unitaire à grande série		Petite, moyen à grande séries	
Limites de dimensions des pièces	Quelques cm à plusieurs mètres	10mm à +/-1,2m	Quelques cm à près de 2m	Quelques cm à près de 1m
Limites de poids	50g à plusieurs centaines de Kg	50g à +/- 300Kg	50g à plus de 100Kg	Quelques dizaines de g à +/-100Kg
Epaisseurs minimales	3mm			
Equivalence Ra en µm	12.5 à 25	9 à 40	5 à 10	
Précision dimensionnelle (cote nominale de pièce en mm)				
> 100 et <160	Tolérances dimensionnelles (min et max) en mm, exprimée en + ou - : exemple : 10 à 16 = +/- 5m (min) à +/- 8mm (max)			
	10 à 16	1,8 à 7	1,8 à 7	
> 630 et < 1000	16 à 25	2.8 à 11	2.8 à 11	
> 1600 et < 2500	21 à 33	3.8 à 15	3.8 à 15	
Surépaisseur d'usinage				
> 100 et <160	1,5 à 3	1,1 à 2,2	1,1 à 2,2	
> 630 et < 1000	3,5 à 7	2,5 à 5	2,5 à 5	
> 1600 et < 2500	4,5 à 9	3,2 à 6	3,2 à 6	
Economie d'usinage	Très faible	moyenne	appréciable	
cout	Faible à moyennement élevé selon la série		De plus en plus élevé	
nuance	B, R, M	B, R, M	M	
	B=bois, R=résine, M=métal			

### III.2.5 Encombrement des pièces

Le choix de châssis doit être convenable pour minimisée le cout, il doit savoir on premier temps combien de pièce porter par chaque châssis.

Tableau III-5 : Les dimensions des chassis

Pièces	Châssis	Volume (m <sup>3</sup> )
Petites	630 x 500 x 200/200	0,126
Moyennes	1090 x 880 x 400/400	0,767
Grosses	1820 x 800 x 400/400	1,165

Pour cette pièce on a utilisé le moyen châssis parce qu'il peut porter 3 pièces à la fois par contre le petit châssis peut porter qu'une seule pièce .donc le moyen châssis a l'avantage de coulée 3 pièces en même temps avec un seul system de coulée par conséquence on ne perd pas beaucoup de métal.

Avec le moyen châssis la coulé sera automatique, chose qui permet de coulé 80 moules complets par heure. Par contre, pour les petits et grands châssis la coulé est semi-automatique et prend beaucoup de temps donc ces derniers ne sont pas convenable pour les grandes séries.

### III.2.6 Aspects économiques

Avant de commencer la conception et la simulation il faut remplir un papier très important pour la production, c'est le relevé de gamme. Il contient les opérations élémentaires de production, les machines et le temps nécessaire pour chaque opération.

À partir de ces informations données au niveau du bureau de méthode, les comptables peuvent calculer le coût global d'une pièce brute, le coût des outillages et les gains qui résultent de la production, ils envoient une copie de cette revue au service marketing qui contacte le client pour l'acceptation du prix des pièces à produire, c'est la dernière étape de la pré-étude.

## III.3 Conception

Si l'on admet que l'expression du besoin constitue la première étape de cette étude, on peut considérer que la conception correspond alors à la seconde étape.

De nos jours, la planche à dessin a été remplacée, par des logiciels de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et/ou de CAO (Conception 3D Assistée par Ordinateur) qui permettent de tracer, concevoir ou modéliser la géométrie de la pièce à fabriquer. Pour représente la pièce en trois dimensions nous utiliserons le logiciel « SOLIDWORK » c'est un logicielle de CAO qui permette de réaliser une définition 3D d'un produit.



Nous recherchons une épaisseur la plus faible et la plus uniforme possible, compatible avec le procédé de fabrication envisagé, et au même temps suffisante pour répondre aux diverses sollicitations auxquelles la pièce est soumise en service.

Cette étape doit impérativement être réalisée en étroite collaboration entre le constructeur et le fondeur. C'est en fonction des procédés potentiels de fabrication et des règles de tracé des pièces.

On peut résumer brièvement ces règles à :

- La recherche d'une épaisseur « d'enveloppe » de la pièce la plus régulière possible. Il faudra éviter de créer des masses isolées qui peuvent être source de problèmes de non-conformité.
- L'assemblage des formes essentielles et/ou complémentaires par des raccordements de parois munis de rayons de congés bien tracés (congés de raccordements). En effet aucun angle vif ne peut être toléré dans ces zones.
- Un tracé favorisant le démoulage. On aura tendance en moulage sable à traiter les difficultés de démoulage (parties en contre dépouille), on peut vérifier le démoulage avec des fonctions dans le logiciel de SOLIDWORK [4].

D'après l'application de ces règles on a dessiné la pièce en 3D comme il est montré dans la figure III-3 :

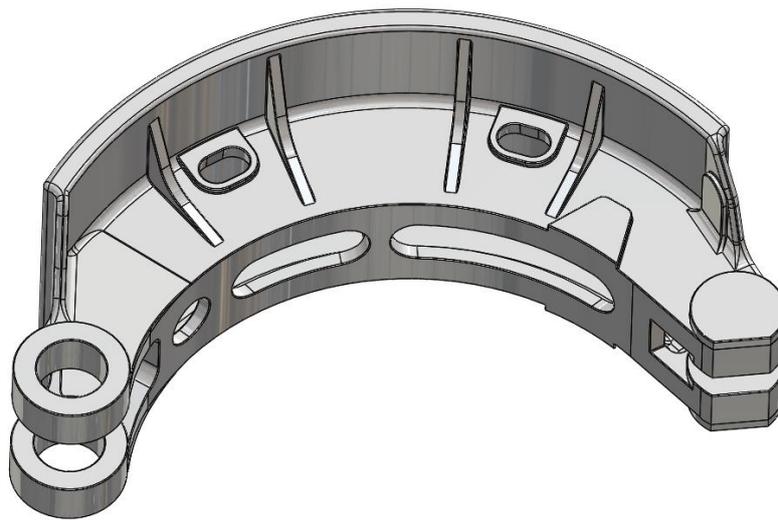


Figure III.3 le dessin 3D de la pièce avec Solidwork

Après la conception 3D de la pièce on va faire la conception 3D de la grappe (la pièce avec le système de coulée) de la même manière pour la conception de la pièce. On tient compte des normes de traçage du chenal, décente de coulée, les attaques...et à l'aide des informations mentionnées dans la pré-étude. La figure III-4 montre la conception 3D de la grappe.

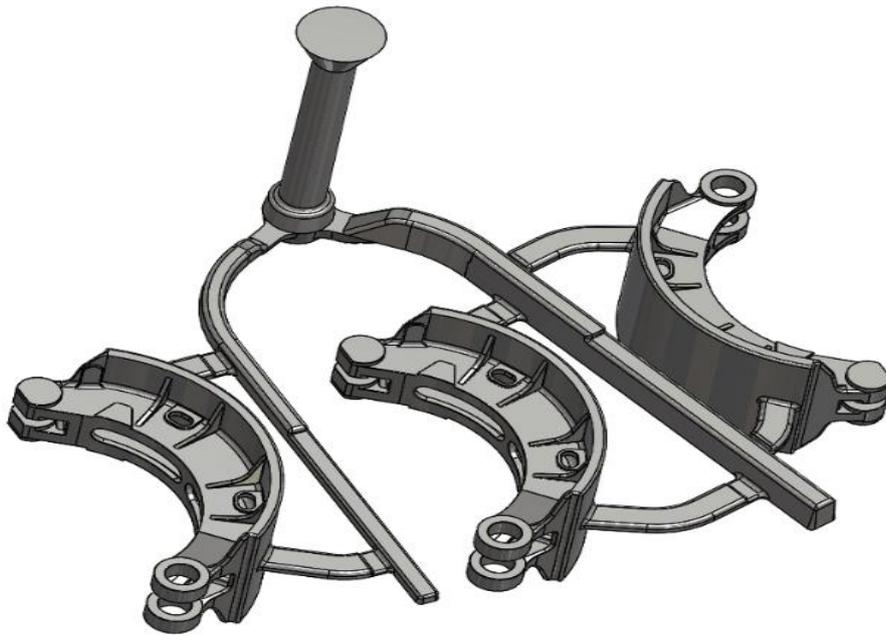


Figure III.4 le dessin 3D de la grappe avec Solidworks

#### III.4 La simulation numérique en fonderie

Le fondeur dispose aujourd'hui d'outils informatiques lui permettant de modéliser le comportement du matériau métallique coulé dans un moule, depuis le remplissage de l'empreinte jusqu'au refroidissement complet de la grappe de coulée. On parlera communément de la simulation numérique qui offre la possibilité de représenter des phénomènes physiques que l'observation sur la coulée réelle ne permet pas de mettre en évidence.

Les logiciels que l'on rencontre le plus fréquemment en fonderie résolvent par des méthodes numériques (volumes finis, différences finies ou éléments finis), les équations propres aux phénomènes thermiques et/ou hydrauliques (équations de Fourier, équations de Darcy, équations de Navier Stokes,...). Parmi ces principaux logiciels on peut citer : Quikcast et Procast de ESI ; Inspire cast de Altair ; MagmaSoft de Magma Gmbh ; Novaflow et Solid de Novacast ; Flow3D de Flow Science ;SOLIDCast de Finite Solutions ;Thercast de SC Consultants [8].

Dans cette étude nous utilisons les logicielles PROCAST et INSPIRECAST, le premier est un logicielle très développé qui assure une grande précision des résultats mais exige un micro-ordinateur avec des grandes performances et demande aussi beaucoup du temps afin de donner les résultats ; le deuxième logicielle est un logicielle plus pratique car il est un peu rapide et a la possibilité de donner des informations sur plusieurs défauts qui peut exister (le type de défaut, l'endroit ...etc).

### III.4.1 Les grandes étapes de la simulation par Procast et Inspire Cast

#### III.4.1.1 Le maillage surfacique

Il existe deux grandes familles de maillage : les maillages non structurés qui s'appuient sur la méthode de résolution des éléments finis (FEM), et les maillages structurés, qui s'appuient sur les méthodes des volumes finis (FVM) ou différences finies (FDM).

Nous sommes utilisés un maillage non structuré ; un « bon » maillage est un maillage qui permet d'avoir des résultats proches de la réalité, pour cela on utilise un maillage fin. En effet, la méthode des éléments finis consiste à interpoler la valeur des fonctions à l'intérieur des mailles, donc plus la maille est grande, plus l'écart entre la valeur « réelle » de la fonction et sa valeur interpolée sera grand. La figure montre le degré de raffinement.

Un maillage fin implique un grand nombre de mailles et de nœuds, donc nécessite une grande puissance et un long temps de calcul. Les valeurs du résultat ne sont calculées qu'aux nœuds du réseau, les valeurs aux autres points sont déterminées par interpolation ; si le gradient est important (la valeur varie rapidement), l'erreur commise est plus importante. Il est donc nécessaire de raffiner le maillage aux endroits où la courbure de la pièce est importante [8].

Pour une forme de maille donnée, la maille est essentiellement définie par deux paramètres :

- Sa taille  $h$ , qui est le rayon de la sphère dans laquelle il est inscrit.
- Le degré  $p$  du polynôme décrivant le côté ou l'arête de l'élément.

On peut donc raffiner soit en diminuant la taille des éléments « raffinements de type  $h$  » ou en augmentant le degré des éléments « raffinement de type  $p$  ».

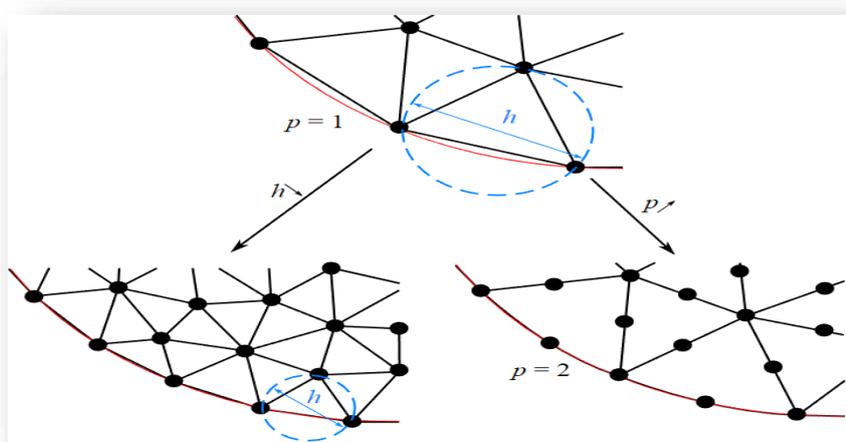


Figure III.5 : le degré de raffinement [8]

On se contentera de raffiner uniquement aux endroits nécessaires, afin d'alléger le coût du calcul (ressources informatique et temps nécessaire).

Avec le logiciel Procast on peut définir le type de maillage et le raffinement souhaitable comme il montre dans la figure III-6, par contre le logiciel Inspire Caste ne permette pas de choisir ces caractéristiques.

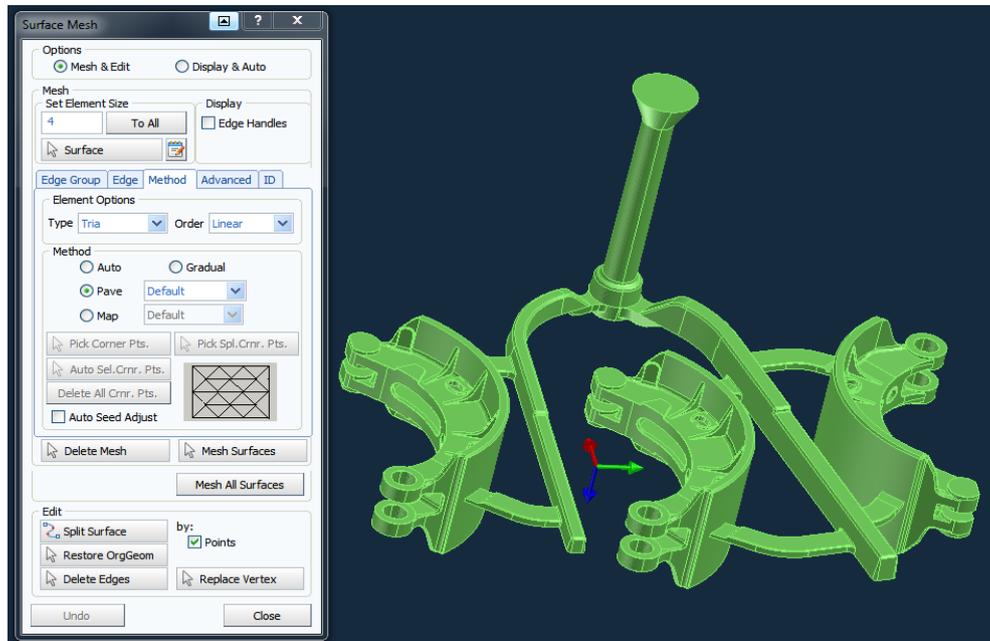


Figure III.6 choix du maillage surfacique par Procast

### III.4.1.2 Le maillage volumique

Une étape importante en simulation est le maillage volumique qui est généré à partir de la définition surfacique précédente et consiste à décomposer en volumes élémentaires la pièce étudiée, généralement des petits cubes, parallélépipèdes rectangles ou tétraèdres [8].

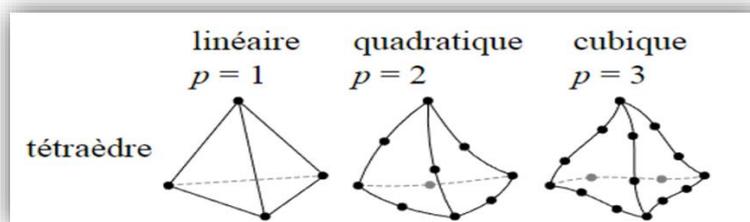


Figure III.7 : degré de raffinement de maillage tétraédrique

### III.4.1.3 Les conditions aux limites

Dans cette étape on va se concentrer sur la coulée du métal, pour cela on va étudier son environnement afin d'obtenir une pièce moulée.

- on définit la direction du vecteur gravité, la direction de ce vecteur définit le sens de coulée dans ce cas la direction selon l'axe  $[+Z]$  comme il montre dans la figure III-8.

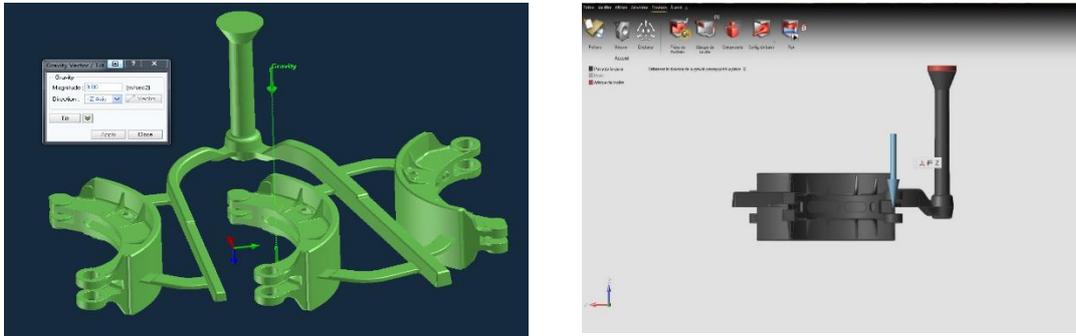


Figure III.8 : définition de la direction de coulée par Procast

- Pour définir le châssis de l'outillage à coulée on prend en considération ses dimensions dans les champs de remplissage concernant la hauteur, largeur et profondeur du châssis. Notre châssis est défini géométriquement par  $[1090, 880, 400]$  mm comme il montre dans la figure III-9. Pour finir cette procédure on ajuste la limite à la surface relative à l'entonnoir avec la surface du châssis relative au demi-moule supérieur du châssis

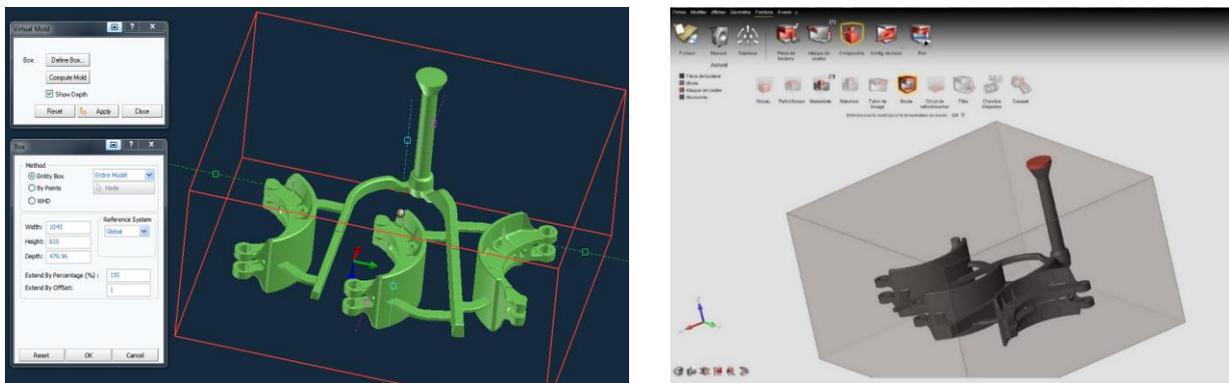


Figure III.9 : définition géométrique du châssis

Après la définition des châssis le Procast et Inspire Cast font automatiquement le maillage du sable avec les mêmes paramètres du maillage de la grappe (type de maillage, degré de finesse...).

