



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE
- ANNABA - (EX ENSMM)

DEPARTEMENT SCIENCE ET GENIE DES MATERIAUX

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT

SPECIALITE : SCIENCE ET GENIE DES MATERIAUX

Intitulé

*Etude et conception du système de coulé d'un support de couronne
ABS de frein en fonte grise et optimisation du taux de PML
Simulation du processus par le logiciel PROCAST*

Présenté par : Nardjes Rayane CHERABCHA

Khaoula BENABED

Tarek TAHRAOUI	MCA.ENSTI (EX ENSMM)	Président
Latifa KAHLOUL	MCA.ENSTI (EX ENSMM)	Examineur
Samia LEMBOUB	MCB.ENSTI (EX ENSMM)	Encadrant
Malek BELMELLAT	Ing ,SNVI	Co-Encadrant

Année 2022 / 2023



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
المدسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة
Ecole Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie -
Annaba

Département : Science et Génie des Matériaux

AUTORISATION DE DEPOT FINAL DU
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Je soussigné (e) Mr. Tahar Tarek
Président(e) du jury de soutenance de mémoire de fin d'études (MFE), déclare
avoir autorisé l'ingénieur d'état M. Benabed Khassim et Cherabcha Nardjes
à déposer son mémoire de fin d'études après avoir apporté les corrections Rayen
signalées par les membres du jury.

Avis du Promoteur :

avis favorable pour le dépôt final du mémoire de
fin d'études. le 11/07/2023 Shuaib

Avis de l'Examineur :

Président du Jury

Le 11/07/2023
Dr. Tarek Tahar
[Signature]

Remercîment

Nous vous remercions, Dieu, pour l'achèvement de notre projet de fin d'études. Nous sommes reconnaissants pour les connaissances acquises, les compétences développées et les défis surmontés tout au long de ce parcours. Nous sommes reconnaissants des opportunités qui nous ont été accordées. Nous prions pour que nos efforts soient fructueux et récompensés pour nous et pour tous les autres demandeurs du savoir.

*Nous exprimons notre profonde gratitude envers notre chère encadrant **Dr Samia LEMBOUB**, pour son engagement et sa précieuse collaboration tout au long de notre travail. Nous tenons à souligner sa constante disponibilité, sa patience et son dévouement à nous orienter toujours dans la bonne direction. Ses remarques pertinentes et constructives nous ont permis d'améliorer nos compétences et d'approfondir notre compréhension du sujet et de la spécialité.*

*Nous tenons également à remercier chaleureusement notre Co-encadrant, **Mr. BELMELLAT Malek**, ingénieur au sein de l'entreprise SNVI, pour sa disponibilité, sa coopération et ses encouragements. Il a fait tout son possible pour nous soutenir et nous aider tout au long de la préparation de ce mémoire de fin d'études. Il a également joué un rôle clé dans notre formation et notre maîtrise de l'outil d'ingénierie et de simulation ProCAST.*

*Nous souhaitons également exprimer notre gratitude à tout le personnel des ateliers de production de la fonte, en particulier au personnel du bureau des méthodes, **Mr Kamel AISSAOUI** et **Mr Zakaria AISSAOUI**. Leur contribution et leur collaboration ont été précieuses.*

*Un grand merci au directeur **Mr Saddek ZOUYED**, de nous avoir ouvert les portes de la SNVI pour réaliser notre stage d'ingénieur et aborder les problèmes de la fonderie de l'entreprise. Nous leur sommes reconnaissants de nous avoir offert cette opportunité.*

*Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à notre enseignante **Dr Latifa KAHLOUL** pour avoir accepté de présider le jury de notre soutenance de fin de cycle. Nous tenons également à remercier chaleureusement notre enseignant **Mr Tarek TAHRAOUI** pour avoir accepté d'examiner notre travail.*

Nous sommes conscients que nos mots ne seront jamais suffisants pour exprimer toute notre reconnaissance envers nos parents, nos proches et toutes les personnes qui nous sont chères. Leur soutien inconditionnel, leur encouragement et leur amour ont été essentiels dans notre parcours, et nous leur en sommes infiniment reconnaissants.

Résumé

La Société Nationale des Véhicules Industriels (SNVI) de Rouïba est confronté actuellement à un problème de retassures sur les supports de couronne ABS fabriqués en fonte GS 38-15. Ces retassures affectent considérablement les propriétés mécaniques des pièces produites et réduisent leur durée de vie, entraînant ainsi des coûts supplémentaires pour l'entreprise.

Des modifications du système de coulée et d'alimentation ainsi qu'une optimisation du taux de PML ont été proposés et étudiés à l'aide du logiciel ProCAST et SolidWorks comme solution. Ainsi, le nouveau système a considérablement réduit le taux de retassures, et le taux de PML est passé de 13 kg à 8,93 kg.

Un nouveau régime de traitement de ferritisation a été optimisé et vérifié par des essais de dureté, micro-dureté, traction et analyses métallographiques pour améliorer les caractéristiques de ductilité et de résilience.

Abstract

The National Company of Industrial Vehicles (SNVI) of Rouiba is currently facing a problem of shrinkage on the ABS crown supports manufactured in GS 38-15 cast iron. These shrinkages significantly affect the mechanical properties of the parts produced and reduce their service life, thus resulting in additional costs for the company.

Modifications to the casting and feeding system, as well as an optimization of the PML rate, have been proposed and studied using ProCAST software and SolidWorks as a solution. As a result, the new system has significantly reduced the rate of shrinkages, and the PML rate has decreased from 13 kg to 8.93 kg.

A new ferritization treatment regime has been optimized and verified through hardness, micro-hardness, tensile tests, and metallographic analyses to improve the ductility and resilience characteristics.

ملخص

تواجه الشركة الوطنية للمركبات الصناعية (سنفي) في رويبا حاليًا مشكلة في الانكماش على دعائم التاج المصنوعة من الحديد الزهر. تؤثر هذه الانكماشات بشكل كبير على الخواص الميكانيكية للأجزاء المنتجة وتقلل من عمرها التشغيلي، مما يتسبب في تكاليف إضافية للشركة.

تم اقتراح ودراسة تعديلات على نظام الصب والتغذية، بالإضافة إلى تحسين معدل الوزن-المعدن-السائل كحل لهذه المشكلة. وبالتالي، قلل النظام الجديد بشكل كبير من معدل الانكماشات، وانخفض معدل الوزن-المعدن-السائل من 13 كجم إلى 8.93 كجم.

تم تحسين والتحقق من نظام جديد لمعالجة التحويل الفيريتي للحصول على خصائص اللدونة والمرونة من خلال إجراء اختبارات لقساوة المادة، والقساوة المجهرية، واختبارات الشد، وتحليلات الميتالوغرافية.

Table de matière

chapitre I	Présentation de l'entreprise.....	1
I.1	Présentation	2
I.1.1	Statut et forme juridique	2
I.1.2	Historique.....	2
I.1.3	Processus opérationnels	3
I.1.4	Technologies et techniques de mises en œuvre	3
I.1.5	Capacité annuelle de production de la SNVI.....	3
I.2	Organigramme	4
I.2.1	Société mère.....	5
I.2.2	Filiale Véhicules Industriels de Rouïba (V.I.R).....	6
I.2.3	Filiale Carrosseries Industrielles de Rouïba (C.I.R)	6
I.2.4	Filiale Carrosseries Industrielles de Tiaret (C.I.T)	6
I.2.5	Epe Entreprise Rénovation Véhicule Industrielle (E.R.V.I).....	6
I.2.6	Filiale Fonderies de Rouïba (FOR).....	6
I.2.6.1	Historique	7
I.2.6.2	But visé de la F.O.R.....	7
I.2.6.3	Présentation de la F.O.R.....	7
I.2.6.4	Ateliers industriels de la F.O.R	8
I.2.6.4.1	Sablerie	8
I.2.6.4.2	Fusion.....	8
I.2.6.4.3	Moulage	8
I.2.6.5	Bureau des méthodes	9
I.2.6.5.1	Rôle de service méthodes	9
chapitre II	Partie Bibliographique.....	10
II.1	Fonderie	11
II.1.1	Introduction	11
II.1.2	Mise en forme d'une pièce en fonderie	11

II.1.2.1	Conception de la pièce.....	11
II.1.2.2	Opérations élémentaires	11
II.1.2.2.1	Modelage.....	11
II.1.2.2.2	Noyautage	12
II.1.2.2.3	Fusion.....	13
II.1.2.2.4	Coulée	13
II.1.2.2.5	Parachèvement	14
II.1.2.2.5.1	Contrôle des caractéristiques physiques	14
II.1.2.2.5.2	Contrôles non destructifs	14
II.1.2.2.5.3	Contrôles non destructifs de la santé interne	15
II.2	Moulage	15
II.2.1	Définition	15
II.2.2	Etapes préliminaires à suivre avant le moulage	16
II.2.3	Procédé de moulage	16
II.2.3.1	Les procédés à moule non permanent (moules perdus).....	17
II.2.3.2	Les procédés à moule permanent (coquilles)	17
II.2.4	Moulage en sable.....	17
II.2.4.1	Définition.....	17
II.2.4.2	Composition du sable de moulage :.....	18
II.2.4.3	Caractéristiques du sable de moulage.....	18
II.2.4.4	Étapes de préparation et de mise en œuvre du sable	19
II.2.4.5	Opérations de moulage en sable	20
II.2.4.6	Éléments constitutifs d'un moule.....	21
II.2.4.7	Processus de la préparation de sable du moulage	21
II.2.5	Propriétés de fonderie.....	21
II.2.5.1	Coulabilité	21
II.2.5.2	Retrait	21
II.2.6	Défauts de fonderie	22
II.2.6.1	Ségrégations.....	22

II.2.6.2	Retassures	23
II.2.6.3	Criques.....	23
II.2.6.4	Soufflures.....	24
II.2.6.5	Crasses	24
II.2.7	Avantages	25
II.2.8	Inconvénients	25
II.3	Modèle	25
II.4	Noyau et boîte à noyau	26
II.5	Règles de tracé des pièces moulées	26
II.6	Système de coulé et d'alimentation	27
II.7	Fonte	27
II.7.1	Définition	27
II.7.2	Types de fontes.....	28
II.7.2.1	Fonte grise	28
II.7.2.1.1	Fonte grise à graphite lamellaire.....	28
II.7.2.1.2	Fonte grise à graphite sphéroïdal	29
II.7.2.1.3	Rôle du graphite dans les fontes grises	29
II.7.2.2	Fonte malléable.....	30
II.7.2.2.1	Fonte malléable à cœur noir.....	30
II.7.2.2.2	Fonte malléable à cœur blanc	30
II.7.2.3	Fonte blanche.....	31
II.8	Influence des différents éléments d'addition sur les propriétés d'une fonte GL	33
II.8.1	Silicium	33
II.8.2	Phosphore	34
II.8.3	Etain	34
II.8.4	Cuivre	34
II.8.5	Manganèse et Soufre	34
II.9	Traitements thermiques	35
II.9.1	Trempe	35

II.9.2	Revenu.....	36
II.9.3	Recuit	36
II.9.4	Recuit de ferritisation	36
II.9.4.1	Recuit à une température comprise entre 820 et 900°C	37
II.9.4.2	Recuit à une température comprise entre 730 et 790°C	37
II.9.4.3	Influence du recuit de ferritisation sur le comportement mécanique	38
II.10	Phénomènes de solidification, germination et surfusion	39
II.10.1	Solidification d'un métal pur.....	39
II.10.2	Solidification d'une fonte.....	39
II.11	Structure cristalline d'une pièce coulée	40
chapitre III	Etude et simulation.....	41
III.1	Introduction	42
III.2	Etude et conception de la pièce	43
III.2.1	Pièce étudiée.....	43
III.2.1.1	Définition	43
III.2.1.2	Carte technique	43
III.2.2	Étapes de réalisation du plan de brut.....	44
III.2.3	Facteurs de sélection des matériaux	45
III.2.4	Etude de moulage	46
III.2.5	Création du système de coulée et d'alimentation.....	47
III.3	Modélisation de la pièce	47
III.3.1	Présentation du logiciel utilisé	47
III.4	Simulation de la pièce.....	48
III.4.1	Présentation du logiciel utilisé	48
III.4.2	Etape à suivre pour la modélisation	49
III.4.3	Maillage.....	50
III.4.4	Coulée.....	50
III.4.5	Analyse des images de remplissage du moule	50
III.5	Présentation du problème détecté	53

III.6	Remède au défaut	53
III.6.1	Analyse des images de remplissage du moule	54
III.6.2	Optimisation du taux de poids de métal liquide «PML».....	60
III.7	Résultats obtenus suite aux récentes modifications.....	60
III.8	But de la modélisation et de la simulation.....	60
III.9	Calcul de système d'alimentation.....	61
III.10	Conclusion	66
chapitre IV	Matériaux et techniques expérimentales	67
IV.1	Introduction	68
IV.2	Type du matériau de la pièce étudiée	68
IV.3	Quelques Caractéristiques du matériau de la pièce étudié	68
IV.4	Caractérisation de la fonte FGS 38-15	69
IV.4.1.1	Analyse chimique.....	69
IV.4.1.2	Traitement thermique	69
IV.4.1.3	Etude des propriétés	70
IV.4.1.3.1	Préparation d'échantillons	70
IV.4.1.3.2	Observation métallographique	71
IV.4.1.3.3	Essai de dureté	72
IV.4.1.3.4	Essai de micro-dureté.....	72
IV.4.1.3.5	Essai de traction	73
chapitre V	Interprétation des résultats	74
V.1	Introduction	75
V.2	Résultats des analyses et essais réalisés	75
V.2.1	Analyse chimique	75
V.2.2	Observation métallographique	75
V.2.2.1	Analyse de la microstructure de l'échantillon 0 (non traité thermiquement). 76	
V.2.2.2	Analyse de la microstructure de l'échantillon 8 (traité thermiquement)	77
V.2.2.3	Analyse de la microstructure des échantillons 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 (traités thermiquement)	78

V.2.3	Discussion des résultats obtenus	79
V.2.3.1	Influence de la température de chauffage sur la microstructure des échantillons 1, 2 ,3 et 4.....	79
V.2.3.2	Influence du temps de maintien sur la microstructure des échantillons 5,6 et 7 80	
V.2.3.3	Comparaison entre l'échantillon traité à la SNVI et l'échantillon (2).....	80
V.2.4	Essai de dureté.....	80
V.2.4.1	Influence de la température de chauffage sur la dureté des échantillons 1, 2 ,3 et 4	81
V.2.4.2	Influence du temps de maintien sur la dureté des échantillons 5,6 et 7	82
V.2.4.3	Comparaison entre l'échantillon traité à la SNVI et l'échantillon (2).....	82
V.2.5	Essai de micro dureté	82
V.2.5.1	Influence de la température de chauffage sur la micro dureté des échantillons 1, 2 ,3 et 4	83
V.2.5.2	Influence de la température de chauffage sur la micro dureté des échantillons 5,6 et 7	83
V.2.5.3	Comparaison entre l'échantillon traité à la SNVI et l'échantillon (2).....	83
V.2.6	Essai de traction	83
V.2.7	Caractérisation mécanique de la fonte GS 38-15	84
V.2.8	Conclusion.....	85

Liste des figures

Fig. I.1 : La société nationale des véhicules industriels	2
Fig. I.2 : Les différentes filiales de la SNVI	4
Fig. I.3 : L'organigramme de la SNVI-Rouïba	5
Fig. I.4 : Ateliers de la fonderie de Rouïba	8
Fig. II.1 : Plaque modèle métallique pour moulage en sable	12
Fig. II.2 : Modèle des pièces en bois.....	12
Fig. II.3: Boîte à noyau à froid.....	12
Fig. II.4 : Boîte à noyau à chaud	12
Fig. II.5 : Noyau d'une pièce	13
Fig. II.6 : Four à induction	13
Fig. II.7 : Processus de coulé du métal.....	14
Fig. II.8 : Moule en sable	15
Fig. II.9 : Schéma explicatif du moulage	16
Fig. II.10 : Moulage en moule permanent.....	17
Fig. II.11 : Pièces obtenues par moulage en sable	18
Fig. II.12 : Composition chimique du sable de moulage	18
Fig. II.13 : Processus de préparation et du sable.....	20
Fig. II.14 : Etapes de moulage en sable.....	20
Fig. II.15 : Les composants du moule	21
Fig. II.16 : Schéma explicatif du retrait	22
Fig. II.17 : Retassure sur fonte graphite sphéroïdal	23
Fig. II.18 : Crique apparente sur une pièce	24
Fig. II.19 : Soufflures visibles sur une pièce.....	24
Fig. II.20 : Modèle d'une pièce métallique	26
Fig. II.21 : Fonte de production.....	28
Fig. II.22 : Morphologie d'une fonte à graphite lamellaire.....	29
Fig. II.23 : Microstructure d'une fonte à graphite sphéroïdal	29
Fig II.24 : Morphologies des fontes malléables à cœur noir.....	31
Fig II.25 : Morphologies des fontes malléables à cœur blanc.....	31
Fig II.26 : Microstructure d'une fonte blanche	31
Fig. II.27 : Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	33
Fig. II.28 : Structure cristalline d'une pièce solidifiée	40
Fig. III.1 : Support de couronne ABS	43

Fig. III.2 : Interface du logiciel SolidWorks	47
Fig. III.3 : Dessin de support de couronne ABS par le SolidWorks	48
Fig III.4 : Présentation du logiciel ProCAST	49
Fig III.5 : Remplissage de l'empreinte du support de couronne ABS et du système de coulée	51
Fig III.6 : Simulation de la solidification du métal liquide dans toutes les parties de la pièce	51
Fig III.7 : Variation de la température dans différentes zones de la pièce	52
Fig. III.8 : Variation de la température en fonction du temps des zones correspondants aux points (4, 5, 6)	52
Fig. III.9 : Remplissage de l'empreinte du support de couronne ABS et du système de coulée	54
Fig. III.10 : Simulation de la solidification du métal liquide dans toutes les parties de la pièce au cours du temps	55
Fig. III.11 : Variation de la température dans les différentes zones de la pièce	56
Fig. III.12 : Variation de la température en fonction du temps de solidification des zones correspondants aux points (1, 4, 5)	56
Fig. III.13 : Variation de la fraction solide dans les zones associées aux points (1, 4, 5) au fil du temps	57
Fig. III.14 : Simulation de l'évolution de la proportion de solide dans tout le système au fil du temps	58
Fig. III.15 : Les étapes de formation de la fraction solide au fil temps.....	58
Fig. III.16 : Simulation de la vitesse d'écoulement du métal au cours du temps	59
Fig. III.17 : Système de coulée et d'alimentation avant modification	60
Fig. III.18 : Système de coulée et d'alimentation après modification.....	60
Fig. III.19 : Plan final du support de couronne ABS.....	61
Fig III.20 : Position de la pièce dans le moule	61
Fig. III.21 : Attaque de coulée.....	64
Fig III.22 : Chenal de coulée	64
Fig III.23 : Descente de coulé	65
Fig III.24 : Entonnoir de coulé	65
Fig IV.1 : Pièces des supports de couronne ABS.....	68
Fig IV.2 : Image de l'analyseur spectrométrique	69
Fig IV.3 : Analyseur de soufre et de carbone de type Leco	69
Fig IV.4 : Four de chauffage de type NABERTHERM.....	70
Fig IV.5 : Image de la scie mécanique de la SNVI	71
Fig IV.6 : Polissage avec du papier abrasif	71

Fig IV.7 : Microscopie optique de type OPTIKA.....	72
Fig IV.8 : Duromètre de type Zwick/Roell	72
Fig IV.9 : Micro-duromètre de type Zwick/Roell	72
Fig IV.10 : Machine de traction de type SHIMADZ	73
Fig V.1 : Microstructure de l'échantillon (0) non traité thermiquement non attaqué (x100) ..	76
Fig V.2 : Microstructure de l'échantillon (0) non traité thermiquement attaqué (x100)	77
Fig V.3 : Microstructure de l'échantillon (8) traité thermiquement attaqué (x100)	77
Fig V.4 : Microstructure de l'échantillon 1 traité thermiquement attaqué (x100)	78
Fig V.5 : Microstructure de l'échantillon 2 traité thermiquement attaqué (x100)	78
Fig V.6 : Microstructure de l'échantillon 3 traité thermiquement attaqué (x100)	78
Fig V.7 : Microstructure de l'échantillon 4 traité thermiquement attaqué (x100)	78
Fig V.8 : Microstructure de l'échantillon 5 traité thermiquement attaqué (x100)	78
Fig V.9 : Microstructure de l'échantillon 6 traité thermiquement attaqué (x100)	78
Fig V.10 : Microstructure de l'échantillon 7 traité thermiquement attaqué (x100)	79
Fig V.11 : Variations de la dureté (HV) des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8	81
Fig V.12 : Variations de la micro dureté (HV) des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8.....	82
Fig V.13 : Variations de la Résistance à la traction des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8.	84

Liste des tableaux

Tab. II.1 : Composition et propriétés des sables spéciaux	18
Tab. III.1 : Carte technique d'un support de couronne ABS.....	44
Tab III.2 : Paramètres obtenus à partir du logiciel ProCAST	53
Tabl. III.3: Paramètres obtenus à partir du logiciel ProCAST	57
Tableau III.4 : Valeurs du coefficient X	62
Tableau III.5 : Valeurs du coefficient S	65
Tab IV.1 : Les principales caractéristiques de fonte FGS 38-15	68
Tab IV.2 : Les teneurs en éléments constituant la fonte FGS 38-15.....	69
Tab IV.3 : Les régimes de traitement thermique de ferritisation proposés	70
Tab V.1 : Composition chimique de la fonte GS 38-15.....	75
Tab V.2 : L'état des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8	76
Tab V.3 : Taux de ferrite dans les différentes microstructures	79
Tab V.4 : Mesures de dureté des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8.....	Erreur ! Signet non défini.
Tab V.5 : Mesures de micro dureté des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 ...	Erreur ! Signet non défini.
Tab V.6 : Résistance à la traction des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8	Erreur ! Signet non défini.
Tab V.7 : Caractéristiques mécaniques de la fonte GS 38-15.....	Erreur ! Signet non défini.