La simulation de remplissage et de solidification par nécessité d'intégrer pour les calculs les données thermo-physiques des matériaux sont généralement :

- les températures (liquidus et solidus), les chaleurs (latente et spécifique), la masse volumique, la fraction solide, la conductivité thermique, l'enthalpie massique, les viscosités (dynamique et cinématique) ...toute cette donnée existe déjà dans la base des données de Procast. Alors, il suffit de donner la nuance de la fonte et les types des sables de moulage et de noyautage utilisée.
- les conditions initiales (températures du moule et de l'alliage) la figure III-10 montre comment on peut choisir ces conditions.

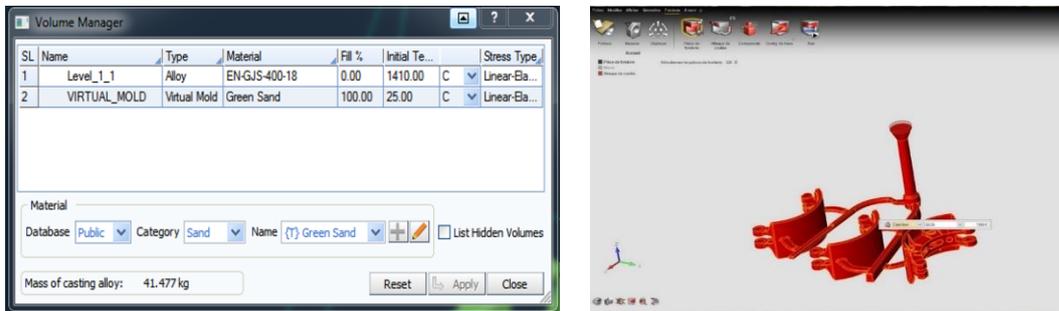


Figure III.10 choix de la nuance de la fonte et les sables avec les conditions initiales

On définit l'entonnoir de coulée ou le métal est injecté dans le moule comme montre dans la figure III-11.

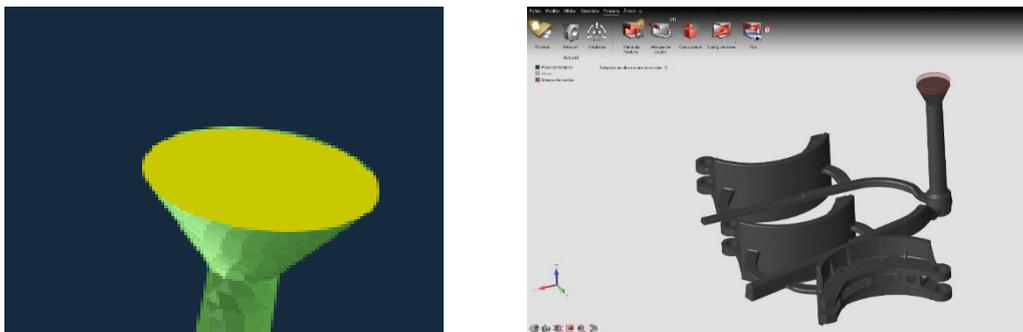


Figure III.11 : définition d'entonnoir de coulé par Inspire Cast

### III.5 Les résultats

les résultats permettent de visualiser le remplissage d'un moule par mise en évidence, à tout instant du remplissage, du gradient de températures, des vitesses et des pressions, et des temps de remplissage (global et partiels), les taux de fractions liquide et solide les transferts de chaleur au travers des matériaux de moulage et de noyautage.

Et aussi, les critères de compacité et en précisant surtout les zones de dernière solidification « points chauds » qu'il faudra masselotter, refroidir, ou dont il faudra modifier le tracé.

Notons que le logiciel PROCASTE est un logiciel très puissant qui donne presque dans tous les cas des résultats très proche au réel, mais pour gagner les avantages des deux logicielles aux même temps nous donnons les résultats de PROCAST et on ajoute les résultats qui existent uniquement dans INSPIRE CAST.

## III.5.1 Le remplissage et refroidissement

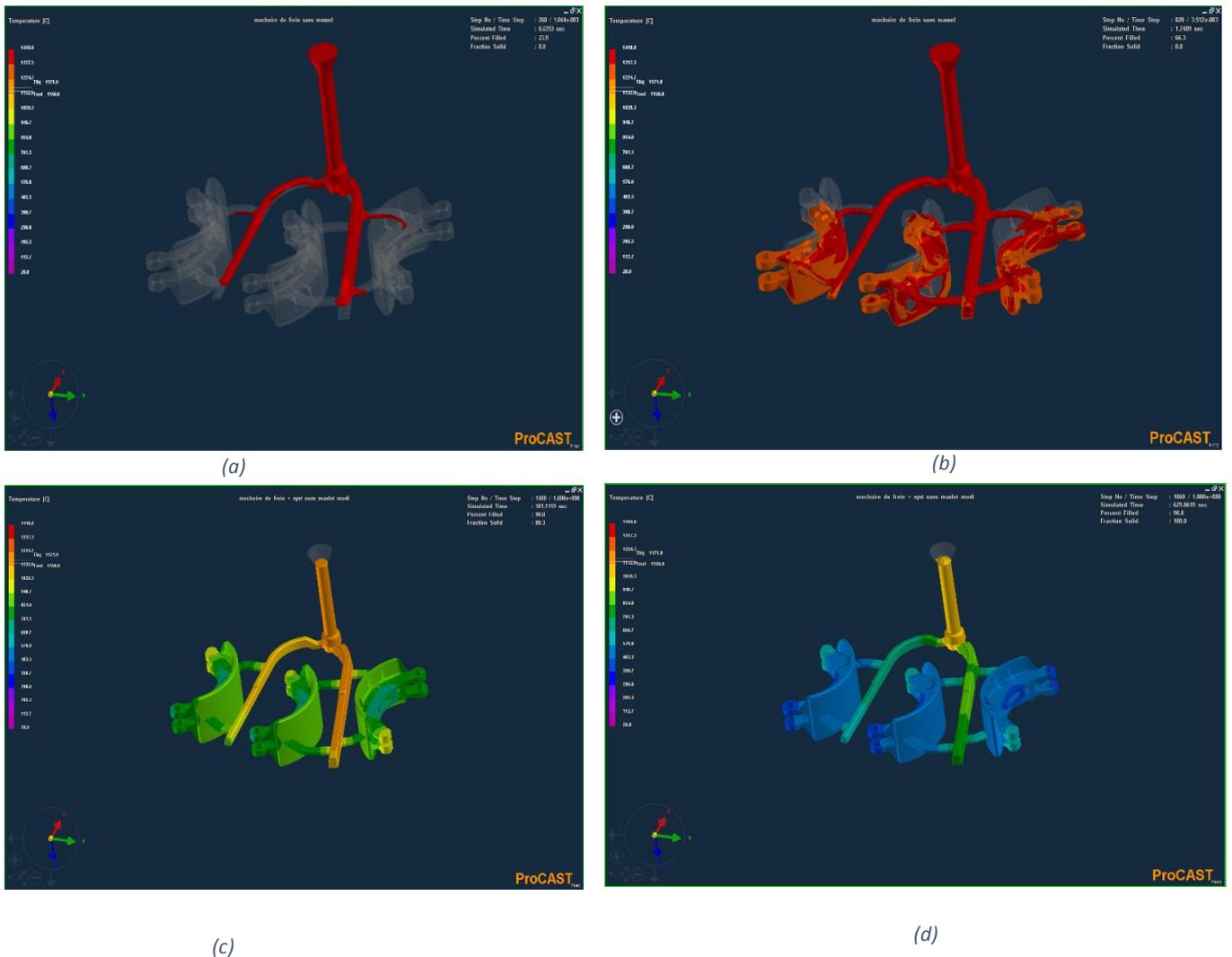


Figure III.12 : Simulation de remplissage et refroidissement par Procast

La figure ci-dessus représente le remplissage de moule, on remarque que les trois pièces de châssis sont complètement remplies et de façon homogène, figure (a), (b) et (c).

La température du métal n'est pas uniforme sur tout point de la grappe, de sorte que les endroits minces se solidifient en premier ce qui montre dans la figure (c) et (d). Le chenal se solidifie après les pièces qui assurent le remplissage complet des pièces et au même temps permet le déplacement des défauts de fonderie des pièces vers le chenal.

### III.5.2 Les défauts indiqués dans la simulation

La simulation montre qu'il existe plusieurs types des défauts, et pour le but d'optimisation ou l'élimination de ces défauts il faut en premier temps classer, comprendre les causes et définir leurs aspects.

#### III.5.2.1 Porosité

La simulation numérique par logicielle Inspire Cast indique qu'il existe un défaut de type porosité, cette porosité s'affiche ce forme des endroits de couleur rouge comme il montre dans la figure III-13.

Ce défaut de fonderie caractérisé par une cavité interne à parois fouillées et oxydées. Cette cavité communique toujours avec l'extérieur ; Il prend naissance par la formation d'une retassure au voisinage des parois par suite le retrait du métal liquide crée une dépression intérieure permettant à la pression atmosphérique de crever la croûte solidifiée et de faire pénétrer de l'air à l'intérieur de la retassure initiale.

La forme de la pièce est à considérer parce que c'est elle qui est généralement responsable de l'existence de points chauds où la peau peut être crevée par la pression atmosphérique.

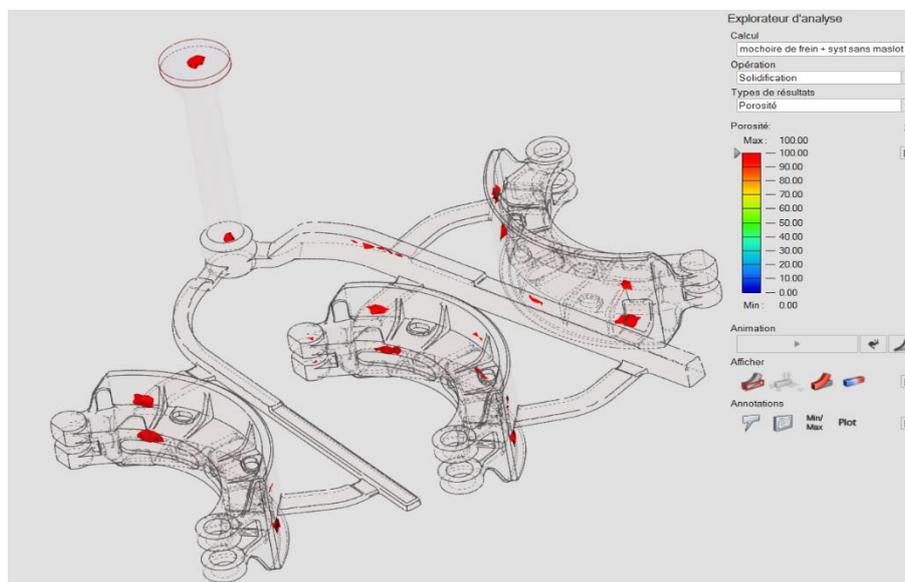


Figure III.13 : Prédiction d'un défaut de porosité par Inspire Cast

#### III.5.2.2 Microporosité

Ce défaut de fonderie caractérisé par la présence, au sein du métal de la pièce, de plages spongieuses dans lesquelles on peut distinguer, à faible grossissement, une série de petites cavités tapissées de cristaux dendritiques oxydés. Les petites cavités communiquent toujours avec l'extérieur par de petits canaux qui ne sont pas toujours visibles à l'œil nu.

La microporosité est un défaut ayant exactement le même processus de formation que le défaut « porosité », d'une part dépression intérieure par suite du retrait et d'autre part action de la pression atmosphérique à l'extérieur et hétérogénéité dans le refroidissement de la pièce,

provoquée par un mauvais séchage local, peut également être les causes de ce défaut l'Inspire Cast indique qu'il existe ce défaut comme il montre dans la figure III-14.

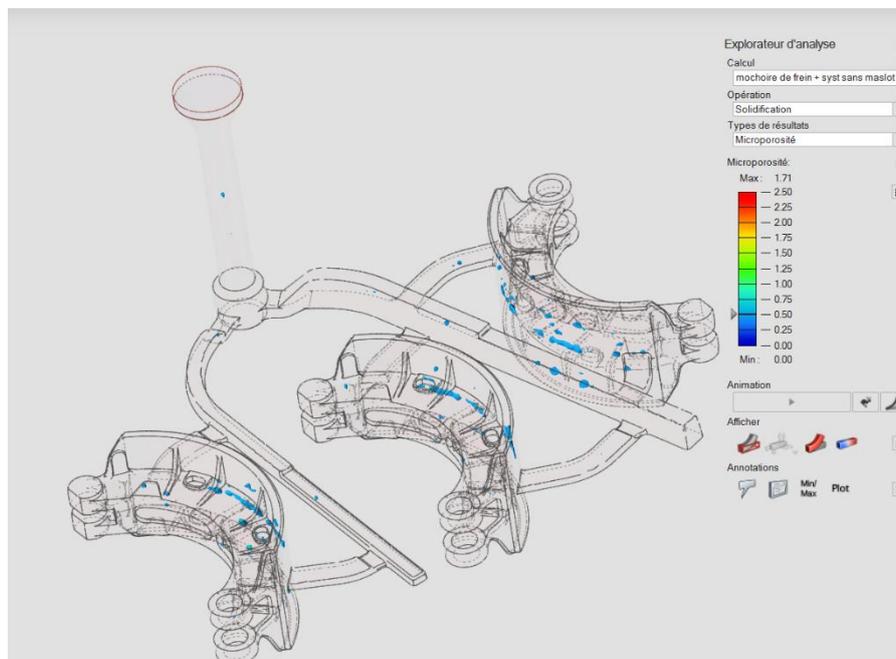


Figure III.14 : Prédiction d'un défaut de microporosité par Inspire Cast

### III.5.2.3 Reprise

Ce défaut caractérisé par la présence au sein de la pièce d'une discontinuité du métal avec une surface oxydée. Il est produit par un arrêt momentané de la coulée ou par la jonction sans soudure de deux courants de métal liquide. Il s'affiche sous forme des endroits des couleurs différentes come il montre dans la figure III-15.

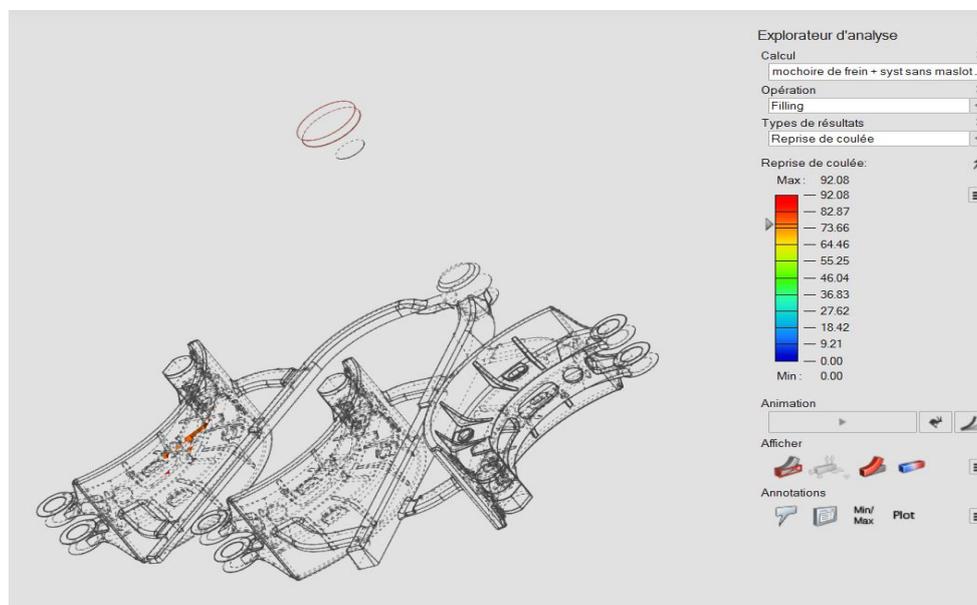


Figure III.15 : Prédiction d'un défaut de reprise par Inspire Cast

### III.5.2.4 SOUFFLURE

Ce défaut de fonderie caractérisé par une cavité interne, lisse, oxydée et qui est provoquée par l'emprisonnement d'air ou de gaz au sein du métal de la pièce.

Il y a lieu d'insister ici sur l'influence de la quantité de gaz dégagés et sur celle de la haute température du métal sur la pression de ces derniers. Plus les moules et noyaux contiendront d'humidité et d'éléments susceptibles de brûler ou de dégager des matières volatiles et plus la pression des gaz monte très rapidement.

Ces gaz pénètrent dans le métal liquide, car leur pression est supérieure à la pression ferrostatique ; les bulles de gaz qui ont pénétré dans la pièce y constituent des soufflures lorsqu'elles sont arrêtées dans leur ascension par la solidification du métal. Celles qui sont emprisonnées au cours de leur cheminement constituent des soufflures dites internes ; celles qui sont arrêtées par la croûte supérieure déjà solidifiée produisent des soufflures de peau.

Les soufflures s'affiche sous forme des endroits des couleurs différentes, il est presque localisé dans la partie supérieure de pièce come il montre dans la figure III-16.