Liste des abréviations

ABS : Anti-lock braking system

C.I.R : Carrosseries Industrielles de Rouïba

C.I.T : Carrosseries Industrielles de Tiaret

CAO : Conception assistée par ordinateur

E.R.V.I : Entreprise Rénovation Véhicule Industrielle

ECM : Engine Control Module

ENSM : Ecole nationale supérieure des mines et métallurgies

ENSTI : Ecole Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie

EPE : Établissement Public à caractère Économique

ETRAG : Entreprise Tracteurs Agricoles

FOR : Fonderies de Rouïba

GL : Graphite lamellaire

GS : Graphite sphéroïdale

PML : Pois-Metal-Liquide

SNVI : Société nationale des véhicules industriels

SONACOM : Société nationale de construction mécanique

SPA : Société par Actions

V.I.R : Véhicules Industriels de Rouïba

Introduction générale

Les pièces moulées constituent le maillon fort de la chaîne de fabrication des voitures et autres engins civiles et militaires. Le passage de l'état liquide à l'état solide en imprimant à l'acier des formes, des dimensions et un état de surface déterminé constitue la meilleure des techniques de fabrication des pièces finies.

La fonderie de la société nationale des véhicules industriels « SNVI » de Rouiba fleuron de l'industrie mécanique Algérienne fabrique une multitude de pièces pour les engins parmi lesquelles les supports de couronne de frein ABS.

Le système antiblocage des roues (Anti-lock braking system), plus communément appelé ABS, est un système de sécurité automobile conçu pour empêcher le blocage des roues pendant le freinage, ce qui peut causer la perte de contrôle du véhicule. Ce système de freinage électronique utilise des capteurs pour surveiller la vitesse des roues en relâchant et en appliquant rapidement les freins.

L'ABS a été introduit pour la première fois dans les voitures de course dans les années 1960, avant d'être progressivement adopté par les voitures de tourisme à partir des années 1970. Aujourd'hui, l'ABS est devenu un équipement standard dans la plupart des voitures modernes.

Comme toutes les entreprises de renommée qui désirent préserver leur image de marque, la SNVI vise une production de pièces avec le minimum de rebut et par conséquent le minimum de défauts tels que les retassures, les porosités, les criques, ...etc.

Notre projet de fin de cycle a pour objectif de réduire le taux de micro-retassures apparaissant au niveau des supports de couronne en fonte grise à graphite sphéroïdal en modifiant le système de coulée et d'alimentation à l'aide du logiciel ProCAST et solidWorks. Ce travail a également visé à optimiser le taux de PML afin de réduire les coûts de production et de charge supplémentaire tout cela pour minimiser le prix de revient de notre support de couronne en fonte GS 38-15 fabriqués à la fonderie de la SNVI de Rouiba.

Une autre voie de réduction du coût de la pièce a été prospectée sur la base de l'optimisation des paramètres du traitement final de la fonte en l'occurrence le traitement de

ferritisation qui consiste à améliorer la ductilité et la résistance au choc des supports de couronne de frein de la SNVI.

Pour mener à bien ce travail de fin d'études, nous avons présenté le mémoire en 5 chapitres :

- ✓ Le 1^{er} chapitre est dédié à la présentation de l'entreprise SNVI de Rouïba.
- ✓ Le 2^{ème} chapitre est consacré à l'analyse bibliographique décrivant les fontes en général et particulièrement la fonte GS.
- ✓ Le 3^{ème} chapitre présentera l'étude et la simulation qui donnera les détails du calcul du système de coulée et d'alimentation ainsi que le calcul du nouveau taux de PML.
- ✓ Le 4^{ème} chapitre comportera la partie matériaux et techniques expérimentales.
- ✓ Le 5^{ème} chapitre portera sur les détails de discussion et interprétation des principaux résultats du mémoire.

chapitre I

Présentation de

l'entreprise

I.1 Présentation

La SNVI «Société nationale des véhicules industriels», anciennement connue sous le nom de SONACOME « Société nationale de construction mécanique », est une entreprise publique Algérienne spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des véhicules industriels (**Fig. I.1**) et de transport (Camions, bus) ainsi que des pièces de rechange, basé à Rouïba - Alger. En plus de ses activités principales, la SNVI offre également un large éventail de service après-vente tels que le service clientèle, les pièces détachées, les réparations et les formations techniques. La société dispose également d'un réseau national de concessionnaires qui offrent une gamme complète de services aux clients.

Elle a réussi depuis sa création à s'imposer en tant que leader régional dans sa spécialité et à bâtir un label grâce à la qualité de ses produits.



Fig. I.1 : La société nationale des véhicules industriels

I.1.1 Statut et forme juridique

La SNVI est une entreprise publique économique qui se présente sous la forme juridique d'une société par actions (EPE-SPA). Son capital social s'élève à 2,2 milliards de dinars et est détenu entièrement par l'Etat. Elle est implantée à Z.I Rouïba, Route nationale n°5 – BP 153 – Wilaya d'Alger.

I.1.2 Historique

Depuis sa création, l'entreprise a connu une croissance remarquable et a évolué pour maintenir sa position et de se figurer parmi les entreprises qui contribuent à la création de richesses.

La SONACOM a été créée en 1967 en tant qu'entreprise publique à vocation d'exploiter et de gérer les usines de construction mécanique du secteur public. Ses origines remontent cependant à la colonisation française de l'Algérie, plus précisément en juin 1957, lorsque la société française BERLIET s'est implantée sur le territoire Algérien.

En 1995, elle a changé de statut juridique pour devenir une Entreprise Publique économique régie par le droit commun.

Enfin, en octobre 2011, elle est devenue un Groupe Industriel composé d'une Société mère et de quatre filiales, après avoir passé par une période de restructuration et de transformation en Entreprise Nationale de Véhicules Industriels à caractère socialiste.

I.1.3 Processus opérationnels

Cette entreprise se consacre à la création, la production, la vente et l'assistance technique d'une vaste sélection de produits, notamment :

- Des camions d'un poids total en charge de 6,6 à 26 tonnes.
- Des autocars, autobus, minibus et minicars pouvant accueillir entre 25 et 100 passagers.
- Des camions spéciaux, des remorques, des semi-remorques, des équipements de carrosserie industrielle et des porte-engins pesant entre 3 et 75 tonnes.
- Des pièces brutes de fonderie.

I.1.4 Technologies et techniques de mises en œuvre

Il y a plusieurs techniques qui sont :

- Fonderie fonte et aluminium
- Estampage à chaud
- Emboutissage et formage
- Usinages de précision
- Production de pièces en polyester
- Travaux de chaudronnerie et de soudage

I.1.5 Capacité annuelle de production de la SNVI

- La Filiale véhicules industriels de Rouïba Produit 4500 Unités des véhicules motorisés (camions, autocars et autobus).
- La Filiale fonderies de Rouïba Produit environ 9000 Tonnes de pièces de fonderie en fonte et en aluminium.
- La Filiale Carrosseries Industrielles de Rouïba Produit 8500 Unités de toutes carrosseries portées, sur camions (benne, plateau, frigo...), ainsi que de minicars de 25 places.

I.2 Organigramme

Le Groupe Industriel SNVI (**Fig. I.2**) est composé de :

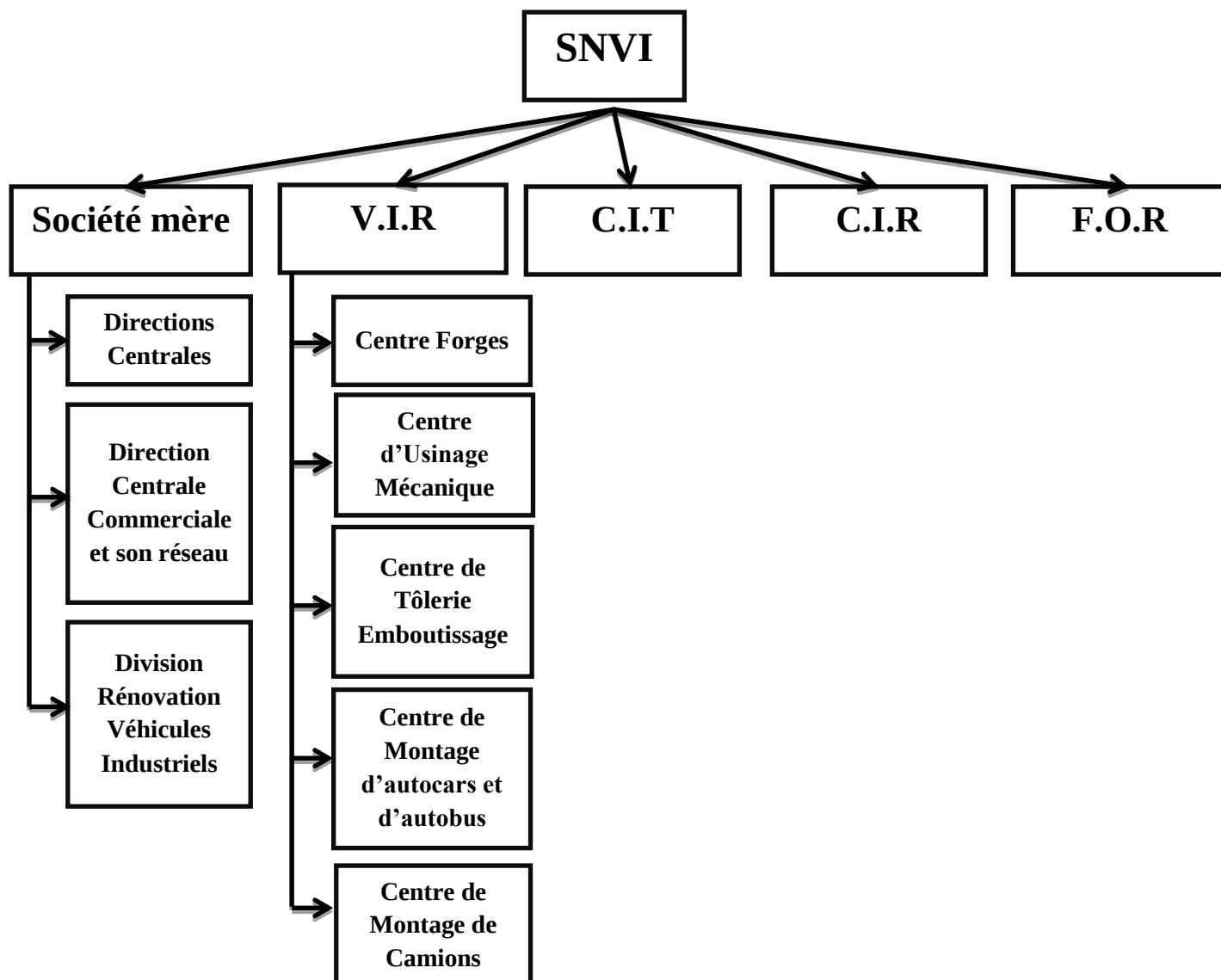


Fig. I.2 : Les différentes filiales de la SNVI

I.2.1 Société mère

La société mère (**Fig I.3**) est schématisée comme suit :