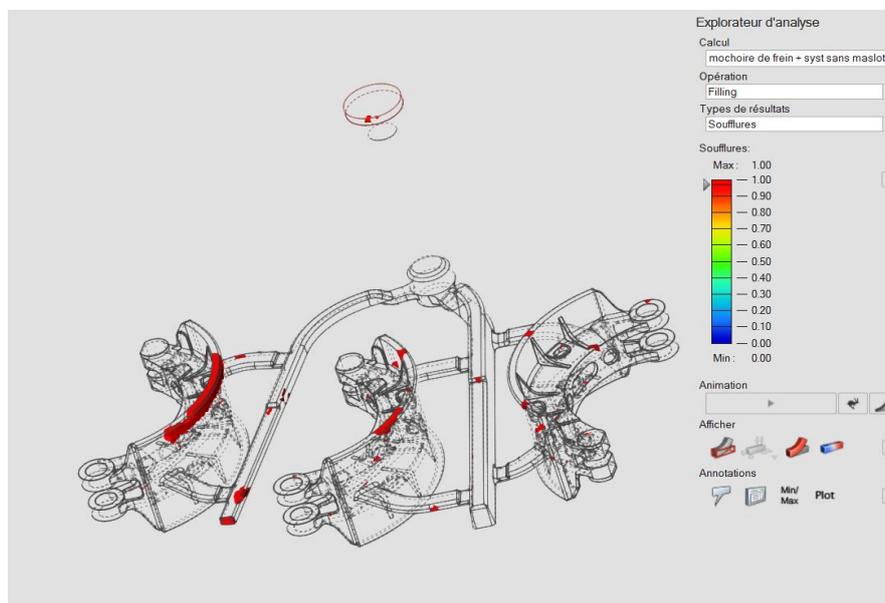


Figure III.16 : Prédiction d'un défaut de soufflure par Inspire Cast

### III.5.2.5 EROSION

Ce défaut de fonderie caractérisé par une légère excroissance métallique rugueuse se produisant à un endroit où le sable a été superficiellement rongé par l'action dynamique du métal en fusion.

Le métal versé dans les moules exerce sur le sable des actions dynamiques et thermiques particulièrement dangereuses aux endroits par lesquels il passe en forte quantité.

Un courant liquide intense provoque le dessèchement de la croûte superficielle des moules et noyaux et il y produit de petites fissures. Ceci a pour résultat une réduction considérable de la résistance locale du sable et permet, dans certains cas, aux jets ou courants du métal liquide de décoller et d'entraîner certains grains par lavage.

L'apparition du défaut est donc intimement liée à l'adhérence des grains de sable entre eux et à la cohésion initiale de ce dernier qui doit être d'autant plus élevée que la diminution de résistance sur laquelle on doit compter est elle-même plus importante.

L'érosion est donc à redouter lorsque la cohésion du sable est insuffisante et, en particulier, quand la teneur en argile est trop basse. Elle se produit avec d'autant plus de facilité que la vitesse de circulation des courants de métal en fusion est grande et que la direction des jets se rapproche davantage de la normale aux points considérés de la surface des moules ou noyaux.

La pièce dans ce cas présente en un ou plusieurs points de sa surface, de légères excroissances métalliques rugueuses auxquelles du sable adhère fortement.

Ce défaut s'affiche dans le chenal de différent couleur selon l'intensité de défaut ça se situe entre des faibles intensités (couleur Blue) jusqu'à des importantes intensités (couleur jaune) comme il montre dans la figure III-17.

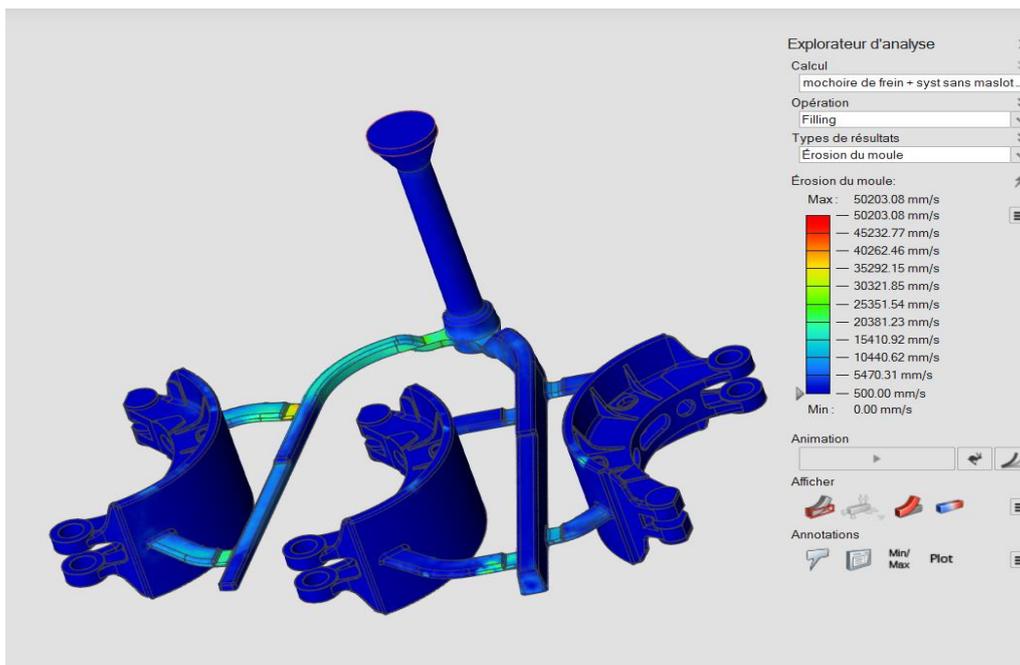


Figure III.17 : prédiction d'un défaut d'érosion par Inspire Cast

### **III.5.3 Autre défauts courantes**

En tenir compte aussi les défauts de fonderie ont l'habitude à ce former comme la crasse, ségrégation, inclusions de noire, piqûres, rugosité...

#### **III.5.3.1 CRASSES**

Défaut de fonderie caractérisé par l'emprisonnement, dans la pièce, d'impuretés telles que oxydes, matières réfractaires, mélanges d'oxydes et de sable, etc., qui recouvrant le métal dans la poche, ont été entraînés dans le moule pendant la coulée.

Ces inclusions non métalliques est a formes irrégulières et dont la coloration est généralement sombre. Dans le cas où elles contiennent des grains de sable, ceux-ci voisinent toujours avec des oxydes. Ces inclusions sont visibles à l'œil nu et ont parfois des dimensions assez importantes.

#### **III.5.3.2 SÉGRÉGATION**

Défaut de fonderie caractérisé par une hétérogénéité de la composition chimique de l'alliage constituant la pièce. La ségrégation due à la diminution de la solubilité de certains éléments dans l'alliage au cours du refroidissement. Les éléments devenus insolubles sont rejetés dans le liquide, ces impuretés s'accumulent finalement en bonne partie aux endroits de fin de solidification. Souvent, cette ségrégation est visible à l'œil nu, aussi lui donne-t-on le nom de ségrégation macroscopique ou majeure. On peut y observer une coloration du métal différent assez nettement de celle existant aux autres endroits. Cette différence de coloration apparaît soit par simple examen, soit après traitement de l'échantillon par les réactifs macrographiques usuels. A titre d'exemple de ségrégation, on peut citer les accumulations de sulfures et phosphore au cœur des pièces en fonte, ainsi que les amas de paillettes de graphite dans certaines pièces en fonte grise.

#### **III.5.3.3 INCLUSIONS DE NOIR**

Défaut de fonderie caractérisé par l'emprisonnement des particules de noir dans le métal de la pièce.

Ces inclusions sont constituées par des particules de noir de fonderie qui se sont détachées de la surface des moules et noyaux avant ou pendant la coulée et qui ont été emprisonnées dans le métal de la pièce au cours de la solidification.

Les inclusions de noir se présentent sous forme des lamelles de faible épaisseur et sont orientées en tous sens. Elles ont une coloration noire.

### III.5.3.4 PIQÛRES

Défaut de fonderie caractérisé par la présence, à la surface de la pièce, d'une série de petites cavités en forme d'entonnoirs dont les parois sont lisses et oxydées. Ces cavités sont la conséquence de l'emprisonnement d'air ou de gaz entre métal et moule en cas de refroidissement superficiel rapide du métal.

### III.5.3.5 RUGOSITÉ

Défaut de fonderie caractérisé par la présence sur la pièce de nombreuses petites aspérités dues à l'état rugueux de la surface des moules et noyaux.

D'une façon générale, on peut dire que le métal prend l'empreinte du moule dans ses moindres détails et c'est là, d'ailleurs, une des qualités essentielles d'un bon moulage.

Au cas où le sable serré immédiatement contre le modèle est à gros grains, la surface du moule obtenu sera rugueuse et les creux ou aspérités qu'elle présente seront reproduits sur la pièce. Il sera de même lors de l'utilisation d'un sable contenant de l'argile en petites mottes.

Dans ces deux derniers cas, le frottage insuffisant laisse subsister dans le sable des mottes d'argile et de petits amas de grains jouant eux-mêmes un rôle identique aux gros grains. Il est à remarquer que ceci se produit avec facilité lorsque la teneur en humidité du sable est exagérée.

## III.5.4 Optimisation des défauts

A partir des informations données précédemment sur les défauts qui apparaissent au cours de la solidification, on peut imposer des remèdes précis pour éliminer ou optimiser ces défauts.

### III.5.4.1 Les remèdes aux défauts de fonderie « porosité et microporosité »

Comme la porosité et la microporosité sont des défauts de même nature les remèdes généraux sont les mêmes. On attachera une attention toute particulière à la suppression des points dangereux ou à l'atténuation de leur effet néfaste. La masselotte est ici le meilleur remède.

Avec la masselotte, on arrive toujours à d'excellents résultats ; la seule chose à faire est de choisir convenablement la masselotte, sa position, ses attaches et de toujours bien veiller à ce que le métal puisse arriver à l'endroit dangereux de la pièce [12].

Pour respecter ce point important, il faut placer la masselotte le plus près possible de ce point ou prévoir des épaisseurs suffisantes entre ce point et la masselotte pour que la communication reste ouverte le temps voulu.

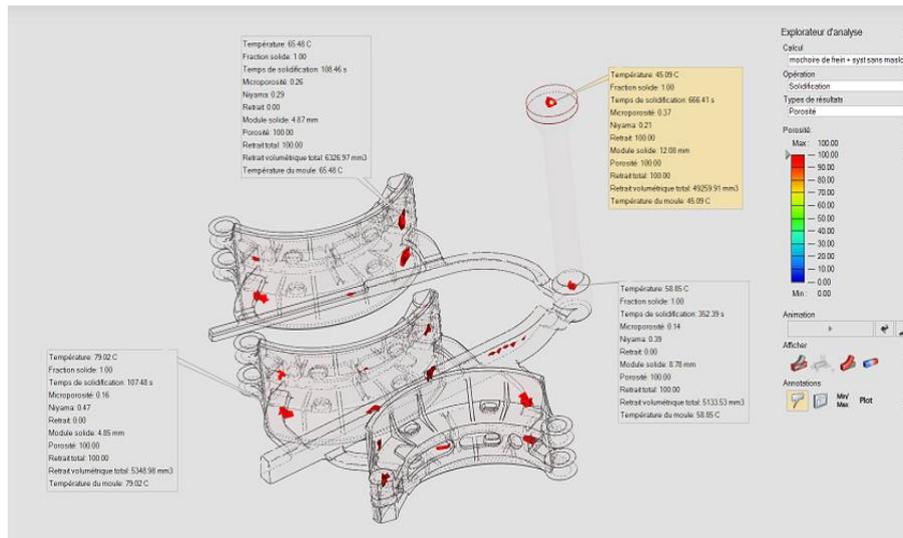


Figure III.18 : les caractéristiques des endroits qui contiennent le défaut de porosité

On place les masselottes dans les endroits qui contiennent beaucoup de défaut .La figure III-18 présent les endroits des défauts de porosité avec ces caractéristiques tel que température, le temps de solidification, le module solide ... etc.

Pour cela le module solide ( $M_p$ ) est majoré de d'un coefficient de sécurité pour obtenir le module masselotte ( $M_m$ ) satisfaisant à la loi de refroidissement.

$$M_m = M_p \times \text{coefficient de sécurité}$$

$$M_m = 9.74 * 1.4 = 13.636mm$$

On doit calculer les dimensions de la masselotte

Le diamètre

$$D = M_m * 5 = 13.636 * 5 = 68.18mm$$

La hauteur

$$H = D * 1.5 = 68.18 * 1.5 = 102.27mm$$

Ces calcule peut effectuer par l'Inspire Cast, il peut nous donner les dimensions de masselotte directement (figure III-19).



Figure III.19 : dimensions des masselottes par Inspire Cast

On déduit ensuite les dimensions de la masselotte de référence suivant le tableau III-6, alors on choisit la masselotte avec le diamètre 85 (mm) pour mieux de sécurité.

Tableau III-6 : Les masselottes de référence

$\Phi$ (mm)	surface (dm <sup>2</sup> )	Volume (dm <sup>3</sup> )	Module (mm)
50	1.6	0.16	10
55	1.9	0.22	11
60	2.3	0.3	12
65	2.6	0.35	13
70	3.07	0.45	14
75	3.53	0.55	15
80	4.04	0.67	16
85	4.52	0.80	17
90	4,45	0,76	0,17
95	4,96	0,90	0,18
100	5,49	1,05	0,19

Il faut aussi respecter la règle des distances d'alimentation (ou Rayons d'action) qui représente l'aptitude d'une masselotte à délivrer du métal liquide à la pièce sur une distance donnée.

Cette notion est directement liée au mode de solidification, à l'épaisseur et à la forme des parties de pièce à masselotter. Cette règle détermine pour une partie de pièce, le nombre nécessaire de masselottes identiques (de mêmes dimensions) à mettre en place sur la pièce et leur distance respective, afin de garantir sa santé interne. Pour cela on place deux masselottes de diamètre 85 (mm) pour chaque pièce.

#### **III.5.4.2 Les remèdes au défaut de fonderie « REPRISE »**

- On supprime les solidifications prématurées par l'augmentation de la coulabilité de l'alliage.
- On supprime les courants liquides multiples par la modification de la position des tranches de coulée et on évitant les arrêts dans la coulée.

#### **III.5.4.3 Les remèdes au défaut de fonderie « soufflure »**

- On réduit la pression des gaz par la réduction de l'humidité du sable.
- On réduit la quantité de matières volatiles et de gaz de combustion dégagés.
- On facilite l'évacuation des gaz par l'augmentation de la perméabilité du sable donc on choisit un sable à grain plus gros et on multiplie les chemins de sortie des gaz (les événements).

#### **III.5.4.4 Les remèdes au défaut de fonderie « ÉROSION »**

- On réduit l'action du métal en fusion sur le sable en réduisant la vitesse d'entrée du métal dans le moule.
- On améliore la résistance du sable par l'augmentation de la cohésion du sable à vert.

#### **III.5.4.5 Les remèdes au défaut de fonderie « INCLUSIONS DE NOIR »**

- On améliore l'adhérence du noir au sable par l'augmentation de sa teneur en argile.
- Lors de la préparation du noir liquide, on évite une trop grande consistance.

#### **III.5.4.6 Les remèdes au défaut de fonderie « PIQURES »**

- On diminue la quantité d'air et de gaz. L'humidité du sable étant ici la cause de la formation de piqures, on veillera à sécher au mieux les moules et noyaux.
- On ralentit la solidification de la couche superficielle, de façon à permettre l'évacuation partielle des gaz à travers le métal.

#### **III.5.4.7 Les remèdes au défaut de fonderie « rugosité »**

- On utilise un sable à grains fins.
- On améliore la finesse du sable par addition de matières pulvérulentes comme le noir minéral.

### III.5.4.8 Les remèdes au défaut de fonderie « ségrégation »

On cherche à diminuer les éléments nuisibles. Dans le cas des fontes on réduit les teneurs en soufre et en phosphore.

Après l'application de ces remèdes on obtient un nouveau dessin de grappe qui contient dans laquelle les dispositifs de masselottage et les événements (figure III-20).