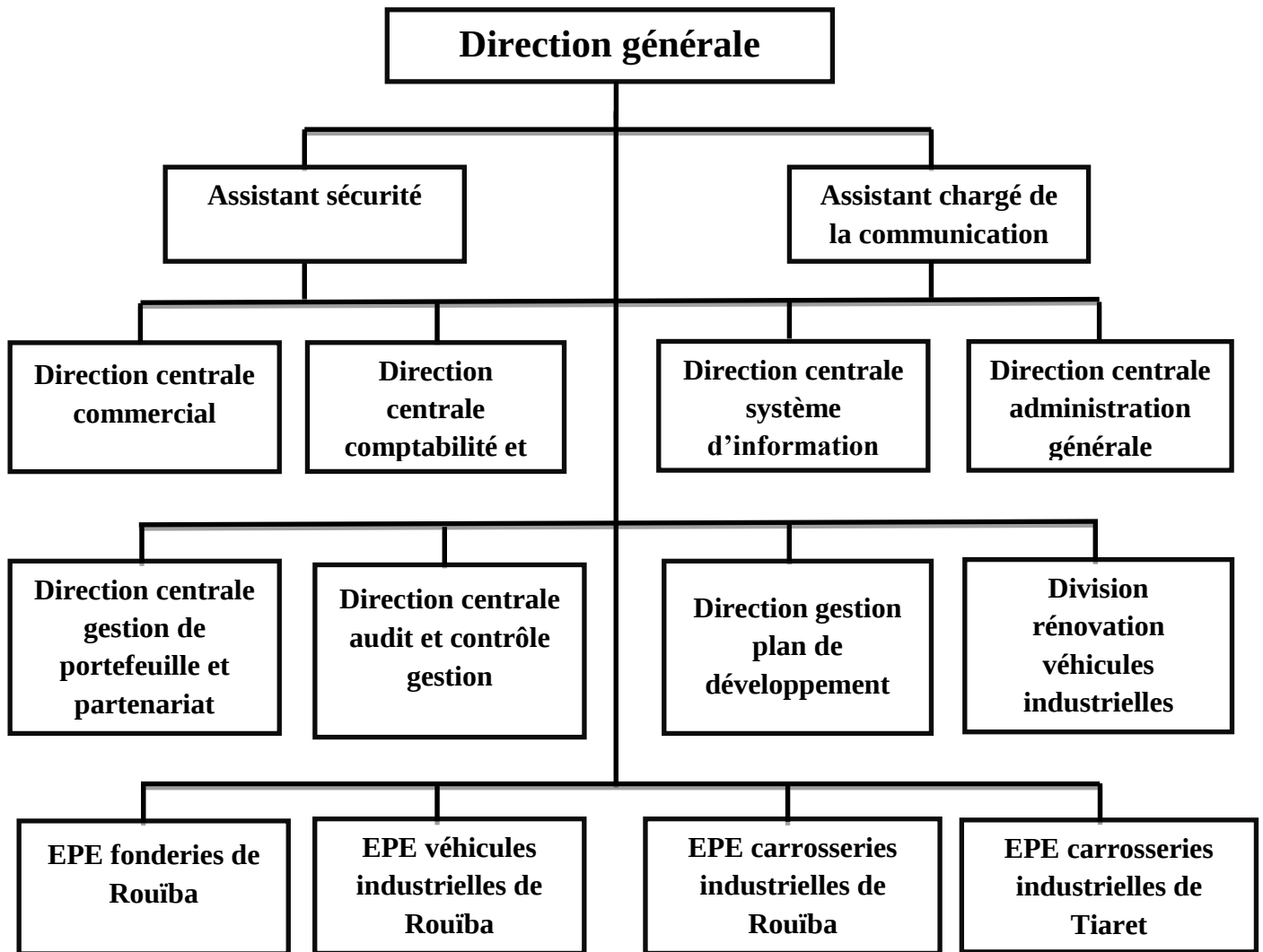


Fig. I.3 : L'organigramme de la SNVI-Rouïba

La société mère a pour objectif :

- ✓ Assurer le contrôle des filiales et gérer le portefeuille de participation dans les joint-ventures suivantes :
 - ZF Algérie : SNVI 20%/ ZF Allemagne 80%.
 - SAPPL-MB : Société Algérienne pour la Production de Poids Lourds de marque Mercedes-Benz à Rouïba : SNVI 17% / EPIC EDIV (MDN) 34% / AABAR (Emirats Arabes Unis) 49% avec DAIMLER (partenaire technologique).

- AMS-MB : Algerian Motors Services Mercedes-Benz à Rouïba : SNVI 17% / EPIC EDIV (MDN) 34% AABAR (émirats Arabes Unis) 49% avec DAIMLER (partenaire technologique).
 - SAFAV-MB : Société Algérienne pour la Fabrication de Véhicules de Marque Mercedes-Benz à Tiaret. SNVI 17% / EPIC EDIV (MDN) 34% / AABAR (émirats Arabes Unis) 49% avec DAIMLER (partenaire technologique).
 - RAP : Renault Algérie Production SNVI 34% /FNI (Fonds National d'Investissement) 17% / Renault 49%.
- ✓ Elaborer et mettre en place la politique financière de l'entreprise.
 - ✓ Définir la politique de rémunération et de développement des ressources humaines du groupe.
 - ✓ Maintenir les activités actuelles de l'entreprise.

I.2.2 Filiale Véhicules Industriels de Rouïba (V.I.R)

La filiale V.I.R fabrique une gamme de véhicules, y compris des camions d'une capacité allant de 6,6 à 26 tonnes, des tracteurs routiers, des autocars et des autobus, en utilisant une variété de techniques et de technologies telles que l'emboutissage, le taillage d'engrenages, la rectification, le forgeage et les traitements thermiques.

I.2.3 Filiale Carrosseries Industrielles de Rouïba (C.I.R)

La filiale C.I.R fabrique des équipements qui peuvent être tractés ou portés, ainsi que des caisses pour châssis mécanisés pour minibus et minicars.

I.2.4 Filiale Carrosseries Industrielles de Tiaret (C.I.T)

La filiale C.I.T se concentre sur la création et la production de carrosseries industrielles qui peuvent être tractés ou portés.

I.2.5 Epe Entreprise Rénovation Véhicule Industrielle (E.R.V.I)

Offre une large gamme de services dans le secteur de l'énervation de véhicules, avec une expertise particulière dans la réparation et la remise en état de matériel lourd, de véhicules de transport routier et de voitures, ainsi que dans la rénovation de pièces mécaniques pour toutes sortes de véhicules.

I.2.6 Filiale Fonderies de Rouïba (FOR)

Notre stage pratique de fin de cycle a eu lieu au niveau de cette fonderie FOR.

I.2.6.1 Historique

La mise en exploitation de la filiale fonderie de Rouïba a débuté le 1^{er} janvier 1983.

La fonderie a effectué sa première coulée le 11 novembre 1980 et a été officiellement acceptée le 30 novembre 1984. A partir de 1987, elle est devenue autonome dans sa gestion, bien qu'elle reste rattachée à la direction générale de la SNVI.

I.2.6.2 But visé de la F.O.R

L'objectif principal de la filiale fonderie consiste à produire des pièces brutes de fonderie en fonte (fonte grise sphéroïdale GS, fonte grise lamellaire) et en aluminium destinée principalement au secteur mécanique, mais aussi à d'autres secteurs tels que l'hydraulique, les matériels agricoles et les travaux publics.

I.2.6.3 Présentation de la F.O.R

La F.O.R est implanté sur un site de 60 hectares, elle est composée de :

- Un bâtiment principal qui se compose de six (06) parties :
 - D'un bâtiment entretien
 - D'un bâtiment énergie
 - D'un bâtiment stockage
 - D'un bâtiment administratif
 - D'une Fonderie de Rouïba : bâtiment unité traitement de sable.
- Un dispositif de production de la fonderie qui contient six (06) unités :
 - Fonderie aluminium
 - Maintenance et modelage
 - Fusion
 - Noyautage
 - Parachèvement
 - Contrôle et analyse
- Concernant la fonte grise sphéroïdale et lamellaire on a six (06) ateliers :
 - Un atelier de fusion
 - Un atelier de noyautage en Silicate et Corning
 - Un atelier de moulage
 - Un atelier de parachèvement
 - Une unité de traitement de sable
 - Un atelier de modelage « le lieu où notre stage a été effectué »

La capacité de production de cette filiale est de 9000 tonnes annuelles de fonte grise ainsi que de 300 tonnes annuelles d'aluminium.