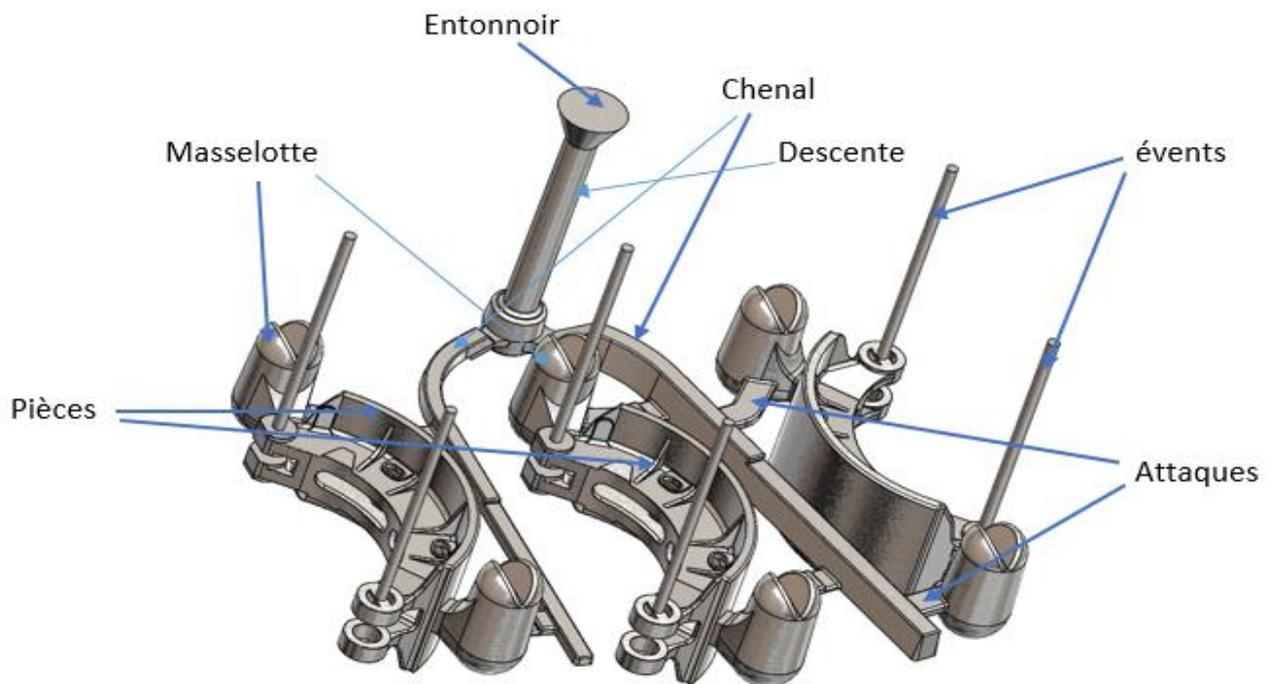


Figure III.20 : dessin 3D de la grappe après les changements

### III.5.5 Les résultats de simulation après l'optimisation des défauts

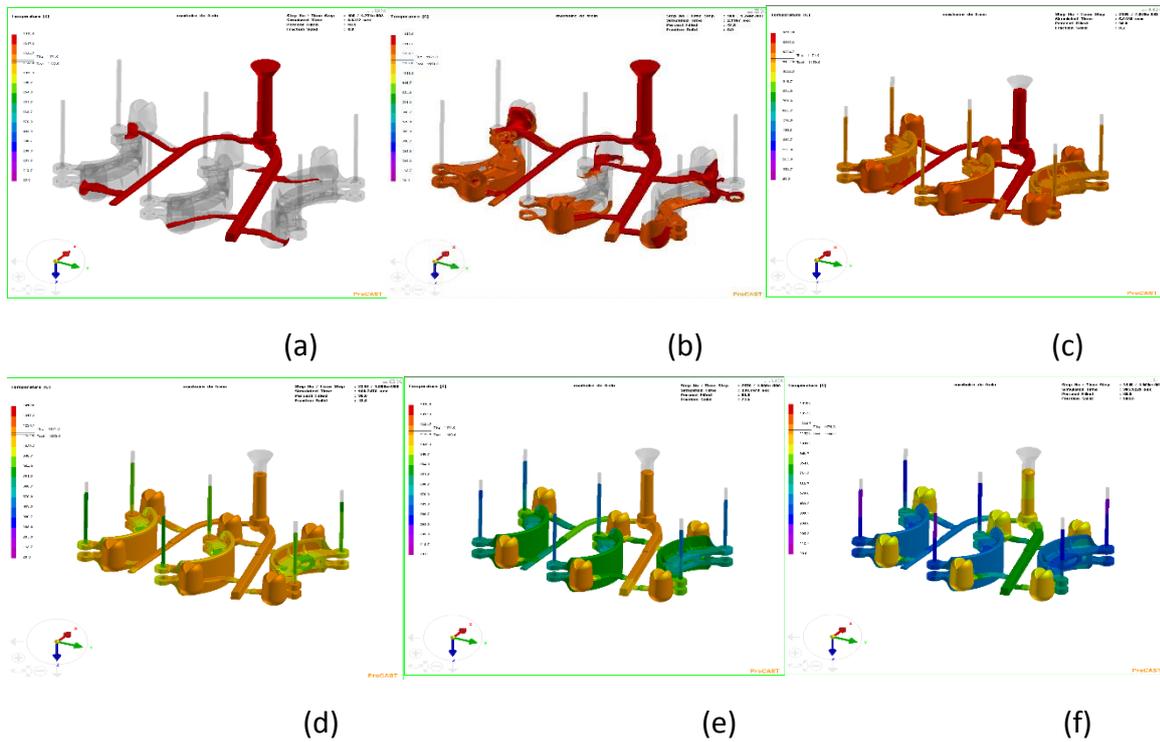


Figure III.21 : simulation de remplissage et refroidissement de grappe avec masselotte par Procast

La figure ci-dessus représente le remplissage de moule, on remarque que les trois pièces de châssis sont complètement remplies et de façon homogène, figure III-21 (a), (b), (c).

On remarque que la température du métal n'est pas uniforme en tout point de la grappe, de sorte que les masselottes se solidifient en dernier .figure III-21 (d), (e), (f). Donc elles peuvent fournir son métal à la pièce pour compenser la contraction de volume à cause du retrait de métal. Par conséquent la masselotte attiré ces défauts.

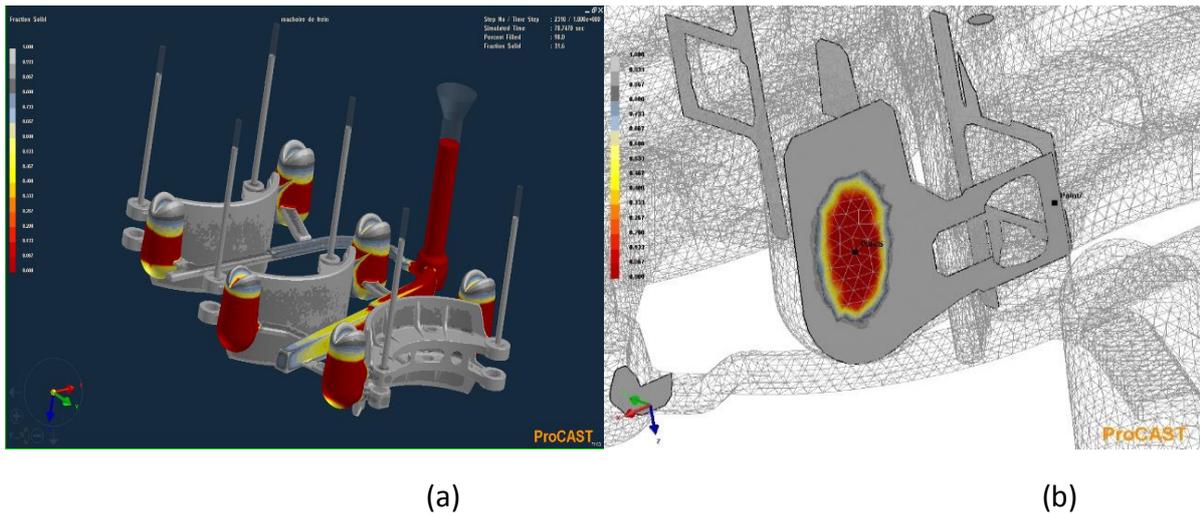


Figure III.22 : module solide de la grappe avec masselotte par Procast

(a) fraction solide, (b) coupe de masselotte

On peut vérifier le bon fonctionnement des masselottes par Procast. La fraction solide dans la figure III-22 (a) montre que les masselottes sont les partie qui solidifie en dernier, la figure III-22 (b) permet de visualise la dernières zone de solidification

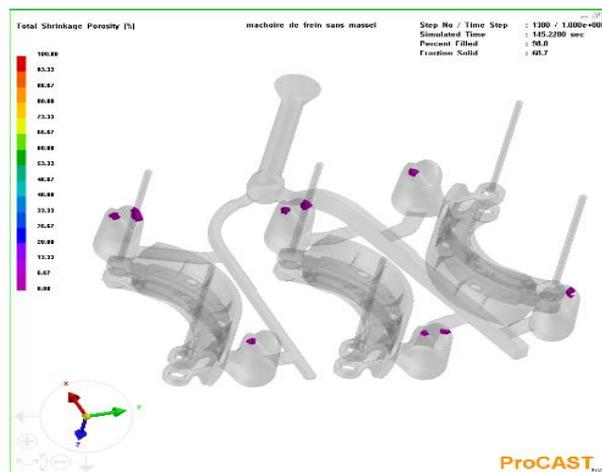


Figure III.23 : prédiction de porosité par Procast

Les défauts de porosité apparaissent dans les masselottes seulement car les masselottes compense le retrait des pièces, donc avec les masselottes on peut éliminer les défauts de retrait (figure III-23).

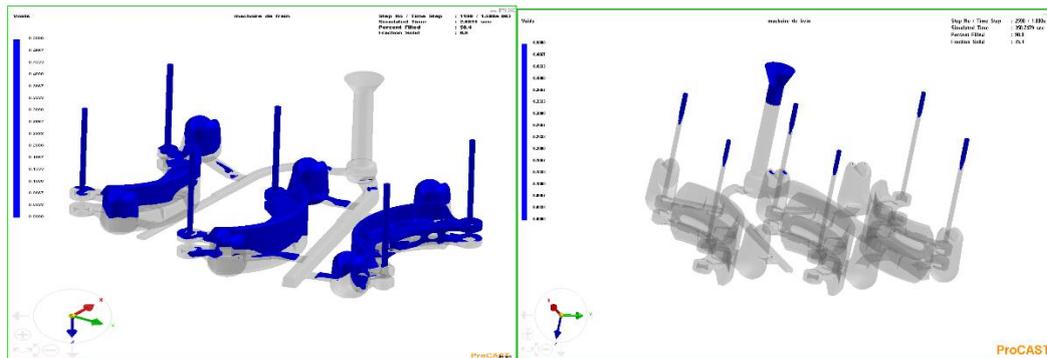


Figure III.24 : évacuation des gaz par Procast

On remarque dans ce cas présenté dans figure III-24 une bonne évacuation des gaz de les pièces vers l'extérieur à travers les événements de telle sorte que les défauts de soufflures et piqures sont presque éliminés.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les grandes étapes suivies pour faire l'étude de moulage d'une série de 1000 pièces de mâchoire de frein. Tout d'abord, nous avons commencé par une pré-étude qui contient la définition des pièces à fabriquer « mâchoires de frein », leurs conditions d'utilisation, le choix du nuance de la fonte et le procédé de fabrication. La pré-étude permet de vérifier la bonne adéquation entre le produit moulé et le procédé de fabrication.

Ensuite, nous avons fait la conception, dans laquelle on va définir la forme générale de la pièce et établir un dessin 3D de la pièce brute.

Enfin, nous avons fait la simulation par les logiciels ProCAST et Inspire Cast, qui peuvent nous donner des informations très utiles sur la coulée et le refroidissement du métal et de même sur les défauts de fonderie qui peuvent apparaître. La simulation de fonderie est un outil indispensable d'aide à la prise de décision lors des phases de conception et l'industrialisation d'un produit manufacturé. À partir de cette étude on peut commencer la fabrication des pièces.

**CHAPITRE 4 :**  
**REALISATION DES**  
**PIECES**

## IV. Réalisation des pièces

### IV.1 Introduction

Le moulage en sable consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisé d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir. Le moulage en sable est le procédé le plus ancien et convient presque pour tous les métaux et alliages de moulage.

Un moule simple est constitué de deux parties : la partie supérieure et la partie inférieure. Le métal en fusion est coulé à travers le trou du système de coulée, en traversant les canaux jusqu'au remplissage de l'empreinte. Après refroidissement et solidification, la pièce est sortie pour subir les différentes opérations de finition.

### IV.2 Préparation de Plaques modèle

Premièrement, on fabrique le modèle dont la géométrie et les dimensions sont assez semblables au dessin de la pièce brute. Cet outillage permet d'obtenir l'empreinte de la pièce à fabriquer dans le moule. Il restitue le plus souvent la forme extérieure de la pièce et est conçu en bois, en polystyrène expansé, en résine ou en métal.

Le modelleur réalise les plaques modèles à partir de plan de la grappe donnée par le bureau des méthodes, ce plan comporte la pièce et toutes les composantes de système d'alimentation tel que chenal, les attaques de coulée, les masselottes, troue de coulée...etc.

Le moulage mécanique est réalisé seulement avec des plaques modèles métalliques. Dans notre cas, la plaque modèle choisie est en alliage d'aluminium, car l'aluminium résiste bien à l'usure et l'abrasion par rapport au bois et résine. Au même temps, il est léger et usinable.

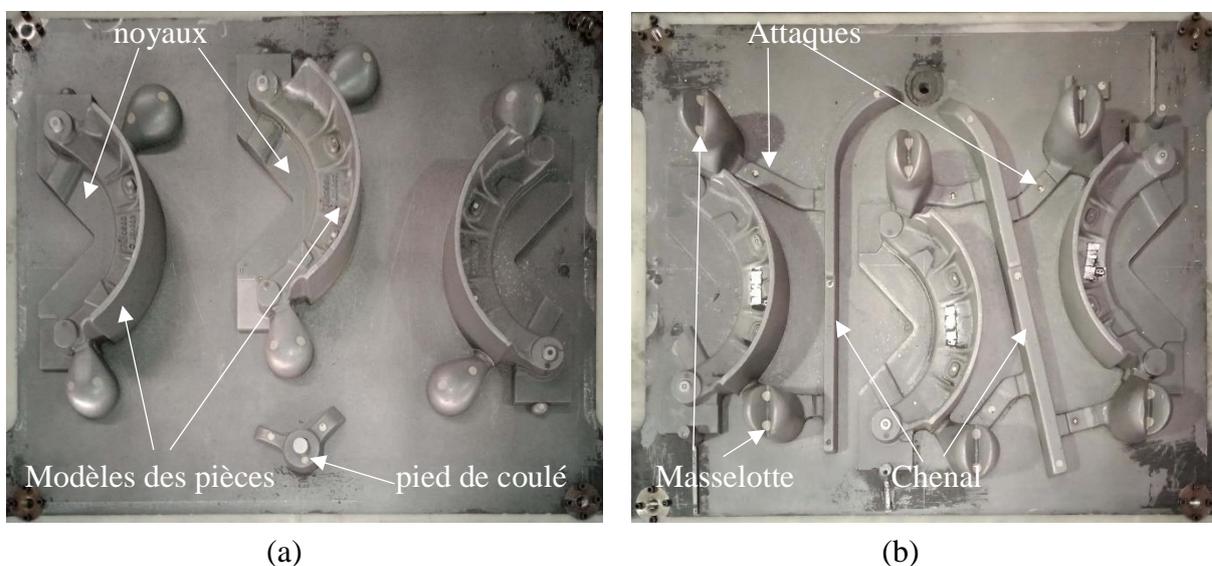


Figure IV.1 les plaques modèles  
(a) partie inférieure, (b) partie supérieure

La figure IV-1 montre les différentes parties de plaque modèle tel que (a) partie inférieure et (b) partie supérieure.

### IV.3 Préparation de sable de moulage

La préparation et la régénération des sables récupérés après décochage se font dans des installations appelées sableries où les sables sont tamisés, concassés, dépolvérisés et refroidis (dans certains cas avant d'être malaxés et mélangés dans les broyeurs avec les apports d'eau et d'adjuvants, bentonite, noir minéral, etc.), pour être ensuite envoyés aux machines à mouler.

### IV.4 Noyautage

Le noyau c'est une partie de moule fabriquée séparément dans un outillage spécifique appelé « boîte à noyaux » (figure IV-2). Il permet le plus souvent de reproduire la forme intérieure de la pièce (noyau interne) (figure IV-3), en ménageant les évidements, ou de simplifier les opérations de moulage (noyau externe ou de paroi : forme extérieure de la pièce). On peut placer un ou plusieurs noyaux dans un moule et réaliser ainsi les formes les plus complexes.



Figure IV.2 : boîte à noyau croning Chalco

Le noyau de cette pièce est réalisé par le procédé croning. On injecte, par une simple gravité le sable croning dans une boîte à noyau métallique chauffé de 280 °C pour faire durcir le sable.

La composition du sable croning est la suivante :

- Sable extra siliceux 95%
- (Résine+ Hexaméthylène +stéarate de calcium) 5%

Après l'échauffement, le sable durci et donné la forme de noyau.



Figure IV.3 : noyau croning

#### IV.5 Moulage

Le terme moulage décrivant le procédé ou l'opération qui consiste à fabriquer le moule.

On utilise une machine spéciale pour aider au remplissage et au serrage des moules, pour la mâchoire de frein on utilise des châssis avec les dimensions 1090x880x400/400 (mm<sup>3</sup>), on peut alors fabriquer 3 pièces par chaque châssis. La capacité de cette machine est 80 moules complets\h.

Les étapes de fabrication des moules sont :

- Moulage des demies parties inférieures et supérieures par tassage et serrage de sable silico-argileux à vert sur le modèle, on injecte 1000 kg de sable dans chaque châssis.



Figure IV.4 : machine de moulage

- démoulage, séparation du moule et du modèle.
- Tirages d'air, séchage, soufflage pneumatique pour éliminer toute trace de sable.
- Le piquage du moule pour obtenir les événements.
- Remmoulage de ces noyaux dans la demi-partie inférieure du moule et fermeture de celui-ci par l'autre demi partie retournée.
- Creusage du moule pour obtenir la forme d'entonnoir.

#### **IV.6 FUSION**

On trouve dans le parc fusion six soutes, pour le stockage de métal neuve, le métal douteux, les retours de coulée telle que le système de coulée (chenal, attaque, masselotte), les lingots, les pièces rebutées, les chutes des tôles d'acier ...etc.

La fonderie est équipée de trois fours de fusion et maintien à moyennes fréquences, deux poches de correction à 2 tonnes et de distribution, et quatre poches de coulée, deux poches de 500 kg pour la ligne 1 et 2 pour les petites pièces (PP), et 1 poche de 1500 kg pour la ligne 3 des moyennes pièces (PM) et 1 poche de 1000 Kg pour la ligne 4 des grosses pièces (GP).

#### **IV.7 Préparation du métal**

Selon la nuance de la fonte la composition de la charge est différente. Pour introduire la fonte FGS 38-15 la composition de sa charge doit être :

- 6 tonnes de retour de fonderie (masselotte, pièces rebutées, les chenaux et les jets de coulées).
- 2 tonnes de lingots de fonte de première fusion.
- 2 tonnes de chutes des tôles d'acier.

L'ajustement se fait après le contrôle de composition avec la spectroscopie, Un échantillon est coulé dans une petite lingotière (médaille) et apportée à la spectroscopie. La mesure est très rapide et se fait à la demande.

Les additions se font après le remplissage du four. Les additions sont calculées en fonction de la quantité de métal introduite et de la nuance de la fonte à préparer. Après le remplissage, le four est mis en puissance afin de chauffer le métal jusqu'à 1500 °C tout en brassant les additions pour le passage dans le métal liquide. La durée de montée en température et le passage des éléments de correction est de 50 minutes.



Figure IV.5 : fours de fusion et maintien à moyennes fréquences

Le décarassement se fait par une poudre (Slax) après le réglage du taux de graphite. Une fois l'opération de décarassement terminée on remonte en température et on maintient la fonte liquide à 1500°C. Le four à induction permet une production homogène.

#### IV.8 Poches de correction

Dans la poche de correction déroule une autre étape, c'est le traitement de sphéroïdisation par méthode SANDWICH pour obtenir une structure à graphites sphéroïdales.