I.2.6.4 Ateliers industriels de la F.O.R

La fonderie (**Fig. I.4**) dispose des ateliers suivants :

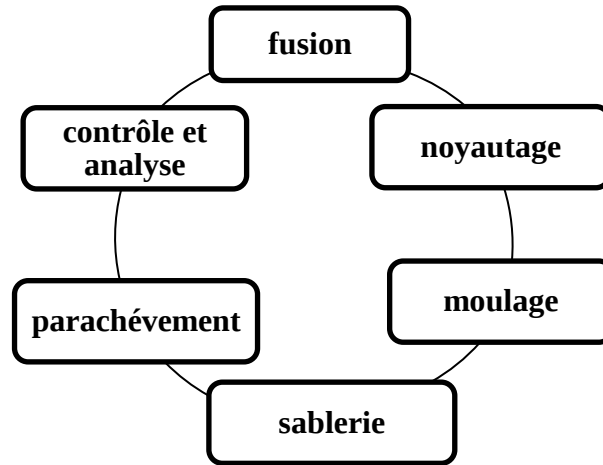


Fig. I.4 : Ateliers de la fonderie de Rouïba

I.2.6.4.1 Sablerie

La sablerie comprend une série de tamis, de tapis de transport de sable et de silos de stockage qui ont pour but de fournir le sable traité à l'atelier de moulage pour la fabrication de moules. Une nouvelle sablerie plus performante et moderne a remplacé l'ancienne sablerie, qui est équipée de trois malaxeurs, un tamis rotatif polygonal, un refroidisseur et deux séparateurs magnétiques. De plus, des silos de stockage de sable ont également été ajoutés.

I.2.6.4.2 Fusion

L'atelier Fusion est équipé de trois fours de maintien et deux fours à arc électrique, d'un système intégré de traitement du métal liquide au magnésium, d'un dispositif de pesage, de deux poches de traitement et de distribution du métal, ainsi que d'équipements annexes tels qu'une grenailleuse, une tour de refroidissement et des dépoussiéreurs.

Sa fonction principale est de préparer la fonte liquide avec des caractéristiques spécifiques pour la distribution sur les différentes lignes de l'atelier Moulage.

I.2.6.4.3 Moulage

L'atelier Moulage est constitué de châssis contenant les moules, disposés sur des rails mobiles en lignes appelées lignes de moulage.

Une nouvelle ligne de moulage, plus performante, a remplacé la ligne existante pour les pièces moyennes. De même, la ligne de moulage pour les grandes pièces a été modernisée

avec la modification de son système de défonçage des pièces. L'atelier de Moulage mis à jour comprend maintenant une machine à mouler automatisée à serrage hydraulique, une station de coulée automatique, une zone de refroidissement et une cabine de décochage.

I.2.6.5 Bureau des méthodes

Le potentiel technique de la fonderie est en grande partie déterminé par les méthodes utilisées. Ces méthodes doivent permettre de produire des pièces brutes spécifiques avec une qualité élevée, dans des délais précis et en respectant les impératifs humains et sociaux, tout en minimisant les coûts.

Les méthodes fournissent à la fabrication les outillages et les procédures nécessaires pour réaliser les programmes de production. En outre, elles gèrent la documentation générale telle que les catalogues de fournisseurs, les revues spécialisées et les comptes rendus des visites d'ateliers.

I.2.6.5.1 Rôle de service méthodes

Le service méthode est intégré dans le département d'études et de conception.

Il joue un rôle clé dans la réalisation du produit dès les premières étapes de son intégration.

Ses principales responsabilités sont les suivantes :

- ✓ Définir le dessin de la pièce brute pour obtenir un produit de qualité optimale à moindre coût.
- ✓ Comparer les coûts de différentes solutions.
- ✓ Réaliser l'étude de moulage.
- ✓ Dessiner les outillages nécessaires.
- ✓ Définir et créer les gammes de fabrication.
- ✓ Suivre la réalisation des outillages de fabrication.
- ✓ Mettre au point les outillages nécessaires pour la production de pièces.
- ✓ Assurer le contrôle dimensionnel et métallurgique des pièces.
- ✓ Améliorer la qualité, les coûts et la productivité.
- ✓ Adapter la pièce à la technique de la fonderie.

chapitre II

Partie

Bibliographique

II.1 Fonderie

II.1.1 Introduction

La fonderie est un procédé de mise en forme où des métaux ou alliages fondus sont coulés dans un moule après solidifiés en donnant une forme précise de la pièce finale à fabriquer. Cette technique est utilisée dans de nombreux secteurs, tels que l'automobile, la construction mécanique, l'énergie, l'électronique, la robinetterie, les appareils ménagers, ...etc.

Ce procédé fait appel à une multitude de méthodes telles que le moulage, le noyautage, la métallurgie, la fusion et la coulée de métaux et d'alliages métalliques, ainsi que les traitements thermiques, la finition et le parachèvement des pièces.

La technique permet de produire des pièces métalliques de toutes natures, en toutes quantités, à partir de matières premières brutes (ferrailles, déchets de tôles, bocages). Elle utilise des dimensions précises dans la conception de leurs moules ce qui permet de produire des pièces qui répondent exactement aux spécifications requises, Cela évite d'avoir à les usiner ou à les ajuster, de réduire les coûts de la matière et d'assurer une production efficace, rentable et de haute qualité.

II.1.2 Mise en forme d'une pièce en fonderie

La mise en forme d'une pièce en fonderie est l'enchaînement d'un certain nombre d'opérations qui se complètent, il s'agit de :

II.1.2.1 Conception de la pièce

Ce processus consiste à créer des modèles en 3D pour la fabrication de pièces coulées en métal. Cette conception doit prendre en compte plusieurs facteurs, tels que les matériaux utilisés, les contraintes mécaniques, les exigences de qualité, les méthodes de moulage et de coulée, ainsi que les coûts de production.

II.1.2.2 Opérations élémentaires

II.1.2.2.1 Modelage

Quel que soit le procédé de moulage employé, il est nécessaire de disposer d'un outillage qui donnera au moule la forme de la pièce à couler grâce au système de coulée [1].

Cette étape représente le début du processus de fonderie. Elle consiste à créer des modèles à partir des plans fournis par le bureau d'études (**Fig. II.1 et Fig. II.2**) ainsi que la prise d'empreintes en résine, élastomère ou plâtre. Des travaux de sculpture peuvent également être réalisés en se basant sur des photos ou des croquis. Il peut être pratiqué à la main ou avec des outils tels que des spatules, des couteaux à sculpter, des limes, ... etc [1].

Le résultat final du processus de production en fonderie dépend en très grande partie des outillages mis en œuvre, de leur conception, de leur fiabilité et de leur productivité.

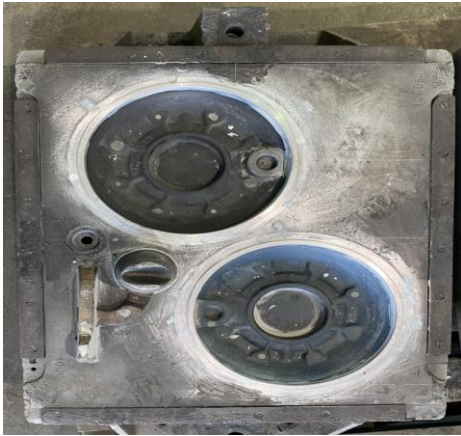


Fig. II.2 : Plaque modèle métallique pour moulage en sable



Fig. II.1 : Modèle des pièces en bois

II.1.2.2 Noyautage

Le noyautage est une technique de création de cavités internes dans des pièces moulées en métal. Ces cavités, appelées noyaux, sont réalisées en utilisant des matériaux résistants à la chaleur tels que le sable, la cire ou les résines. Les noyaux (**Fig. II.5**) sont placés dans les moules de fonderie avant la coulée du métal, où ils déterminent la forme interne des pièces moulées.

Il existe deux types de procédés de noyautage, à chaud et à froid :

- Le noyautage à froid : consiste à utiliser des noyaux fabriqués en sable à noyaux, mousses et matériaux céramiques qui sont à température ambiante ou légèrement réfrigérés. Cette technique est couramment utilisée pour les pièces moulées plus épaisses ou pour les pièces en fonte (**Fig. II.3**) [2].
- Le noyautage à chaud : consiste à utiliser des noyaux fabriqués en métaux fusionnés, sables à noyaux et matériaux céramiques qui sont préchauffés à une température élevée avant d'être placés dans le moule. Cette technique permet d'obtenir des pièces moulées de haute qualité avec des parois minces et des géométries complexes (**Fig. II.4**) [2].



Fig. II.4 : Boîte à noyau à froid

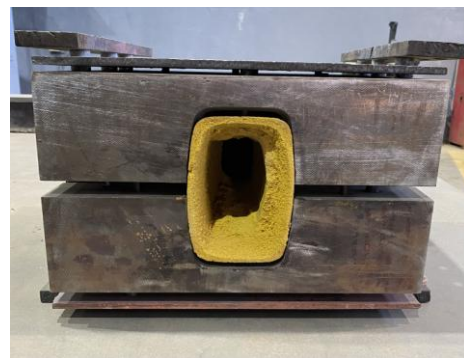


Fig. II.3: Boîte à noyau à chaud



Fig. II.5 : Noyau d'une pièce

II.1.2.2.3 Fusion

La fusion est le processus de transformation des matières premières en un métal fondu à l'aide de gros fours, dits fours de fusion ou de cubilots [3].



Fig. II.6 : Four à induction

II.1.2.2.4 Coulée

Le processus de création d'une pièce se termine par la coulée du métal liquide dans un moule (**Fig II.6**), qui intervient après la fabrication du moule et la préparation du métal. Cette étape implique la rencontre entre un métal à très haute température et un moule à température ambiante, ce qui nécessite des mesures de sécurité rigoureuses pour assurer la qualité de la pièce et la sécurité du personnel.

On utilise une poche de coulée pour remplir l'empreinte du moule, qui est un récipient en tôle d'acier doublé d'un revêtement réfractaire chauffé à l'avance. La poche de coulée est déplacée et manipulée soit manuellement, ou mécaniquement, en fonction de sa capacité. La coulée (**Fig II.7**) doit être effectuée rapidement et d'un seul coup, en prélevant la quantité adéquate à l'aide d'une louche préalablement revêtue.



Fig. II.7 : **Processus de coulé du métal**

II.1.2.2.5 Parachèvement

Le Parachèvement est l'ensemble des opérations de finition qui sont effectuées sur les pièces métalliques après leur moulage. Ces opérations peuvent inclure le retrait des résidus de sable, l'ébavurage, le polissage, la rectification et le traitement de surface.

C'est une effectués sur des échantillons normalisés prélevés en même temps que les pièces à contrôler. À l'aide de machines spéciales, on mesure notamment la dureté, la résistance à la traction, la résistance à la fatigue et l'allongement. Il est indispensable pour assurer la qualité et la conformité des pièces fabriquées.