Les alliages utilisés sont :

La poche de traitement à une cavité dans le fond (escalier). Dans cet escalier on met d'abord l'alliage Fe-Si-Mg (Fer- Silicium - magnésium), c'est l'alliage qui va permettre de traiter la fonte avec Fe-Si-Mg=1.8% de la masse totale du métal. Par-dessus on couvre avec le Fe-Si (Fer - Silicium), c'est l'alliage qui vient en couverture pour retarder la réaction avec Fe-Si=1.0% de la masse totale du métal.

La réaction doit commencer le plus tard possible pour que le Mg traverse la plus grande quantité possible de fonte, c'est pourquoi la poche doit être remplie le plus vite possible (50Kg/s) tout en respectant le poids demandé.

La couverture en Fe-Si protège l'alliage au Mg pendant les premières secondes, donc la vitesse de remplissage est aussi importante.

Dans ce traitement, on augmente la teneur en Si et en Mg, par contre une partie du Mg sert à éliminer une partie du soufre qui est impurité. D'où un rendement en Mg qui n'est pas de 100%. On constate aussi une diminution du carbone.

Lorsque le traitement est terminé on passe le métal vers la poche de coulée.

#### **IV.9 La coulée de la pièce**

Il s'agit de remplir la cavité du moule. On utilise le procédé de coulée gravité. La poche de coulée est transportée mécaniquement vers la chaîne de moulage, le métal est versé par le trou de coulée jusqu'à remplissage complet [7].

La coulée du métal liquide dans le moule constitue la phase finale du processus de création de la pièce après la confection du moule et l'élaboration du métal. La température de coulée doit être 1410 °C avec un débit de 12kg/s, ces paramètres de coulée sont primordiaux sur la qualité du remplissage et ont un impact fort sur la santé métallurgique de la pièce.

#### **IV.10 Parachèvement**

Le processus industriel n'est pas encore terminé. Les moules coulés et refroidis doivent être décochés les pièces, extraites du sable, finissent leur refroidissement à l'air libre. Puis elles sont nettoyées pour enlever tout le sable brûlé. Les masselottes, bavures, jets et attaques de coulée sont cassés, meulés, découpés. Les pièces subiront éventuellement des traitements thermiques et ensuite des opérations de contrôle pour s'assurer de leur qualité et de leur conformité aux cahiers des charges [9].

##### **IV.10.1 Refroidissement et Décochage**

La pièce commence à se refroidir dans le moule d'environ de 135 min, et on décoche celui-ci dès que possible. En moulage sable mécanisé, le sable et les pièces sont séparés des châssis par défonçage au-dessus d'une grille vibrante. Le sable brûlé est récupéré et repart dans la sablerie pour régénération, et les châssis, après nettoyage, retournent aux machines à mouler. Les pièces peuvent rester un certain temps sur la grille vibrante pour être nettoyées au maximum du sable de moulage adhérent en surface, et débarrassées des noyaux brûlés restant dans les parties creuses.

Ensuite, les pièces finissent leur refroidissement dans la chaîne qui transporte à l'atelier de finition.



Figure IV.6 : pièces sortant de la machine de décochage

#### IV.10.2 Grenailage

Malgré leur passage sur les grilles de décochage, les pièces doivent encore être nettoyées pour que leur surface soit complètement débarrassée du sable qui peut encore y adhérer. Cette opération peut se faire par grenailage.

Les pièces disposées sur un convoyeur à tapis métallique, avancent et pénètrent dans la grenailleuse. En passant, elles déclenchent un détecteur de présence qui donne l'information pour l'ouverture des vannes de dosage ; celles-ci alimentent les turbines en grenaille. Ceci garantit que le grenailage ne se fera que sur les pièces et non à vide dans l'enceinte de grenailage [16].



Figure IV.7 : grenailleuse a tapis métallique

### IV.10.3 Ebarbage

Les pièces séparées de leur système d'alimentation vont être reprises après grenailage de dessablage, pour éliminer tout appendice ou excroissance de matière. Suivant les sections ou les épaisseurs de matière à enlever et le type d'alliage considéré les technologies utilisées vont être différentes [17].

Pour la FGS 38-15 on utilise la séparation par fusion car elle moins cher que la séparation par tronçonnage mais au prix d'une modification locale de la structure.

Les coupes au chalumeau utilisent un mélange oxygène/gaz pour découper les masselottes de la pièce (Figure IV-8).

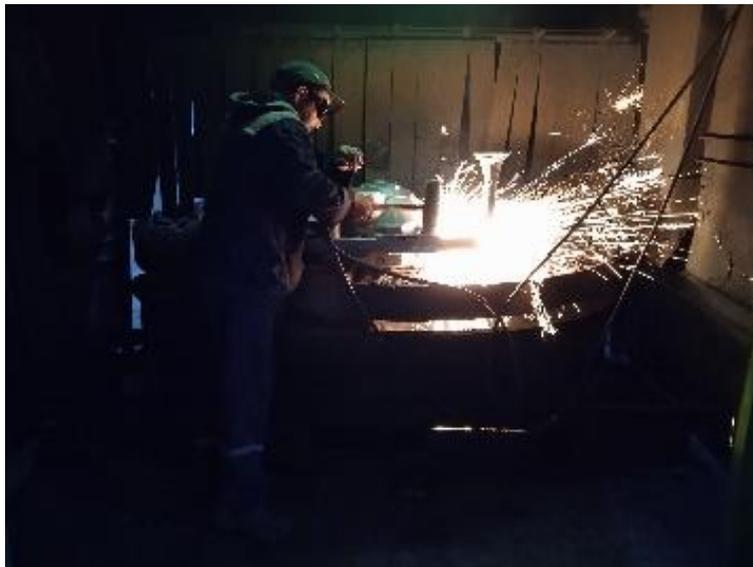


Figure IV.8 : coupe des masselottes par chalumeau

### IV.10.4 Meulage

En général les pièces brutes de fonderie, après toutes ces opérations, présentent encore un certain nombre de bavures au plan de joint du moule, ainsi qu'aux raccordements des parties de noyaux. Le meulage des pièces peut se faire manuellement avec des outils portatifs : marteaux, burins, limes, petites meuleuses (par l'action abrasive d'un corps de dureté plus élevée) [9].

## IV.11 Traitement thermique

### Traitement de Ferritisation

Enfin, notons que du fait de la présence de la transformation en phase solide austénite-ferrite, les fontes sont très favorables aux traitements thermiques.

Le but de ce traitement est l'élimination de la perlite et met tout la matrice Ferritique

- En chauffe la pièce jusqu'à une température de 900 C° et en maintien pendant 80 min donc la matrice perlitique peut être transformée en austénite et une partie du graphite ou de la cémentite peut se dissoudre dans l'austénite.
- Refroidissement lent dans le four pendant 80 min pour obtenir une matrice ferritique.
- Enfin, un refroidissement à l'air jusqu'à la température ambiante.



Figure IV.9 : four pousse de traitement thermique

Le cycle de traitement thermique est montré dans la figure suivant :

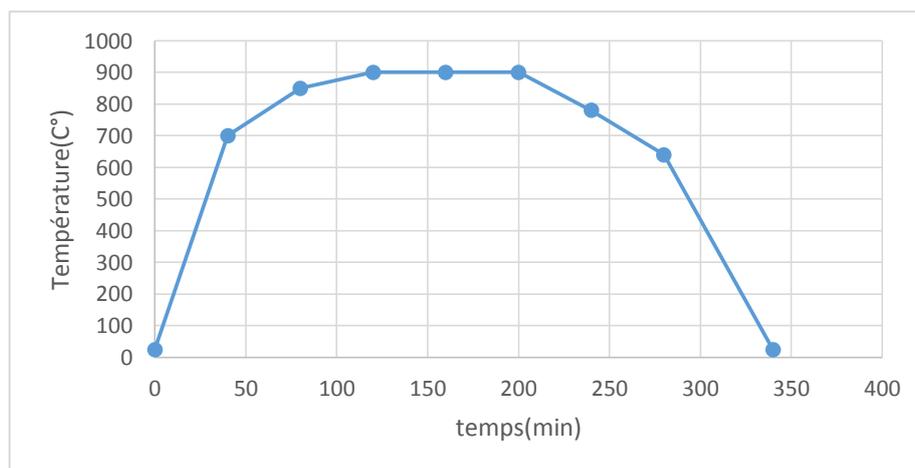


Figure IV.10 : cycle de traitement thermique de ferritisation de la FGS 38-15

#### IV.12 Peinture

La peinture est une demande particulière du client qui a généralement pour objectif de protéger la pièce contre la corrosion, mais qui peut aussi répondre à un objectif décoratif ou d'aspect. La pièce est accrochée sur un support et plongée dans un bac avec agitation.

Ce procédé a l'avantage d'être simple et peu coûteux en investissement. Il permet d'utiliser indifféremment des peintures solvantées ou hydro-diluables.

Il a l'inconvénient de ne pas donner des dépôts uniformes sur les différentes surfaces de la pièce et de présenter souvent des défauts de couleurs et des rétentions de peinture dans les cavités.



Figure IV.11 : Machine de peinture

La pièce finale est présentée dans la figure suivante :



Figure IV.12 : La pièce finale

**IV.13 Conclusion**

Dans ce chapitre on a mentionnée les différentes étapes et les opérations nécessaire de procédé de moulage en sable à partir de préparation de model jusqu'à la pièce finale.

Il permet de mouler des matériaux dont le point de fusion est élevé comme notre fonte utilisé, c'est un procédé rentable pour les moyennes et grandes séries, il a aussi la possibilité de mouler des pièces complexe et assure une bonne précision dimensionnelle et une bonne qualité des pièces à fabriquer.

Ce dernier point doit être vérifié par des contrôles de qualité qui nous avons mentionné dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE 5 :**  
**CONTROLES**  
**ET**  
**CARACTERISATION**

## V. Contrôles et caractérisation

### V.1 Introduction

La qualité des pièces produites en fonderie dépend de plusieurs paramètres pour cela il faut contrôler le plus grand nombre des pièces pour obtenir le niveau de qualité nécessaire en fabrication. Le coût de la non-qualité à tous les stades de la fabrication peut s'élever jusqu'à 15 % de la valeur ajoutée [13].

Au cours de ce chapitre nous présenterons les différents types de contrôle effectués sur les pièces au cours de la chaîne de fabrication ainsi les expériences effectuées et les techniques expérimentales utilisées pour caractériser les échantillons de la fonte FGS 38-15 qui nous avons utilisés pour la réalisation des mâchoires de frein. Ainsi, la caractérisation du sable de moulage utilisé.

### V.2 Caractérisation du sable de moulage

Le sable utilisé dans la fabrication des moules est le sable à vert avec sa composition :

- La Silice : 75%,
- Argile (bentonite) : 13%,
- Noire minéral : 4%,
- Humidité : 4%

L'empreinte du moule est obtenue soit avec un sable silico-argileux naturel (provenant des carrières), soit avec un sable de moulage synthétique, préparé et dosé à partir des constituants : silice, sables spéciaux, argile, eau, adjuvants (noir minéral pour les fontes, oxydes de fer, fleur de soufre et acide borique pour les alliages de magnésium, agents de débouillage, agents de soufflage...)

Le sable en contact avec l'alliage coulé doit être réfractaire, résister au choc thermique et ne pas présenter une trop forte dilatation thermique (destruction des parties de l'empreinte) ainsi une grande résistance à la compression et au cisaillement...

Les caractéristique doit trouver dans le sable sont mentionnée au tableau

Tableau V-1 : Caractéristiques du sable de moulage

Caractéristiques	Aptitude au serrage	compression	cisaillement	perméabilité	Taux Argile Total	Taux Argile active
Sable de moulage	40-50	>10 Psi	>3 Psi	>100	10% à 12%	7.5% à 9% (75% d'argile totale)

### V.2.1 Aptitude au serrage

L'aptitude au serrage du sable est une caractéristique très important pour le sable de moulage et de noyautage, le sable doit avoir une bonne aptitude au serrage pour obtenir un bon aspect après l'impression.

La figure V-14 représente la machine qui mesure l'aptitude de serrage.



Figure V.1 : : la machine qui mesure l'aptitude de serrage

### V.2.2 Compression

La compression est une propriété très intéressante pour le sable afin d'éviter les fractures et les cassures lorsqu'on fait le collage du métal et le décochage de la grappe.

Pour la mesure de cette propriété on prépare l'échantillon après on met les outils de compression dans la machine puis on ajoute l'échantillon de sable.

La figure V-15 représente la machine de compression.

### V.2.3 Cisaillement

Cet essai consiste à suivre l'évolution, au cours du temps, de la résistance à la flexion d'un sable. On utilise la même machine de la compression mais on change l'outillage. La figure V-15 représente la machine de cisaillement.



Figure V.2 : dispositif polyvalent pour les essais de cisaillement et compression du sable

### V.2.4 Perméabilité

La perméabilité est l'aptitude à se laisser traverser par un gaz sous l'effet d'un gradient de pression. Il faut qu'elle soit bonne pour que le sable permette l'évacuation des gaz contenus dans l'empreinte du moule ou générés lors de la coulée, cette caractéristique est liée au serrage du sable, si le serrage est fort la perméabilité sera faible.



Figure V.3 : Machine de mesure de la perméabilité

### V.2.5 Humidité

L'humidité de sable doit être dans un intervalle précis pour nous donner un bon aspect après le serrage et on peut la contrôler dans la chaîne de production. Cette grandeur a un grand effet sur la santé finale de la pièce ; si l'humidité a une grande valeur durant la coulée elle se transforme en gaz qui peut provoquer des défauts.

Les résultats des essais précédents sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau V-2 : les résultats de caractérisation de six échantillons de sable de moulage

	<b>humidité</b>	<b>perméabilité</b>	<b>compression</b>	<b>cisaillement</b>	<b>Serrage</b>
<b>1<sup>ère</sup> essai</b>	<b>4.32</b>	<b>175</b>	<b>22.73</b>	<b>4.85</b>	<b>46.80</b>
<b>2<sup>ème</sup> essai</b>	<b>4.27</b>	<b>168</b>	<b>22.85</b>	<b>5.20</b>	<b>43.80</b>
<b>3<sup>ème</sup> essai</b>	<b>4.03</b>	<b>167</b>	<b>22.41</b>	<b>5.50</b>	<b>44.20</b>
<b>4<sup>ème</sup> essai</b>	<b>4.4</b>	<b>184</b>	<b>21.45</b>	<b>5.60</b>	<b>45.80</b>
<b>5<sup>ème</sup> essai</b>	<b>4.22</b>	<b>178</b>	<b>22.73</b>	<b>5.30</b>	<b>45.30</b>
<b>6<sup>ème</sup> essai</b>	<b>4.45</b>	<b>173</b>	<b>22.78</b>	<b>4.65</b>	<b>47.30</b>

Tous ces résultats sont compatibles au fiche technique, donc le sable de moulage à une bonne qualité.

### **V.2.6 Analyse granulométrique (indice de finesse AFS) :**

La granulométrie est définie par la notion d' « indice de finesse », La taille de la particule est déterminée par sa capacité à passer ou non par l'ouverture des mailles d'un tamis. Nous pouvons observer la répartition des grains (refus %) par tamis caractérisés par l'ouverture de mailles.

La granulométrie d'un sable est aussi importante que la nature du sable elle-même (silice, zircon, olivine, chromite, ...). En effet, en fonction des procédés, on choisira des granulométries différentes. En outre, la granulométrie a un impact sur l'état de surface des pièces.

Pour le calcul de la granulométrie d'un sable de moulage ou de noyautage on prend un échantillon de 50G étuvé et calciné, et on verse cette échantillon dans le tamis supérieur du série de tamis AFS, puis on lance l'opération de secouage. Après 10mn de secouage on retire la série de tamis. Et on pèse le contenu de chaque tamis et le fond (refus), puis enregistrer le résultat obtenu pour chaque tamis (tableau 20) et à partir de ces résultat on peut calculer l'indice de finesse correspondant à cette échantillon.



Figure V.4 : dispositif de tamisage avec des tamis de différente taille

Tableau V-3 : la taille des grains de sable

Numéro des tamis	Coefficient multiplicateur	Grosueur des grains en mm	Refus en %
6	3	3.360et au-dessus	0
12	5	1.680 à 3.560	0
20	10	0.840 à 1.680	0
30	20	0.590 à 0.840	0,1
40	30	0.420 à 0.590	1,72
50	40	0.297 à 0.420	14,9
70	50	0.210 à 0.297	38,3
100	70	0.149 à 0.210	20,08
140	100	0.105 à 0.149	4,56
200	140	0.074 à 0.105	2,38
270	200	0.053 à 0.074	2,08
fines	300	Au – dessous de 0.053	1,5
Total			85.62

Ces résultats sont présentés sous forme d'un histogramme (figure V-17).

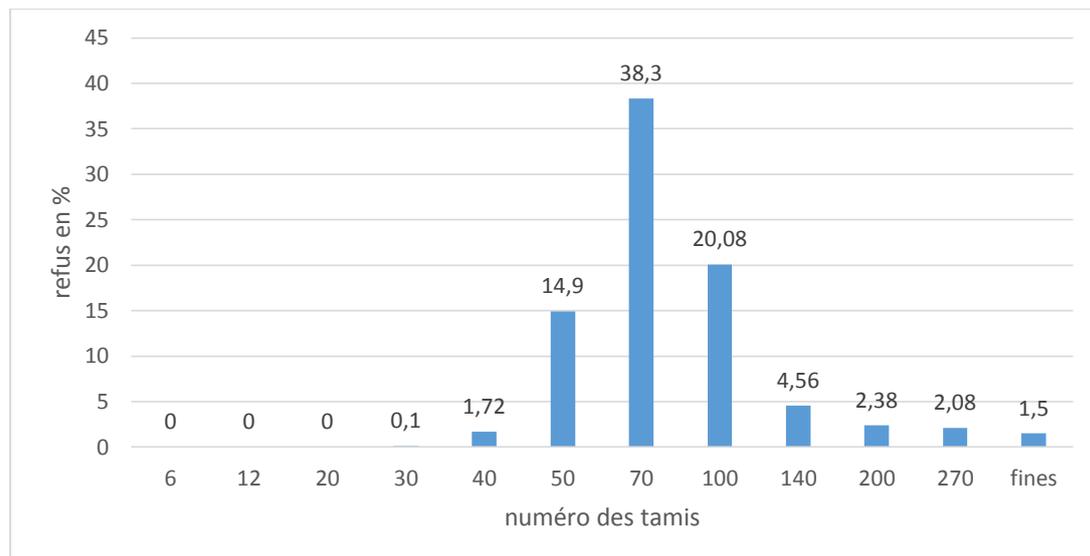


Figure V.5 : Histogramme de refus en fonction de numéro des tamis

$$\text{indice de finesse} = \frac{\sum \text{refus} \times \text{coefficient multiplicateur}}{\sum \text{refus}} = \frac{5625,4}{85,62} = 65,702 \text{ (AFS)}$$

### V.2.7 Détermination des taux de matières volatiles et d'argile totale

#### Matières volatiles (MV)

Pour la détermination de taux de matières volatiles on remplit 2 coupelles de sable, puis les mettre dans l'étuve préalablement chauffée à 110° et laisser pendant 1h.