II.1.2.2.5.1 Contrôle des caractéristiques physiques

Le contrôle des caractéristiques physiques des pièces comprend trois types : Le contrôle dimensionnel, le contrôle de dureté et le contrôle micrographique. Le contrôle dimensionnel vise à vérifier si les dimensions, la position des points de départ d'usinage et des noyaux sont conformes aux tolérances prévues sur le dessin des pièces. Il est effectué sur des pièces prélevées en cours de fabrication. Le contrôle de dureté consiste à mesurer l'empreinte laissée par une bille sous une charge donnée de dureté Vickers ou de dureté Brinell. Enfin, le contrôle micrographique permet de vérifier les formes du graphite, la quantité de nodules et la structure de la matrice. Il nécessite un polissage très fin pour pouvoir être examiné au microscope après une attaque chimique.

II.1.2.2.5.2 Contrôles non destructifs

Les contrôles non destructifs comprennent trois étapes distinctes. Tout d'abord, il y a le contrôle d'aspect, qui consiste en un examen visuel simple de la forme, des dimensions et de l'aspect d'une pièce. Ensuite, il y a le ressuage, qui permet de détecter et de localiser les défauts débouchant en surface, tels que les criques et les fissures en appliquant un liquide pénétrant suivi d'un révélateur qui fait apparaître les défauts sous forme de traits rouges en

présence de rayonnements ultraviolets. Enfin, il est utilisé pour détecter les discontinuités superficielles en appliquant un champ magnétique, suivi d'un révélateur à base de particules ferromagnétiques déposées à la surface de la pièce. Les défauts apparaissent sous forme de traits verts lors de l'observation en présence d'ultraviolet et de poudres fluorescentes.

II.1.2.2.5.3 Contrôles non destructifs de la santé interne

Il existe deux types de contrôles non destructifs pour évaluer la santé interne des matériaux :

- ✓ Le contrôle par ultrasons : qui consiste à détecter les cavités dans la fonte, qui produisent des échos anormaux sur un écran de lecture. Pour améliorer le passage des ondes, la nodularité du graphite est déduite à partir de la vitesse du son dans la fonte.
- ✓ La radiographie X : qui est utilisée pour détecter les défauts volumiques dans les matériaux. Les émulsions photographiques permettent d'obtenir des images de ces défauts [4].

Ces différentes catégories d'opérations de contrôle qualité sont indispensables pour assurer la qualité et la conformité des pièces produites.

II.2 Moulage

II.2.1 Définition

Le moulage en fonderie est une technique de fabrication largement utilisée dans l'industrie pour produire des pièces en série (**Fig II.8**). Il est utilisé dans de nombreux secteurs industriels, notamment dans l'automobile, la construction mécanique, l'électronique et la construction navale, ...etc.

Ce processus consiste à couler le métal fondu dans le moule, une fois le métal est solidifié, le moule est ouvert et la pièce est retirée.



Fig. II.8 : Moule en sable

II.2.2 Etapes préliminaires à suivre avant le moulage

Avant de commencer le moulage d'une pièce en fonderie, il est important de suivre les étapes suivantes :

1. **Étude de la pièce** : Avant tout, il est important de bien étudier la pièce (prendre en considération les dimensions, la complexité et la fonction de la pièce) pour déterminer les matériaux et la méthode de moulage à utiliser.
2. **Conception du moule** : La conception du moule est une étape critique car elle détermine la qualité et la précision de la pièce finale (la forme, la taille, le système de coulée et le système de refroidissement du moule).
3. **Fabrication du modèle** : Le modèle est la réplique de la pièce finale et sert à la création du moule. Il peut être fabriqué en bois, en plastique ou en métal, en utilisant des machines-outils ou des techniques de modelage manuel.
4. **Fabrication du moule** : Le moule est fabriqué en sable, en métal, en céramique ou en plâtre en utilisant le modèle comme référence.
5. **Préparation du moule** : Avant de couler le métal, le moule doit être préparé en appliquant un agent de démoulage pour faciliter le retrait de la pièce moulée, dans cette étape on peut placer les noyaux dans le moule pour créer des cavités internes.
6. **Coulée** : Le métal est chauffé à haute température dans un four et coulé dans le moule. Il est essentiel de prendre toutes les précautions nécessaires lors du processus de coulée afin d'éviter l'apparition de défauts tels que des bulles d'air ou des fissures.
7. **Refroidissement et démoulage** : Une fois la coulée terminée, le moule refroidi et la pièce démoulée, la pièce est alors finie en retirant les excès de matériau et en effectuant les traitements thermiques et les finitions nécessaires.

II.2.3 Procédé de moulage

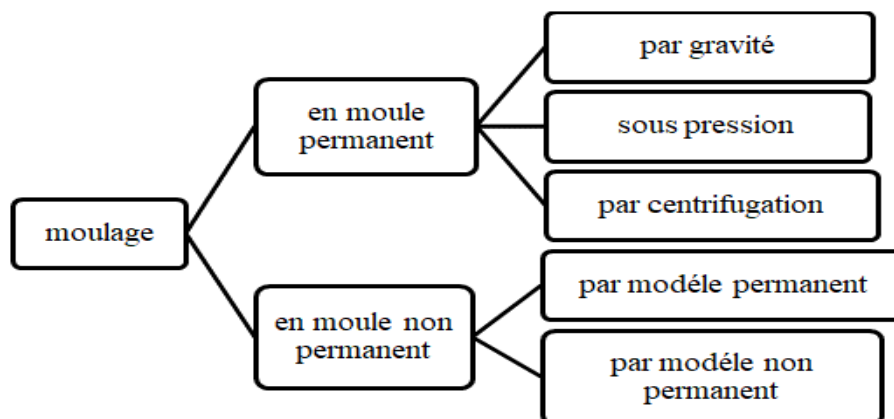


Fig. II.9 : Schéma explicatif du moulage

Le moulage peut être réalisé à l'aide de procédés à moule non permanent ou à moule permanent comme indiqué dans la figure II.9.

II.2.3.1 Les procédés à moule non permanent (moules perdus)

Généralement fabriqué en sable impliquent l'utilisation d'un moule qui doit être détruit pour extraire la pièce. Ce type de moule est souvent constitué de matériaux tels que le sable, le plâtre ou d'autres matériaux similaires, ainsi que des liants.

II.2.3.2 Les procédés à moule permanent (coquilles)

Ce type de procédé utilise un moule qui peut être réutilisé plusieurs fois pour produire plusieurs pièces (**Fig II.10**). Ce type de moule est généralement fabriqué en métal, bien que dans de rares cas, il peut être en céramique réfractaire.



Fig. II.10 : Moulage en moule permanent

II.2.4 Moulage en sable

II.2.4.1 Définition

Le moulage en sable est un procédé de fonderie consistant à créer un moule en sable autour d'un modèle ou d'un noyau, puis à y couler un métal en fusion pour produire une pièce (**Fig II.11**). Cette technique est utilisée dans l'industrie pour la production de pièces métalliques de petites séries, en particulier de grandes pièces de forme complexe.

Le sable utilisé est principalement composé de silice (SiO_2) à environ 70-80 %, suivie de divers additifs tels que l'argile, la bentonite, la magnésie, la perlite et la vermiculite pour améliorer ses propriétés de moulage. [5]



Fig. II.11 : Pièces obtenues par moulage en sable

II.2.4.2 Composition du sable de moulage :

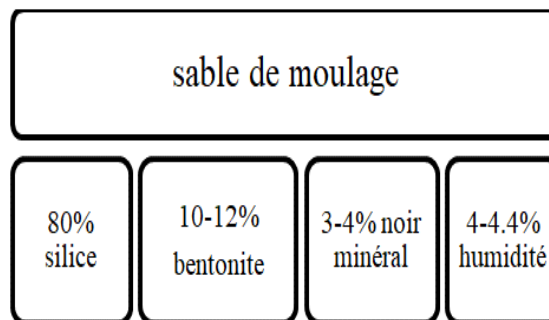


Fig. II.12 : Composition chimique du sable de moulage

La composition du sable de moulage est donnée par la figure (Fig II.12).

II.2.4.3 Caractéristiques du sable de moulage

➤ Les sables spéciaux

Ils ont une grande réfractérité, une inertie chimique élevée en plus qu'ils sont onéreux c'est pourquoi, ils sont employés pour des cas spéciaux, soit pour couler de grandes pièces et de grande importance et pour la direction de solidification.

Tab. II.1 : Composition et propriétés des sables spéciaux

Type de sable	Origine et composition	Température de fusion (°C)	Densité (g/cm ³)
Sable de zircone	silicate de zirconium (ZrSiO ₄)	2600 – 2800	4,6 - 4,7
Sable de disthène	silicate d'aluminium (Al ₂ O ₅ Si)	1810	3,2 - 3,5
Sable d'olivine	silicate double de magnésium et de fer (FeMg ₃ O ₄ Si)	175 – 1830	2,8
Sable de chromite	Chromite (FeO, Cr ₂ O ₃)	1850	4,2

Sable de magnésie	obtenu à partir du grillage du carbonate de magnésium (MgCO_3) à 1500°C	2800	5,3
Sable de chrome-magnésie	Un mélange de : (50 - 70)% de chromite (30 - 50%) de magnésie	2800	2,8
Sable de chamotte	obtenu par grillage de l'argile 35% d' Al_2O_3 65% SiO_2	1690 – 1950	2,6

➤ Sables siliceux

Sont principalement constitués de grains de quartz de tailles et de formes différentes, accompagnés de substances argileuses en quantités variables et de quelques impuretés telles que les oxydes de métaux alcalins (Na_2O , K_2O) et les oxydes de fer (FeO , Fe_2O_3). Ils ont :

- une température de fusion de 1713°C .
- une Résistance au cisaillement de 7 N/cm^2 .
- Une Résistance à la compression de 15 N/cm^2 .
- Une Perméabilité de 170 U.

Plus sa quantité augmente dans les sables de moulage et ceux à noyaux, plus leurs réfractérité et leur durée de vie augmentent aussi.

Qualité du sable = f (teneur en grains de SiO_2 , sa grosseur, sa forme, et sa teneur en impuretés)

➤ Argiles de moulage

Ce sont des fines particules d'aluminosilicates mélangés à l'eau avec une bonne plasticité, haute capacité liante et une très faible perméabilité, Il existe 2 types :

- Kaolinite $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ avec une réfractérité de $1750-1787^\circ\text{C}$.
- Bentonite $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ avec une réfractérité de $n\text{H}_2\text{O}$ $1250-1300^\circ\text{C}$.