- Après 01 h d'étuvage, retirer les 2 coupelles et les laisser refroidir pendant (03-04) mn.

Peser un échantillon de sable étuvé de 10G puis le mettre dans un creuset.

- Mettre le creuset dans un four à moufle préalablement chauffé à 900°C et laisser calciner pendant 1h.

- Après 1h de calcination, on retire l'échantillon et on le laisse refroidir dans un dessiccateur.

- Après refroidissement, prendre l'échantillon, le peser puis enregistrer le poids obtenu.

- A l'aide de la formule  $\%MV = (M_1 - m_1 / M_1) \cdot 100$ , on détermine le taux de matières volatile MV puis enregistrer le résultat obtenu.

$M_1$  : poids de l'échantillon de 10g avant calcination.  $m_1$  : poids de l'échantillon de 10g après calcination.

$m_1 = 9,81\text{g}$

alors %MV=1,9 %

Argile totale (AT)



Figure V.6 : dispositif de mesur du taux d'argile

- On pese un autre échantillon de sable étuvé de 50G, puis le mettre dans le bêcher contenant la solution de soude caustique qui composée de :

470Cl d'eau distillé/déminéralisé.

30Cl de soude caustique.

On poser le bêcher sur la plaque chauffante et on laisse chauffer jusqu'à ébullition.

- Après 10 mn d'ébullition, on met en place le bêcher sur un agitateur magnétique,
- Après 10 mn de lixiviation, on prend le bêcher et le mettre dans un lévigateur puis lancer l'opération de lévigation (figure V-18).
- Une fois l'opération de lévigation terminée, on retire le bêcher, on laisse l'échantillon décanter.
- Après décantation, on vide l'eau résiduelle en prenant soin de ne pas entraîner de particules ou de grains de sable.
- On met l'échantillon sur une plaque chauffante et on laisse le pour sécher.
- Après séchage on récupère l'échantillon et le mettre dans un creuset.

- On met le creuset dans un four préalablement chauffé à 900"et le laisser calciner pendant 1h.
- Après 1h de calcination, récupérer l'échantillon, le peser, et enregistrer le résultat obtenu.

A l'aide de la formule  $AT = (M_2 - m_2 / M_2) \cdot 100 - MV$ , on détermine le taux d'argile totale AT et l'enregistrer.

NB :

Avec  $M_2$  : poids de l'échantillon de 50g avant calcination, et  $m_2$  : poids de l'échantillon de 50g après calcination.

$m_2 = 44,96g$

donc  $AT\% = 11,98 \%$

Argile active = 75% AT = 8,39%

### V.3 Contrôles destructifs des pièces

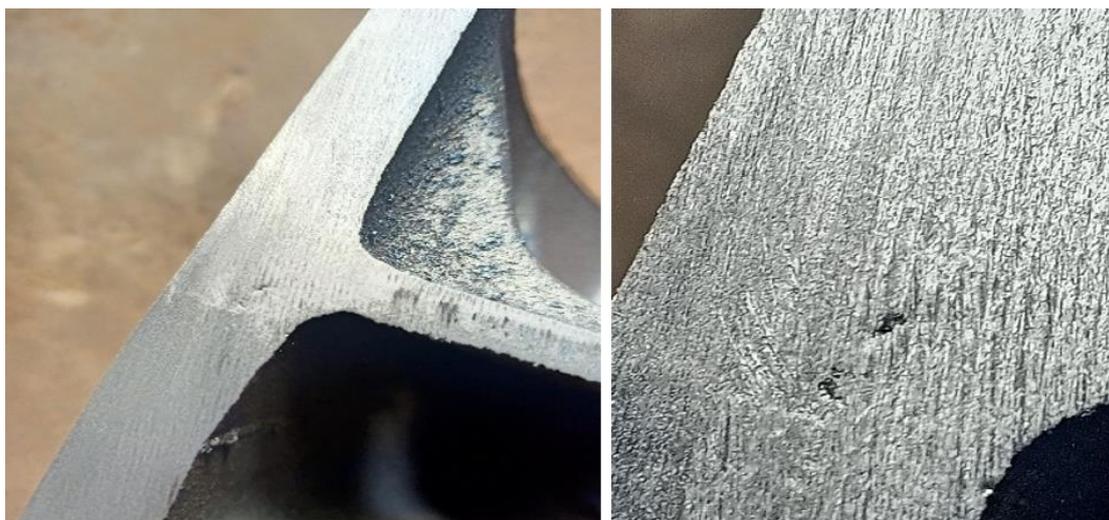
La mise en œuvre des contrôles des pièces de fonderie dépend de la nature de la production (pièce unitaire ou série), et la dimension des pièces. Grâce aux résultats de contrôle on peut diviser les pièces en pièces conformes (pièces bonnes), pièces réparables et pièces rebutées.

Nous entendant par contrôles destructifs tous type de contrôle peuvent faire endommager les pièces ou les échantillons contrôlés, ils contiennent plusieurs types de contrôle comme le contrôle d'aspect interne de la pièce et les essais mécaniques et aussi l'examen métallographique ...etc [10].

#### V.3.1 Contrôle d'aspect interne de la pièce

Ce contrôle consiste à découper la pièce pour voir et analysé son aspect interne. Le choix de l'endroit de coupure demande a la fois une grande expérience et une bonne connaissance des types des défauts et leurs spécifications , elle dépend de plusieurs facteurs surtout la géométrie de la pièce et le type de défauts, généralement on coupe la pièce dans les endroits épais ou les endroits qui contiennent les défauts.

Ce contrôle est effectué seulement sur quelques pièces, de sorte que ces pièces présentent des défauts visuels comme les criques, ou des défauts détectés par ultrason. La figure V-1 montre un coupe d'une pièce dans un endroit épais dans laquelle il y a un défaut de retassure, ce défaut est détecté en premier temps par l'ultrason .



(a)

(b)

Figure V.7 : Coup d'une pièce représente un défaut de retassure

(a) représente la coupe de la pièce, (b) représente le zoom au endroit qui contient le défaut de retassure

### V.3.2 Caractéristiques mécaniques

#### V.3.2.1 Dureté Essai Brinell (NF EN 10003-1 à 3)

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration, Le pénétreur est une bille en acier trempé (dureté HBS) avec un diamètre de pénétreur  $D=10\text{mm}$  correspondant à une charge de  $F=3000(\text{daN})$ . Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur.

$$HBS = \frac{0.102.2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Elle est la caractéristique le plus couramment mesuré car la mesure est faite au moyen d'un essai rapide et simple, et la plupart des propriétés intéressantes de la fonte sont en relation directe avec cette propriété. Ainsi, la résistance à la compression présente une bonne corrélation avec la dureté [3].

La mesure est effectuée à l'aide d'un appareil numérique (figureV-2) qui donne les valeurs des duretés directement. Par cet appareil on peut faire l'essai sur un échantillon de laboratoire ou sur la pièce elle-même ce qui facilite le travail.



Figure V.8 : Appareil de mesure de dureté

Les valeurs de dureté obtenues par ces essais sont dans le domaine de dureté de la fonte FGS 38-15 (entre 137 et 180 HB), généralement la dureté de FGS 38-15 située entre 150 et 160 HB, donc au point de vue de dureté ces pièces sont bonnes.

Tableau V-4 : les résultats obtenus par l'essai Brinell

Essais	Valeur de dureté HB
1 <sup>ère</sup> essai	<b>156.91</b>
2 <sup>ème</sup> essai	<b>155.81</b>
3 <sup>ème</sup> essai	<b>156.62</b>
4 <sup>ème</sup> essai	<b>159.01</b>
5 <sup>ème</sup> essai	<b>158.32</b>
6 <sup>ème</sup> essai	<b>158.45</b>

Notons que la dureté de FGS 38-15 est inférieure à celle des fontes grises lamellaires (généralement entre 187 et 260 HB).

### V.3.2.2 Essai de traction uni-axiale (NF EN 10002)

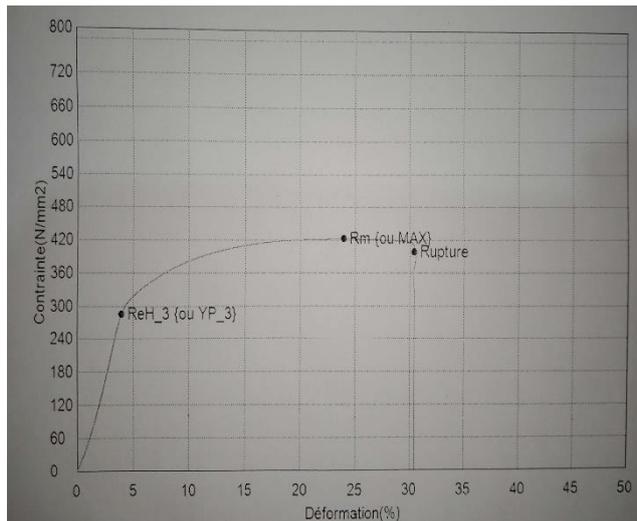
L'essai de traction est aussi un moyen plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. Des éprouvettes en fonte grise FGS 38 15 en forme de barreau cylindrique comportant une partie centrale calibrée à section constante  $S_0$  avec un diamètre  $d_0=14\text{mm}$ , une longueur initiale de référence  $L_0=70\text{mm}$  entre deux repères tracés sur l'éprouvette, longueur totale initiale  $L_c=84\text{mm}$ , raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante avec un diamètre  $d'=20\text{mm}$  [3].

La machine de traction (figure V-3), impose un allongement croissant à l'éprouvette, et enregistre simultanément l'effort appliqué  $F$  et l'allongement  $\Delta L$ . L'essai est généralement poursuivi jusqu'à rupture, après on mesure l'allongement ultime rémanent  $\Delta L_u$ .

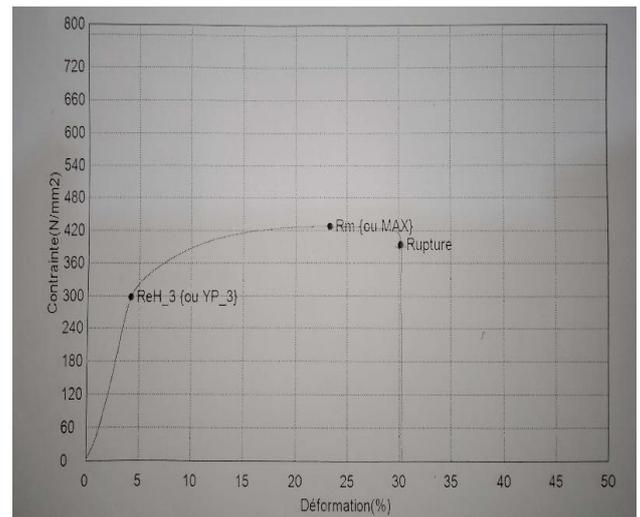


Figure V.9 : appareille de l'essai de traction

La courbe de traction conventionnelle est obtenue à partir de l'enregistrement des valeurs de contrainte en fonction de l'allongement. On obtient ainsi une courbe intrinsèque au matériau, indépendante des dimensions de l'éprouvette utilisée, les résultats de cet essai sont donnés par les courbes dans la figure V-4.



(a)



(b)

Figure V.10 : les courbes de l'essai traction

(a) Le premier essai, (b) la deuxième essai

A partir de ces courbes on extrait les propriétés mécaniques suivantes :

Tableau V-5 : les résultats de l'essai de traction

Essais	allongement A%	allongement élastique et plastique AD%	résistance à la traction Rm(Mpa)	limite d'élasticité Re (Mpa)	Résistance à la rupture Ru (Mpa)	module de Young E (Mpa)
Essai 1	27.14	30.474	422.759	285.514	396	7137.85
Essai 2	26.171	30.2137	427.481	298.01	395	7095.476

Les courbes de traction présentent un domaine élastique définie par la loi de Hook avec un module de Young moyen =7116.663(Mpa), suivi par un domaine plastique avec une résistance maximale moyen  $R_m = 425.12(\text{Mpa}) > 380(\text{Mpa})$  donc la résistance mécanique de cette fonte est bonne. Aussi, l'allongement moyen  $A\% = 26.65\% > 15\%$  qui est une caractéristique important et qui distincte cette fontes aux autres fontes utilisé au niveau de la Fonderie de Rouïba (FGS 600-3 a un allongement supérieur à 3%, FGS 450-10 a un allongement  $> 10\%$  et les fontes grises lamellaires qui a un allongement presque nulle).

### V.3.2.3 Essai de résilience

La résilience représente la résistance d'un matériau à la propagation brutale d'une fissure sous l'effet d'un choc. Elle se mesure par l'énergie par unité de section consommée pour la rupture d'une éprouvette, en  $J/cm^2$ . L'essai de résilience le plus couramment pratiqué sur les matériaux métalliques est l'essai Charpy (NF EN 10045), effectué sur un mouton-pendule qui brise en flexion 3-points une éprouvette prismatique à entaille en U ou en V. L'altitude de remontée du pendule, comparée à son altitude de départ, permet de chiffrer facilement l'énergie absorbée lors de la rupture [3].

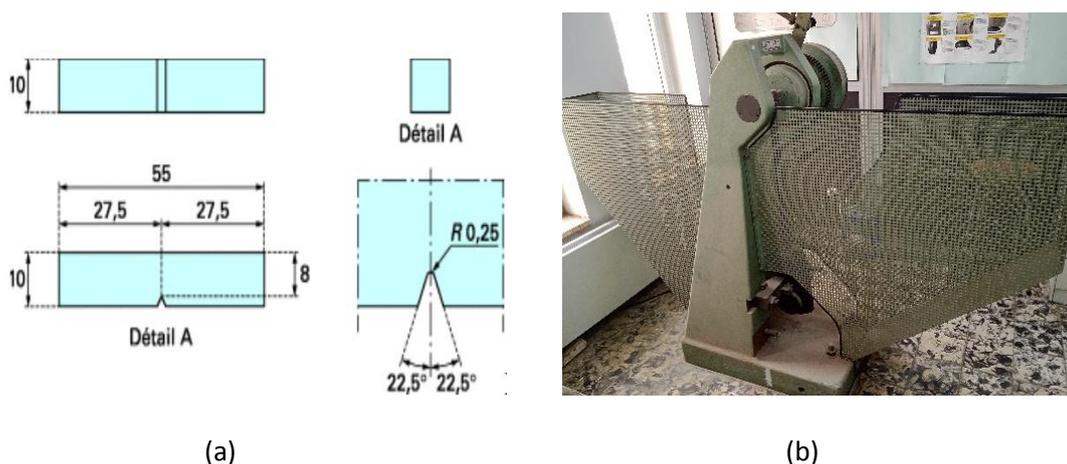


Figure V.11 : l'essai de résilience.

(a) l'éprouvette le l'essai, (b) Mouton-pendule.

La résilience s'accroît avec la ductilité du matériau et comme la FGS 38-15 a un allongement à la rupture  $A\% > 15\%$  donc elle a une bonne résilience, ce qui est montré dans le tableau V-3.

Tableau V-6 : résultats de l'essai de résilience

Essais	Kcv ( $J/cm^2$ )
Essai 1	15.80
Essai 2	15.65
Essai 3	15.72

On remarque que pour cette fonte Kcv moyen =15.72 (J/cm<sup>2</sup>), généralement le Kcv de la fonte FGS 38-15 est supérieur à 15 (J/cm<sup>2</sup>), par contre les autres fontes utilisées dans la fonderie de Rouiba ont des Kcv plus petits (pour FGS 600-3 le Kcv > 6(J/cm<sup>2</sup>), FGS 450-10 le Kcv > 11(J/cm<sup>2</sup>)). Ces résultats sont compatibles avec les résultats de l'essai de traction mentionnés précédemment (lorsque l'allongement augmente le Kcv augmente aussi, c'est-à-dire la résilience augmente). On remarque que pour cette fonte Kcv moyen =15.72 (J/cm<sup>2</sup>), généralement le Kcv de la fonte FGS 38-15 est supérieurs à 15 (J/cm<sup>2</sup>), par contre les autres fontes utilisés dans la fonderie de Rouiba ont des Kcv plus petite (pour FGS 600-3 le Kcv > 6(J/cm<sup>2</sup>), FGS 450-10 le Kcv > 11(J/cm<sup>2</sup>)). ces résultats est compatibles aux résultats de l'essai de traction mentionné précédemment (lorsque l'allongement augment le Kcv augmente aussi, c'est-à-dire la résilience augmente).

#### V.3.2.4 Examens métallographiques par microscopie optique

Elle permet d'observer certains éléments de la microstructure des matériaux jusqu'à une taille de l'ordre de quelques dixièmes de microns : inclusions solides à structure et composition hétérogènes, taille et forme des grains, Les dislocations ...etc.

Sur les métaux, l'examen se fait en réflexion sur la surface de l'échantillon, polie et éventuellement attaquée par un réactif qui permet de mettre en évidence les hétérogénéités et les défauts, La microscopie optique est la technique d'examen de base la plus pratiquée.

La première étape consiste à préparer des échantillons avec des tailles suffisantes puis faire le polissage pour nettoyer et mettre la surface des échantillons lisses ainsi obtenir un bon résultat ,pour la finition de polissage on utilise la **pâte diamantée** qui est une **pâte** abrasive avec de fine poudre de diamant a granulométrie de 6 micron



Figure V.12 : Machine de polissage des échantillons pour examens métallographiques.

On observe les microstructures des échantillons que nous avons préparés par la microscopie optique avec un zoom de 100 fois et à partir des résultats obtenus on peut définir la forme de graphite et sa taille en le comparant avec les formes mentionnées sur la brochure qui est présentée dans la figure suivant :



Figure V.13 : Microscope optique.

La figure V-8 présente les résultats de microstructures de quelques échantillons sans attaque chimique.

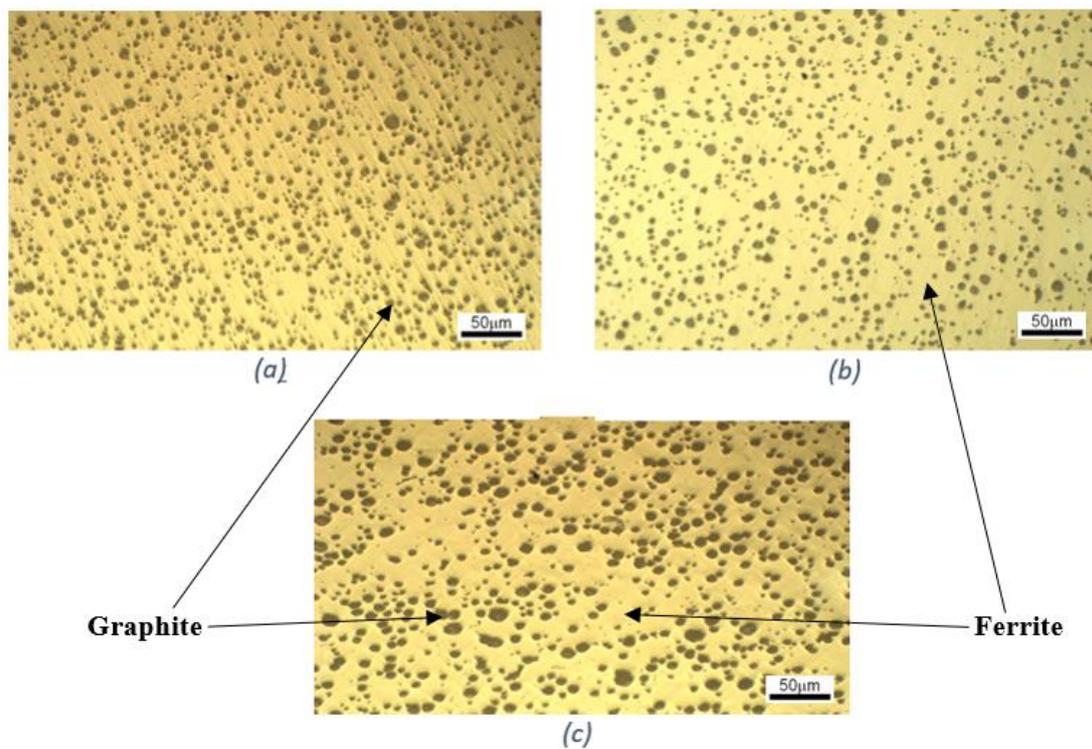


Figure V.14 : structure de la FGS 38-15.

Le graphite dans cette fonte est de forme sphéroïdale, d'après la norme EN ISO 945 (1994), on peut caractériser visuellement le graphite par sa forme et sa taille, les résultats sont donnés par le tableau suivant

Tableau V-7 : la taille et la forme de graphite

	La forme	La taille
Echantillon 1	Forme VI : Sphéroïdale	6 et 7
Echantillon 2	Forme VI : Sphéroïdale	6 et 7
Echantillon 3	Forme VI : Sphéroïdale	5

On remarque que la forme de graphite est sphéroïdale (forme VI) et uniformément réparti pour les trois échantillons. Plus le graphite est fin, divisé et uniformément réparti, moins il diminue les caractéristiques mécaniques de la fonte. À la limite, la forme sphéroïdale de graphite dans la fonte GS est plus favorable que la forme lamellaire du graphite d'une fonte grise ordinaire. D'autre part, la forme lamellaire du graphite est largement à l'origine de la fragilité qui caractérise les fontes grises lamellaires.

La taille de graphite dans les échantillons 1 et 2 varie entre moyenne et fine (forme 6 et 7) alors que dans l'échantillon 3 elle est de taille moyenne (forme 5). Pour les fontes grises les tailles de graphites désirées sont les tailles 6 et 7, avec la taille 5 reste acceptable. Par contre les tailles 3 et 4 sont inacceptables car elles sont très grandes donc elles fragilisent la fonte.

Enfin, le graphite améliore les caractéristiques de frottement de la fonte et corrélativement favorise l'usinabilité.

Pour définir la matrice de la fonte on doit faire l'attaque chimique par le Nital qui est une solution d'acide nitrique et d'alcool avec la composition suivante :

95% alcool

5% acide nitrique

Pendant presque 4 seconde suivie par un lavage et séchage des échantillons, les résultats après l'attaque chimique sont présentés dans la figure V-9 et le Tableau V-5.

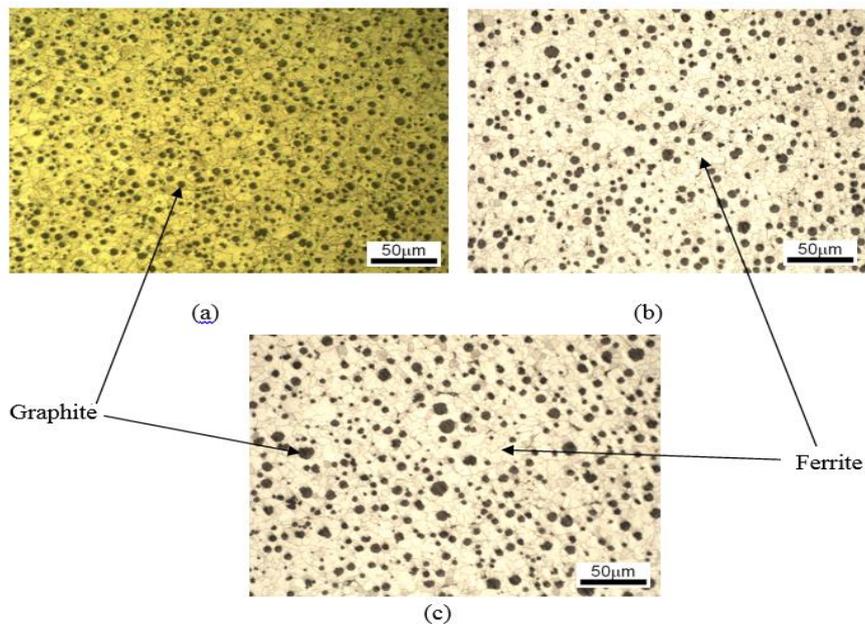


Figure V.15 : la microstructure de la fonte 38-15 après l'attaque chimique

Tableau V-8 : les types de matrice dans la fonte 38-15

Echantillons	Matrice
Echantillon 1	Ferritique
Echantillon 2	Ferritique
Echantillon 3	Ferritique

La matrice a une grande influence sur les propriétés mécanique des fontes. La matrice perlitique a un grand résistance élastique et a une grande dureté ( $Re=800$  Mpa ,  $Hv=200$  ) mais avec un petit allongement  $A\%=10$  % contrairement à la matrice totalement Ferritique qui a une dureté et résistance mécanique faible que la matrice perlitique ( $Re=300$  Mpa, $Hv=80$ ) mais avec un grand allongement  $A\%=50\%$ . Le graphite a une influence sur les propriétés mécaniques des fontes, il augmente la dureté et au même temps il diminue l'allongement. Pour une fonte FGS 38-15 avec une matrice ferritique et de graphite de forme VI et taille 5 à 7 on obtient une dureté entre 137 et 180 HB, un allongement  $>15\%$  ,  $Kcv >15(J/cm^2)$  et  $Rm >380$  Mpa.

### V.3.3 Composition chimique

#### V.3.3.1 Spectromètres d'émissions optiques

Le spectromètre d'émissions optiques (figure V-10) est un instrument adapté à l'analyse des métaux dans le cadre de contrôle des procédés et de la qualité. Les OES analysent les éléments chimiques sur la plage complète, qu'il s'agisse de l'analyse de traces de métaux purs ou de l'analyse de métaux à forte teneur en alliage. Les spectromètres d'émissions optiques à étincelle analysent les métaux lors de toutes les phases de procédé moulage, de la production de métaux à leur traitement jusqu'à leur recyclage.

L'OES donne des résultats précis surtout le taux de manganèse et de silicium qui sont les principaux éléments d'alliage



Figure V.16 : spectroscopie d'émission optique

Le tableau suivant représente les résultats d'analyse par spectroscopie d'émission optique d'un échantillon de fonte grise FGS 38-15

Tableau V-9 : la composition chimique de la fonte obtenue par la spectroscopie

élément	1 <sup>ère</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai	Le moyen
<b>Fe</b>	<b>91.72</b>	<b>92.02</b>	<b>91.87</b>
<b>C</b>	<b>3.338</b>	<b>3.216</b>	<b>3.277</b>
<b>Si</b>	<b>2.989</b>	<b>3.031</b>	<b>3.010</b>
<b>Mn</b>	<b>0.316</b>	<b>0.324</b>	<b>0.320</b>
<b>P</b>	<b>0.065</b>	<b>0.063</b>	<b>0.064</b>
<b>S</b>	<b>0.014</b>	<b>0.009</b>	<b>0.011</b>
<b>Cr</b>	<b>0.083</b>	<b>0.087</b>	<b>0.085</b>
<b>Mo</b>	<b>0.021</b>	<b>0.017</b>	<b>0.019</b>
<b>Ni</b>	<b>0.048</b>	<b>0.050</b>	<b>0.049</b>
<b>Al</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>
<b>B</b>	<b>0.0005</b>	<b>0.0011</b>	<b>0.0008</b>
<b>Co</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>
<b>Cu</b>	<b>0.256</b>	<b>0.179</b>	<b>0.218</b>
<b>Nb</b>	<b>0.724</b>	<b>0.677</b>	<b>0.700</b>
<b>Sn</b>	<b>0.008</b>	<b>0.010</b>	<b>0.009</b>
<b>Ti</b>	<b>0.107</b>	<b>0.058</b>	<b>0.083</b>
<b>V</b>	<b>0.278</b>	<b>0.237</b>	<b>0.257</b>
<b>Mg</b>	<b>0.025</b>	<b>0.020</b>	<b>0.023</b>
<b>Zn</b>	<b>0.003</b>	<b>0.002</b>	<b>0.002</b>

Donc cette fonte a % Mn =0.320% Et %Si=3.010%

- Le rôle essentiel de Manganèse est de neutraliser l'effet néfaste du soufre sur les propriétés mécanique des fontes grises, par formation de sulfure de manganèse MnS.

L'augmentation du manganèse rend la fonte plus perlitique tout en augmentant progressivement la dureté.

Le manganèse est un élément carburigène, blanchissant. Il faut donc peu de Mn pour éviter, dans les parties minces du moulage, la formation de fonte truitée.

Un titre  $Mn > 0,4\%$  peut faciliter l'obtention d'une matrice perliti que en favorisant la formation de cémentite manganésifère  $(Fe_2Mn)_3C$  dans la perlite.

- Le silicium, est un élément graphitisant qui doit être toujours suffisamment abondant pour éviter la formation d'une fonte truitée c'est-à-dire de plagues blanches. Le tiers du Si total est ajouté en fin de fusion et a un rôle d'inoculation du graphite. Le silicium accroît la vitesse de diffusion du carbone dans l'austénite lors de la formation des sphéroïdes de graphite. Le Si durcit la ferrite et augmente la résistance de la ferrite et de la fonte. Malheureusement il diminue considérablement la résilience.

### V.3.3.2 Leco CS 200 « carbon suflur determinator »

La majorité des métaux et de leurs alliages brûlent dans l'oxygène s'ils sont chauffés à une température suffisamment élevée.

Le carbone de l'échantillon est oxydé en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) tandis que le soufre est converti en dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>). Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>). Le CO<sub>2</sub> et le SO<sub>2</sub> peuvent ensuite être mesurés par des détecteurs infrarouges (IR).

Pour la combustion elle utilise un four à induction à haute fréquence (HF), pour des raisons de rapidité et de précision.

Souvent, la combustion des matériaux peut être accélérée par l'utilisation d'un accélérateur.

#### Accélérateurs

Plusieurs métaux ont été utilisés comme accélérateurs. Chaque accélérateur présente certains avantages et, dans de nombreux cas, ils sont combinés pour une performance optimale. Les différents accélérateurs couramment utilisés sur ce four à induction

Copeaux de cuivre Excellent accélérateur/flux pour la détermination du carbone ainsi que dans les matériaux non ferreux. Habituellement combiné avec des accélérateurs de tungstène, de cuivre, ou des accélérateurs d'étain.

Tungstène Bon accélérateur pour les aciers au carbone ordinaires offrant d'excellentes caractéristiques de combustion lorsqu'il est combiné à l'étain.



Figure V.17 : Leco CS 200 « carbon suflur determinator »

Pour cette fonte %C=3.64%

%S=0.0091%

Le soufre

Son titre est toujours très faible pour :

- \* ne pas communiquer au liquide un grand pouvoir mouillant par rapport au graphite et, de ce fait, éviter le graphite lamellaire.
- \* ne pas consommer trop de magnésium ou d'alliage au magnésium dont le prix de revient est très élevé. En effet le Mg est un désulfurant très actif et la part qui sert à la désulfuration ne peut plus servir à la sphéroïdisation du graphite.
- \* éviter la formation de sulfure de magnésium MgS qui donne des inclusions néfastes aux caractéristiques mécaniques des moulages

En pratique on tient:  $S < 0,015\%$ .

A présent on comprend la supériorité de l'élaboration de la fonte G.S. au four électrique à induction par rapport à l'élaboration au cubilot à revêtement basique. Cependant la désulfuration au carbure de calcium à la sortie du cubilot permet d'atteindre, dans les meilleures conditions: 0,01% de S.

#### V.4 Contrôle non-destructive des pièces

On vient de voir que l'examen métallographique et les essais mécaniques sont des moyens qualitatifs et quantitatifs précis mais ont l'inconvénient d'être destructifs, couteux et longs, c'est pourquoi ne peut pas généraliser leur application pour le contrôle de toutes les pièces.

On dispose actuellement des moyens d'investigation en contrôle non destructif qui donne des informations précises sur la santé des pièces (compacité)

Les contrôles non destructifs ce sont des contrôles qui permettent de détecter d'éventuels défauts dans les pièces sans porter atteinte à celles-ci. Nous avons classé et répertorié ces contrôles en trois grandes familles que nous analysons ci-après :

- Les contrôles d'ensemble de la pièce : aspect, géométrie.
- Les contrôles de surface : par ressuage.
- Les contrôles internes ou de structure : par ultrasons.

##### V.4.1 Contrôle d'aspect

C'est un contrôle visuel simple qui peut se pratiquer à l'œil, ou à la loupe, pour vérifier rapidement la forme, les dimensions, l'aspect d'une pièce et ses états de surface extérieur et intérieur. C'est un contrôle rapide mais qui demande beaucoup d'attention de la part des contrôleurs pour être efficace.

##### V.4.2 Contrôle de géométrie

La géométrie et les dimensions d'une pièce moulée en fonte doivent bien évidemment être contrôlées par des méthodes et instruments capables de mesurer correctement la précision exigée (figure V-12) .



Figure V.18 : Machine de contrôle dimensionnelle 3D de la pièce

### V.4.3 Contrôles d'aspect interne par ultrasons

Le passage des ultrasons dans la fonte peut être gêné, par exemple, par la présence d'une cavité (retassure...) qui donne naissance à des échos anormaux sur l'écran de lecture. Pour améliorer le passage des ultrasons entre l'émetteur et la pièce, et entre la pièce et le récepteur, cet essai se fait dans l'eau ou par interposition d'un produit gras afin de réduire les pertes aux interfaces. Le contrôle par ultrasons est également utilisé pour vérifier le taux de nodularité. La vitesse du son dans la fonte étant influencée par la forme du graphite, et donc par sa nodularité, on peut en déduire grâce à une courbe de correspondance le taux de nodularité.



Figure V.19 Contrôle de structure de la pièce par ultrasons

## V.5 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les différentes techniques de caractérisation de fonte et de sable et le contrôle de qualité des pièces finies ainsi que les différentes matérielles utilisés, la caractérisation il permet d'avoir des données sur les propriétés des matériaux tels que les propriétés mécanique, chimique et les propriétés physico-chimique ainsi que la composition chimique de matériau, ces données permettent-nous de contrôler le matériau et que les caractéristique soit acceptable et répand au cahier de charge. Le contrôle des pièces est une étape indispensable après la fabrication des pièces, permet de déterminer c'est les produits fabriquer sont conforme ou non, fiabilité de procédé utilisé et la conformité entre ce procédé et l'alliage utilisé ainsi que réduire le cout de production et la satisfaction des clients.

## Conclusion générale

La fonderie est l'une des processus de fabrication des pièces mécanique, elle à un large domaine d'utilisation grâce à la qualité des pièces fabriqué, elle est considérée comme un moyen économique d'obtention des pièces avec des formes complexes.

L'objectif principal de ce travail est de faire une étude sur les mâchoires de frein et leurs fabrications, qui doivent être adapté aux conditions de travail.

Si l'on reprend l'ensemble de ce travail, les conclusions principales se résument comme suit :

-la pré-étude est une étape de premier ordre avant la fabrication des pièces, cette pré-étude nous permet de déterminer les sollicitations et les conditions de travail de mâchoire de frein donc on peut déterminer la forme et les propriétés de pièces qu'on doit fabriquer.

-le choix de fonte utilisé dans la fabrication de mâchoire de frein doit être convenable et il doit répandre aux propriétés physico-chimiques qui nous cherchons.

-les outils informatique tel que la conception 3D par Solidworks et la simulation numérique à l'aide de Procast et Inspire Cast sont indispensables, elles nous donnent un aperçu sur la qualité des pièces fini et détectent les défauts qui apparaissent, ce qui nous permet de prendre les précautions pour éviter ces défauts.

- le procédé moulage en sable est l'une des procédés le plus économique, c'est un procédé convenable avec la fonte choisi et le nombre des pièces qu'on veut fabriquer, il permet aussi d'obtenir des pièces avec grande précision dimensionnelle.

- la caractérisation est une étape très importante dans la fabrication des pièces elle permet d'avoir une idée sur les propriétés physico-chimique pour améliorer la qualité des pièces.