II.2.4.4 Étapes de préparation et de mise en œuvre du sable

La préparation et la mise en œuvre du sable peuvent être effectuées selon les étapes suivantes :

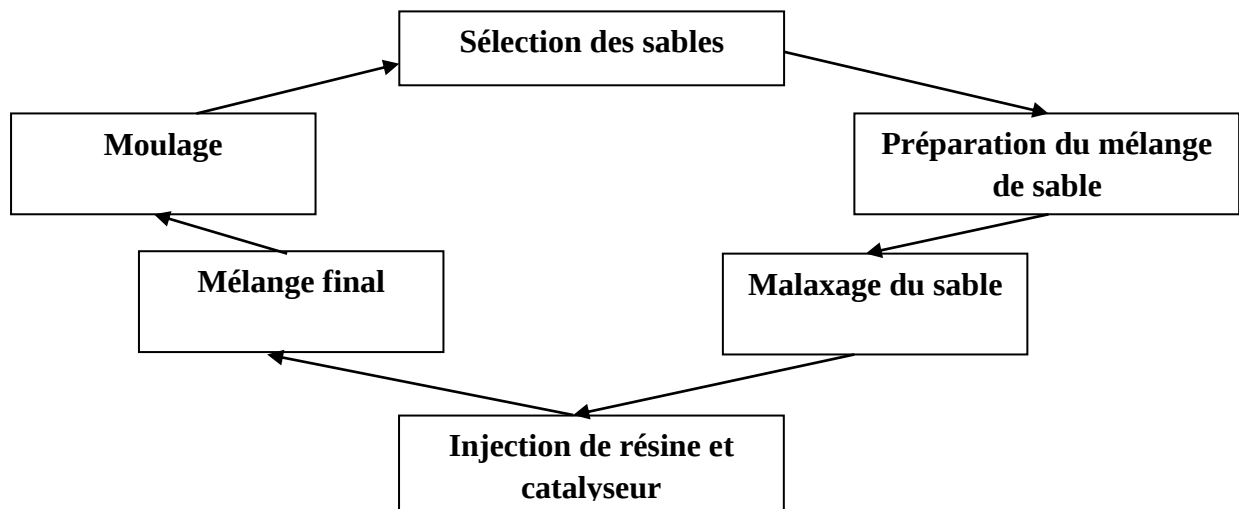


Fig. II.13 : Processus de préparation et du sable

II.2.4.5 Opérations de moulage en sable

Les opérations de moulage en sable comprennent plusieurs étapes (Fig.II.14) :

- ✓ Remplissage des deux châssis avec du sable qui est tassé ;
- ✓ Séparation des plaques modèles des châssis ;
- ✓ Mise en place du noyau ;
- ✓ Assemblage des deux châssis ;
- ✓ Remplissage du moule avec le métal fondu ;
- ✓ Le refroidissement et la solidification du métal ;
- ✓ Le retrait de la pièce moulée du moule ;
- ✓ Elimination du système d'alimentation, de la masselotte, et bavures (parachèvement) ;
- ✓ Usinage des surfaces fonctionnelles, puis contrôle de la pièce.

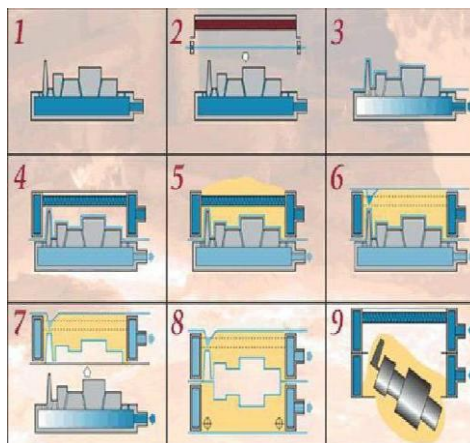


Fig. II.14 : Etapes de moulage en sable [26]

II.2.4.6 Eléments constitutifs d'un moule

Un moule simple se compose de deux parties principales (**Fig. II.15**) :

La partie supérieure et la partie inférieure, la partie supérieure du moule, également appelée la "chape", est placée au-dessus de la partie inférieure, également appelée "empreinte", pour former une cavité dans laquelle le métal en fusion est coulé.

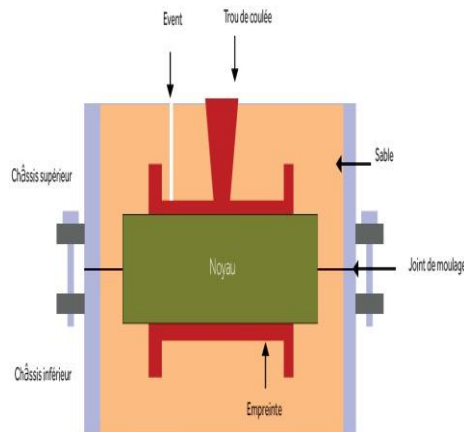


Fig. II.15 : Les composants du moule [27]

II.2.4.7 Processus de la préparation de sable du moulage

Les sables récupérés après le décochage sont traités dans des installations spécifiques appelées sableries.

Les opérations de préparation et de régénération incluent le tamisage, l'élimination des impuretés, le concassage, la séparation du fer, le dépoussiérage et le refroidissement. Les sables sont ensuite mélangés avec de l'eau, des adjuvants tels que la bentonite et le noir minéral, et malaxés dans des broyeurs avant d'être acheminés vers les machines à mouler.

II.2.5 Propriétés de fonderie

Les propriétés de fonderie déterminent la qualité et la performance de pièces moulées, ils sont résumés comme suit :

II.2.5.1 Coulabilité

C'est l'aptitude d'un alliage à remplir complètement l'empreinte du moule, c'est également une propriété complexe qui fait intervenir la composition chimique, la nature et la température du moule, le principe de coulée (gravité, basse pression ou sous pression), l'intervalle de solidification.

II.2.5.2 Retrait

Le retrait dans la fonderie est la contraction du métal lorsqu'il refroidit et se solidifie dans le moule. Il s'exprime en % ou en mm/m. ce phénomène dépend de plusieurs facteurs tels que

la composition du métal, la température de coulée, les dimensions et la forme de la pièce, ainsi que les conditions de refroidissement dans le moule (**Fig. II.16**). Il se produit pendant le refroidissement qui est due aux :

- contraction à l'état liquide ;
- contraction ou expansion pendant la solidification ;
- contraction ou expansion à l'état solide pendant le refroidissement final.

Pour minimiser le retrait, il est important d'avoir une température de moule suffisamment basse pour permettre une solidification rapide et uniforme du métal, d'utiliser un système de refroidissement efficace pour contrôler le taux de refroidissement et d'avoir une conception de moule optimale pour éviter les zones à risque de retrait excessif.

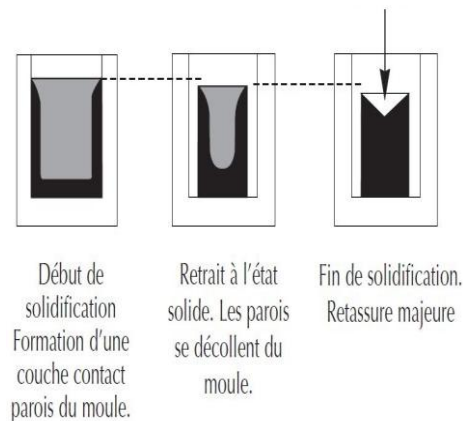


Fig. II.16 : **Schéma explicatif du retrait** [28]

II.2.6 Défauts de fonderie

Les défauts ou anomalies de fonderie ont été classés en sept groupes, caractérisés par l'aspect physique du défaut :

- excroissances métalliques (bavures, gales, surépaisseurs...) ;
- cavités (piqûres, soufflures, retassures, bouillonnements...) ;
- solution de continuité (cassures, tapures, criques, reprises...) ;
- surfaces défectueuses (plissements, rides, queues de rat, gales...) ;
- pièces incomplètes (malvenues, coulées à court, moules vidés, cassures...) ;
- dimensions ou formes incorrectes (cotes inexactes, déformations...) ;
- Inclusions ou anomalies de structure (gouttes froides, inclusions de laitier ou de sable, trempe, durcissement superficiel...).

II.2.6.1 Ségrégations

C'est un phénomène prenant naissance à la solidification et qui se traduit par une hétérogénéité chimique entre différents points de la pièce. Il est lié à la composition de

l'alliage, ainsi qu'à la présence d'inclusions qui peuvent jouer un rôle dans cette hétérogénéité.

II.2.6.2 Retassures

Ce sont des défauts tels que des creux en surface ou des cavités internes qui peuvent apparaître sur la pièce (**Fig. II.17**). Elles se forment dans les zones qui restent liquides en derniers. Pour éviter cela, il est nécessaire d'alimenter la pièce du métal liquide provenant de masselottes moulées et coulées simultanément avec la pièce, raccordées à celle-ci par des attaques à large section pour empêcher le métal de se figer. Il faudra ensuite les éliminer lors de l'ébarbage.

La formation de retassures est favorisée par plusieurs facteurs qui sont :

- la forme de la pièce ;
- la vitesse de coulée et de remplissage ;
- les changements de volume de l'alliage lors de la solidification ;
- la dureté et la résistance des parois du moule qui s'opposent à la pression ferrostatique de l'alliage. pour les fontes il y a également un risque de gonflement pendant la période d'expansion graphitique, en particulier avec la fonte GS.

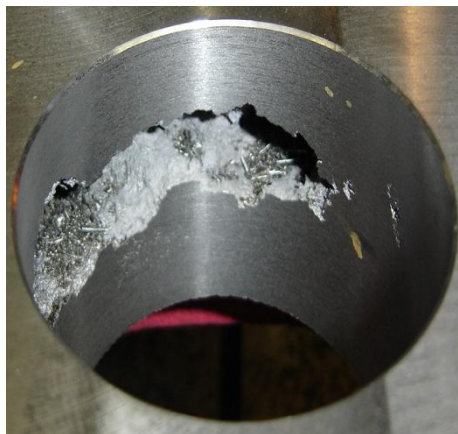


Fig. II.17 : Retassure sur fonte graphite sphéroïdal [29]

II.2.6.3 Criques

Ce sont des ruptures ou déchirures du métal qui se produisent pendant le refroidissement de la pièce dans le moule (**Fig. II.18**). Ils peuvent être appelés tapures lorsque la rupture se produit brutalement. Ces défauts sont fréquemment causés par les facteurs suivants :

- la forme et la dimension des pièces ;
- la résistance et la dilatabilité du moule et du noyau ;
- la capacité de déformation du métal.



Fig. II.18 : Cricque apparente sur une pièce [30]

II.2.6.4 Soufflures

Ce sont des cavités ou des trous résultants de la présence de bulles de gaz dans l'alliage pendant sa solidification comme le montre la figure (**Fig II.19**).

Ces défauts peuvent être générés soit par des facteurs internes à l'alliage, tels que des gaz dissous, soit par des facteurs externes à l'alliage, qui peuvent dépendre de la conception du moule, des matériaux mis en œuvre pour sa confection, de leur qualité, ainsi que des réactions moules-métal, ou des émissions de gaz pendant la coulée.