-le control de qualité à l'aide des dispositifs précis donne une information sur la santé interne et externe des pièces, cette étape est très importante, elle donne une meilleure conséquence sur le succès de l'étude.

Alors comme perspectives de la suite de ce travail, nous vous proposons d'utiliser :

La Simulation thermomécanique qui permet d'étudier le comportement mécanique (contraintes résiduelles et déformations) d'une pièce de fonderie dans son environnement (moule) depuis le remplissage jusqu'au refroidissement. Elle permet également de prévoir et d'améliorer la tenue en service des pièces de fonderie.

La Simulation microstructurale qui permet de prévoir les microstructures des pièces en fonte,

Et la Simulation de la fabrication des noyaux et des moules (procédé Boîte froide)

Par Des Logiciels (Optiblow, Arena Flow, Flow3D, Magma) qui permettent de calculer l'écoulement du sable dans une boîte à noyau lors de l'opération de tir sur machine. Ces outils peuvent ainsi prédire des fausses serres, des manques,... pour une optimisation des paramètres de tir ou de filtration.

#### Simulation produit

La « simulation produit » s'intéresse principalement au calcul de structure. On peut tirer profit de ce type de calcul pour dimensionner, valider et optimiser des pièces ou des assemblages complets.

La séparation des masselottes par tronçonnage, elle est plus rapide et plus précise que les procédés par fusion et elle n'affectent pas un changement microstructurale.

Un sable avec des bonnes caractéristiques, pour cela la Fonderie de Rouïba crée une unité de traitement de sable.

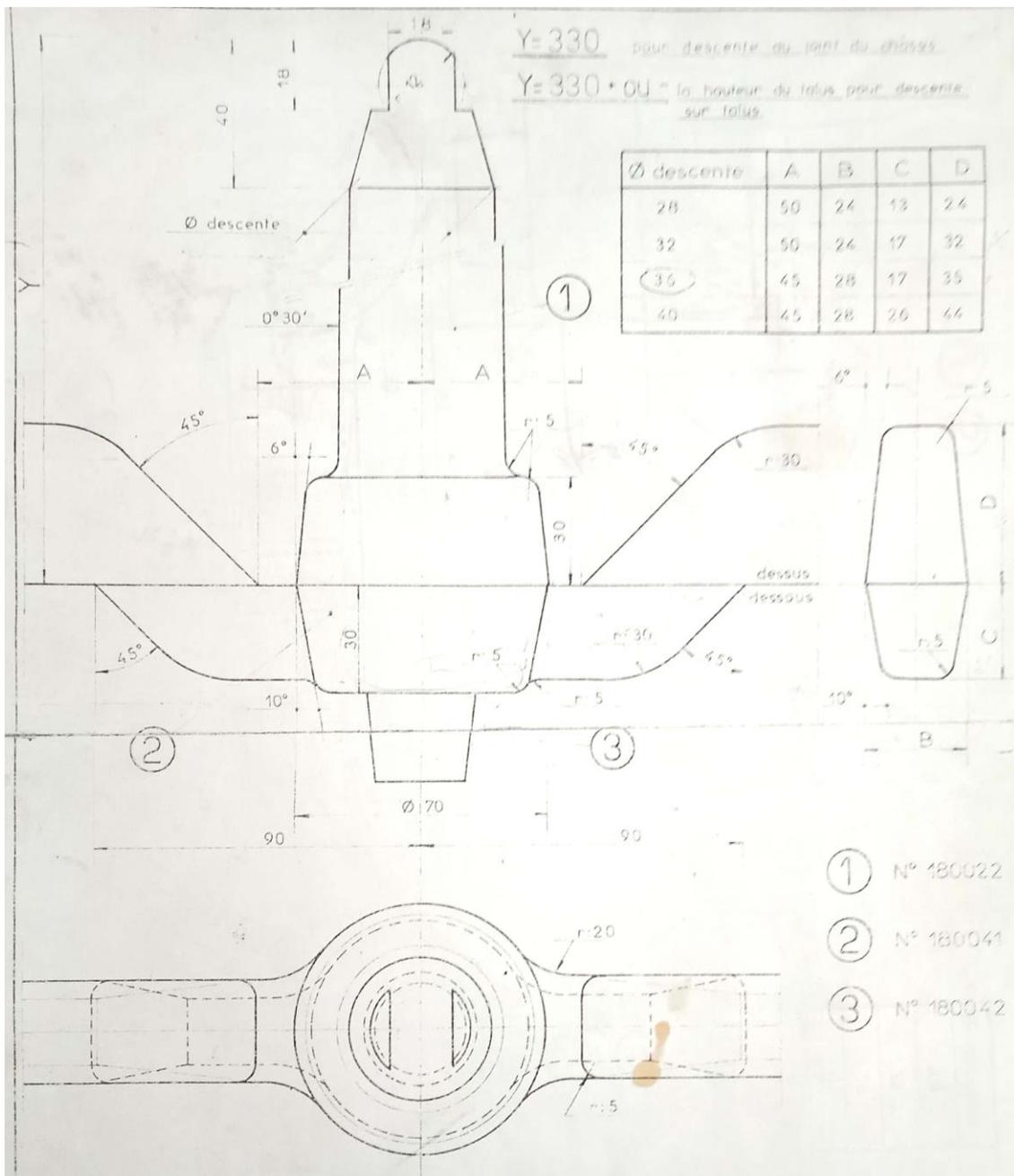
Des autres procédés de moulage comme Lost Foam qui permette de produire des pièces en très grande série.

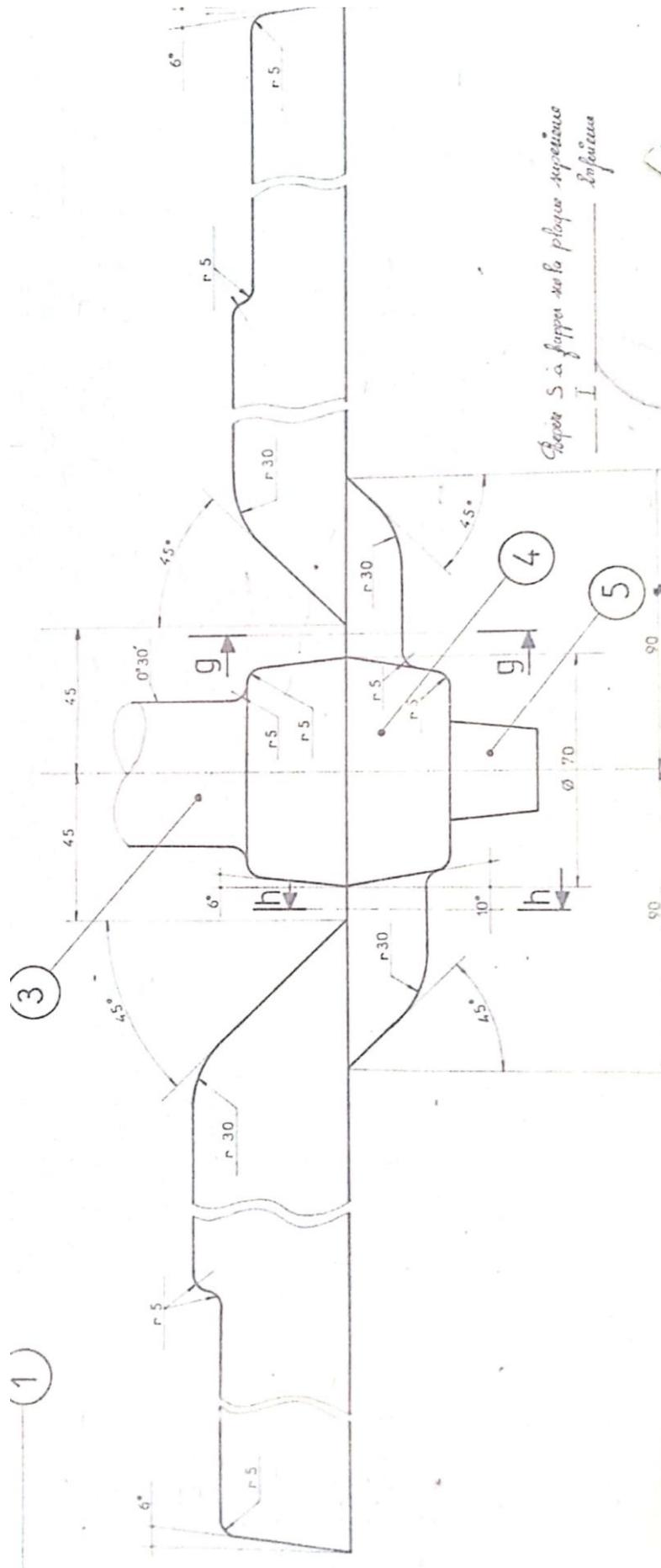
**Bibliographie**

- [1] P. CUÉNIN. Ingénieur Métiers, Industrie de la fonderie, 2013.
- [2] SNVI. Présentation [en ligne]. [Consulté le 20/06/2021]. Disponible à l'adresse : <http://snvigroupe.dz/pagesweb/pgentreprise.php>.
- [3] M. Dupeux, AIDE-MÉMOIRE Science des matériaux, Paris, DUNOD, 2005, 416P, ISBN: 9782-1007-9179-8.
- [4] G. BELLANGER responsable des projets, Conception et tracé des pièces moulées en fonte, ETIF, 2010, 314P, ISBN : 978-2-71-190242-2.
- [5] M. ROCHIER et J. P. LAHALLE- Caractérisation comparées des procédés de moulage et de noyautage- Fonderie Fondateur d' Aujourd'hui n° 60.
- [6] J. Zollinger, Affinement des microstructures lors de la solidification d'alliages métalliques, Lorraine: HAL, Oct 2019.
- [7] P. CUENIN, «Métallurgie des alliages de fonderie,» Technique d'ingénieur, déc 1996 .M3520 v1.
- [8] H. e. R. BETHGE, La simulation comme outil contribuant à l'optimisation du processus de fabrication et à la satisfaction du client, Konstruieren+Giessen, janvier 2000.
- [9] P. CUÉNIN, «Parachèvement. Finition,» Technique d'ingénieur, juin 1997. M3525 .
- [10] P. CUENIN. Ingénieur Arts et Métiers, «Contrôle. Qualité,» Technique d'Ingénieur.
- [11] P. BEAUVAIS, Les produits de moulage et de noyautage, Fonderie fondateur d'aujourd'hui n° 189, novembre 1999, p30-31.
- [12] G. BELLANGER, le masselottage des pièces moulées en sable, Ecole supérieure de Fonderie et de Forge (ESFF)-cours, version septembre 2007.
- [13] J. BOUCHER président de la Commission, INITIATION A LA FONDERIE, PARIS: DUNOD, 1967.
- [14] M. GEIER, METALLURGIE DE FONDERIE Tome II, Paris: EDITIONS EYROLLES, 1978.
- [15] A. Belhocine, THERMOMECHANIQUE DES DISQUES DE FREIN, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf: HAL, Apr 2013.
- [16] J. BRIARD, «Parachèvement en fonderie-Décochage. Grenailage,» Techniques d'Ingénieur, juin 2003.
- [17] J. BRIARD, «Parachèvement en fonderie-Ébarbage. Finition,» Techniques de l'Ingénieur, septembre 2003.
- [18] DOUR. G, Fonderie, alliages. Procédés. Propriétés, d'usage. Défauts, Aide-mémoire de l'ingénieur, DUNOD, 2009, 394P, ISBN : 2-10-007262-5.

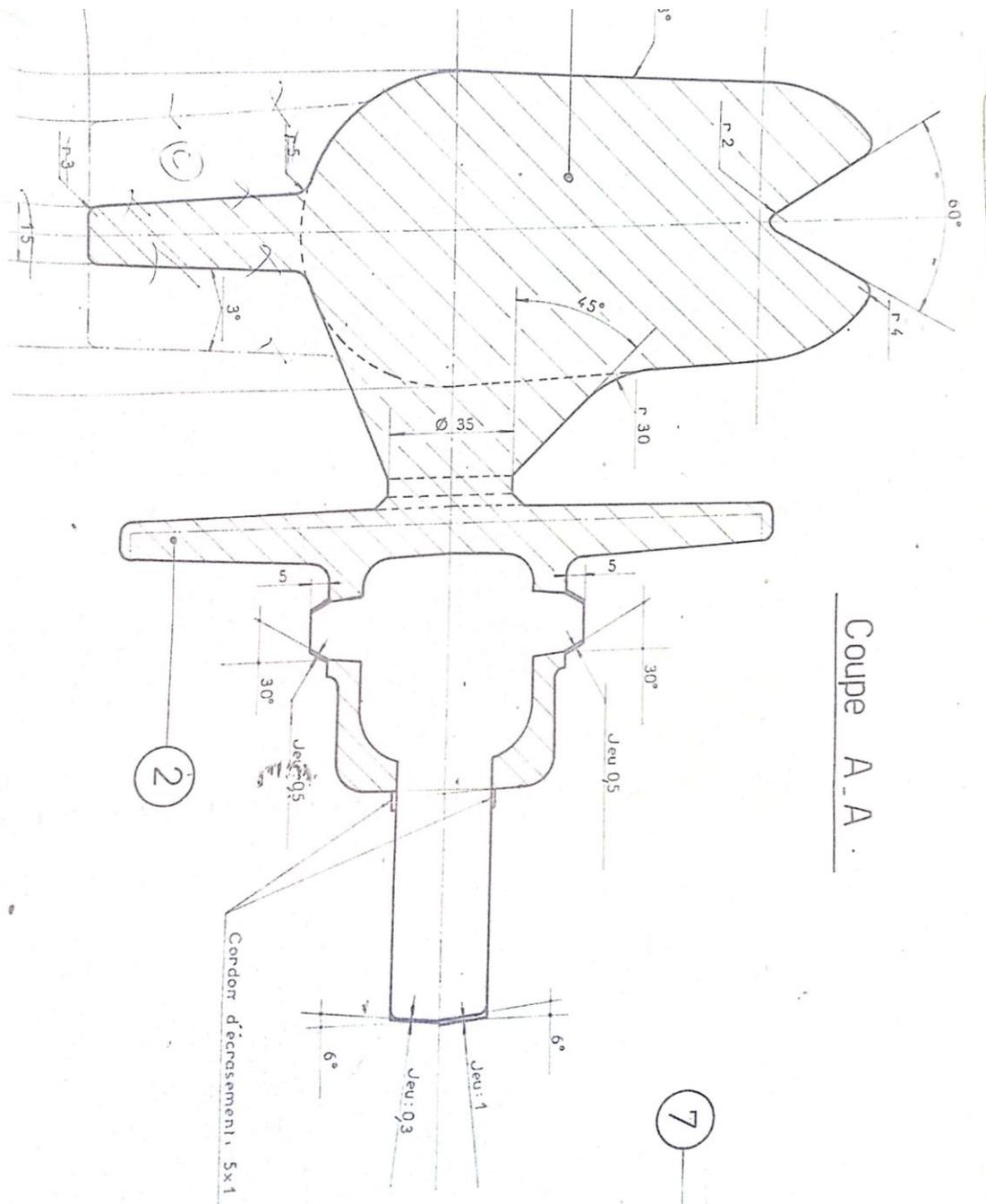


Plan de descent de coulé et chenal





Plan de masselotte



Relevé de gamme

N° Article		CD	SL	SM	Désignation Article		Date Création	Date Modif	Type Véhicule - Réf. Client			Type Organe				
5600 127		60	02	46	MACHOIRE DE FREIN		94012	21/11/2019	B-C-TB 230			P1332				
N° Brut Embarcauche Matière		U. E.	Qte. Poids Unit.		Désignation Brut Embarcauche Matière		Date Fin Util.	Qte. Poids Total		A. O.	Moyen Manutention	Quantité par Moyen Manutention				
1286724		7	23:33		FONTE GSC 38-15					100	ARCAN 200x900	40				
N° OP	LIG	Section	Machine	OT	UTS	UAS	Désign. Machine Lib le Opé	Cumul UAS	Décat	Jalon	TL	U	100	P. Bonne	P. Mauvaise	Date
01							MISE EN MAIN									
05	1	250	66312	1	115	115	SHALCO. A. NO. ANO. AN.									
05	2	250	0999				AN. AN. AN. BOITE									
05	3	250	0999				RECAPITULATIF									
10	1	254	67441	1	025	150	LIGNE. PH. MOUTAGE									
10	2	254	00000				AN. AN. AN. PIÈCE. MOULE									
10	3	254	09999				RECAPITULATIF									
15	1	256	88441	1	125	750	RECEPTION. CASSE. PP. PTA									
20	1	256	38441	1	022	022	GREN. DESSAB. TAPIS									
20	2	256	09999				RECAPITULATIF									
25	1	257	74911	1	285	285	DECOUPE. CHALUMEAU									
30	1	257	43441	1	170	170	MOUTAGE. BATTI. SOR									
35	1	257	09009	1	170	170	BURINAGE. E. PTA									
40	1	257	09001				CONTROLE									
40	2	257	09999				RECAPITULATIF									
46	1	258	96191	1	017	085	FERRITI. FOUR. POUSS									
46	2	258	09999				RECAPITULATIF									
50	1	260	98241	1	012	012	GRE. DEC. ALTA. RE.									
50	2	260	09999				RECAPITULATIF									

TYPE EPA FOR  
SUNSHINE A.M.T.

Relevé de gamme (suite)

U. F. R.				3DX 14   Ref											
N° Article	CD	SL	SM	Désignation Article	Date Création	Date Modif	Type Véhicule - Réf. Client	Type Organe							
5600200127				MACHOIRE DE FREIN			B-C-TB230	P 1332							
N° Brut Embauche Matière	U. E.	Qte. Poids Unit.		Désignation Brut Embauche Matière	Date Fin Util.	Qte. Poids Total	A. O.	Moyen Manutention	Quantité par Moyen Manutention						
							100	ARRCAN 90x 900	40						
N° OP	LIG	Section	Machine	O T	UTS	UAS	Désign. Machine Lib le Opé	Cumul UAS	Décat	Jalon	TL	U	100	P. Bonne P. Mauvaise	Date
56	1	261	02003	1	1125	1125	RE.TOUCH.FINI.T.PP								
60	1	261	02004				CONTR.ROLE								
60	2	261	09999		1125	1125	RECAPITULATIF								
65	1	262	99252	1	028	084	PEINTURE.INTERNESON								
65	2	262	09999		028	084	RECAPITULATIF								
							LIVRAISON...								