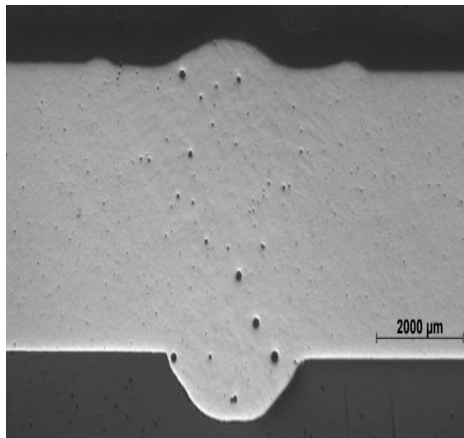


Fig. II.19 : Soufflures visibles sur une pièce [31]

II.2.6.5 Crasses

La crasse est un type spécifique de scorie qui se forme lors du traitement au magnésium et de la réoxydation subséquente du magnésium rejeté par la fonte liquide avant sa solidification. Cette réaction continue implique la liaison du magnésium avec le soufre, l'oxygène et la silice. En général, la crasse est légère et se trouve généralement à la surface du métal et sous les noyaux.

Cependant, elle peut également être entraînée par le métal, en particulier dans des conditions de coulée à basse température. Lorsqu'elle est examinée au microscope, la crasse

apparaît souvent avec des graphites en lamelles en raison d'une insuffisance de magnésium qui réagit avec d'autres éléments. La crasse peut également apparaître sous forme de longs filaments, ce qui peut réduire la résistance à la fatigue et aux impacts du métal en créant des petites fissures ou des graphites en lamelles dans sa structure.

II.2.7 Avantages

Le moulage présente plusieurs bénéfices, tels que :

- La possibilité de fabriquer des pièces complexes avec une grande précision dimensionnelle.
- La capacité de produire de grandes quantités de pièces en peu de temps.
- Le moulage permet également de réduire les coûts de production, car il nécessite moins de matière première que d'autres processus de fabrication et permet de recycler les chutes de matière pour une utilisation ultérieure.

II.2.8 Inconvénients

Le moulage présente également certains inconvénients, notamment :

- La limitation de la taille et du poids des pièces produites, qui dépendent des capacités des machines de coulée et des coûts des moules plus grands.
- Les risques de défauts de surface, tels que les soufflures, les fissures ou les inclusions, qui peuvent altérer les propriétés mécaniques et esthétiques des pièces.
- La nécessité d'une expertise technique pour concevoir et fabriquer les moules, ainsi que pour optimiser les paramètres de coulée pour chaque matériau et chaque pièce.
- L'impact environnemental potentiel des matériaux utilisés dans le processus de fabrication et la génération de déchets de moule et de matière première.

II.3 Modèle

Le modèle est une empreinte dans le moule fabriqué par le bois, le polystyrène expansé. Ce dernier est plus facile à utiliser, permettant la production de modèles légers et économiques. Pour les grandes séries, les modèles sont produits sur des machines spéciales injectant le polystyrène dans des moules chauffés à la vapeur. La conception et la réalisation des modèles dépendent des procédés employés et des quantités à produire, avec une étude des outillages qui se fera à partir du dessin de pièce brute indiquant les cotes de la pièce, les plans

de joint, les dépouilles, les portées de noyaux , tout ça en fonction des machines envisagées pour la production.



Fig. II.20 : Modèle d'une pièce métallique

II.4 Noyau et boîte à noyau

Le moulage avec noyau utilisée pour créer des cavités internes dans des pièces moulées, Il consiste à placer un noyau dans le moule avant de verser le métal fondu.

Le noyau est maintenu en place par la boîte à noyau, qui est un moule ouvert qui contient et soutient le noyau pendant le processus de moulage. Une fois le métal fondu refroidi et durci, la boîte à noyau et le noyau sont retirés pour révéler la pièce moulée [6].

II.5 Règles de tracé des pièces moulées

Les pièces fabriquées par moulage doivent respecter des règles de tracé communes, indépendamment du procédé de moulage utilisé. Ces règles incluent :

- la coulée en masselotte ;
- l'évitement de variations d'épaisseur ;
- la progression régulière de la masse ;
- le remplacement des angles vifs par des arrondis ou des congés ;
- la disposition des surfaces usinées dans la partie inférieure du moule ;
- l'évitement des nœuds de nervures ;
- la conception de raccords de sections pour éviter une augmentation de masse ;
- la recherche de sections profilées pour une meilleure résistance aux contraintes de flexion ou de torsion ;
- le choix de formes qui facilitent le moulage et le démoulage ;
- l'application d'une épaisseur minimale, de surépaisseurs d'usinage et de dépouilles.

II.6 Système de coulé et d'alimentation

Les composants du système de coulé et d'alimentation comprennent plusieurs parties, notamment l'entonnoir de coulé (le bassin de coulé), la descente de coulé, le talon de lavage, le chenal de coulé, les attaques de coulé, la masselotte, les filtres, les événements, les pièges à crasse [7].

- **l'entonnoir de coulé** : est utilisé pour minimiser les perturbations du flux de métal, assurer un remplissage régulier et homogène du moule, tout en évitant les défauts tels que les porosités ou les soufflures.
- **la descente de coulé** : son rôle consiste à acheminer le métal en fusion depuis le four jusqu'à la pièce à mouler. Elle permet également de réguler le débit du métal et d'éviter les éventuelles pertes ou défauts de coulée.
- **le talon de lavage** : le talon de lavage est une partie de la pièce qui est conçue pour être coupée et retirée après le processus de coulée. Il permet d'évacuer les impuretés et les gaz qui se forment pendant la coulée, ce qui évite les défauts dans la pièce finale.
- **le chenal de coulée** : il permet l'écoulement du métal fondu depuis le creuset vers les moules, tout en évitant les turbulences qui pourraient entraîner des défauts dans la pièce coulée.
- **les attaques de coulée** : les attaques de coulées permettent d'assurer un flux régulier et contrôlé du métal en fusion dans le moule, elles peuvent être utilisées pour ajuster la température du métal et faciliter son remplissage dans le moule.
- **la masselotte** : Elle sert à alimenter la pièce en métal pendant la solidification, et à éliminer les défauts (retassures).
- **les événements** : sont des ouvertures qui permettent l'évacuation des gaz et des impuretés qui se forment lors de la solidification du métal, évitant ainsi la formation de défauts dans la pièce coulée [7].

II.7 Fonte

II.7.1 Définition

La fonte est un alliage ferreux contenant généralement plus de 2,11% de carbone, ainsi que d'autres éléments tels que le silicium, le manganèse et le soufre. Elle se caractérise par une bonne coulabilité, une haute fluidité et une capacité à prendre des formes complexes. En raison de sa teneur en carbone, elle possède une excellente résistance à la compression, mais une faible résistance à la traction. Elle est couramment utilisée (**Fig II.21**) dans la production de pièces moulées, de moteurs et de tuyaux [8].



Fig. II.21 : Fonte de production [32]

II.7.2 Types de fontes

Nous avons trois types de fonte :

- la fonte grise.
- la fonte malléable.
- la fonte blanche.

II.7.2.1 Fonte grise

La fonte grise est un alliage de fer-carbone contenant une proportion élevée de graphite lamellaire, qui donne à la fonte sa couleur grise. Cette forme de fonte est obtenue en utilisant un teneur en silicium d'au moins 1,7% et un refroidissant lentement du métal fondu, ce qui permet la formation de graphites lamellaires. En fonction de sa composition, la fonte présentera l'une des structures suivantes : cémentite + perlite + graphite lamellaire, perlite + graphite lamellaire ou ferrite + perlite + graphite lamellaire.

Elle est couramment utilisée pour la production de pièces mécaniques exigeant une grande résilience et une résistance élevée à la corrosion ainsi qu'à l'usure.

Les deux principales formes de fontes grises sont la fonte grise sphéroïdale et la fonte grise lamellaire [9].

II.7.2.1.1 Fonte grise à graphite lamellaire

La fonte à graphite lamellaire est une fonte grise largement utilisée dans diverses industries pour la fabrication de pièces moulées, en raison de sa résistance à la corrosion, de sa coulabilité et de son coût relativement bas. Sa microstructure est composée de grains de graphite en forme de feuilles dispersés dans une matrice de fer (**Fig. II.22**), dont la proportion dépend de la teneur en carbone et de la vitesse de refroidissement lors de la coulée. Bien que sa résistance à la traction soit relativement faible, elle possède une grande résistance à la

compression, une haute ductilité et une grande résilience, ce qui la rend appropriée pour les pièces soumises à des contraintes de compression [10] [11].

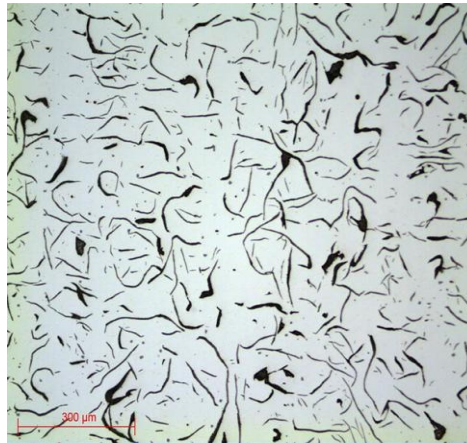


Fig. II.22 : Morphologie d'une fonte à graphite lamellaire [33]

II.7.2.1.2 Fonte grise à graphite sphéroïdal

La fonte à graphite sphéroïdal est une fonte grise qui contient du fer et environ 3,2-4,1% de carbone, ainsi que des éléments d'alliage tels que 1,5-2,5% de silicium, 0,05-0,5% de manganèse, 0,03-0,1% de magnésium et 0,05-0,5% de cuivre. Elle est produite en ajoutant un agent d'inoculation tel que le magnésium à la fonte en fusion pour favoriser la formation de sphéroïdes de graphite (**Fig II.23**) plutôt que de lamelles. Cette forme de graphite confère à la fonte une meilleure ductilité, résistance et résilience par rapport à la fonte grise conventionnelle, ce qui la rend plus utilisée dans les applications automobiles en raison de sa capacité à absorber les vibrations et sa résistance.



Fig. II.23 : Microstructure d'une fonte à graphite sphéroïdal [34]

II.7.2.1.3 Rôle du graphite dans les fontes grises

Le graphite dans les fontes grises a un effet autolubrifiant qui améliore la capacité d'usinage de la fonte. De plus, sa quantité et sa forme peuvent affecter les caractéristiques mécaniques de la fonte, notamment sa fragilité et sa résistance. La forme sphéroïdale du

graphite dans la fonte GS est préférable à la forme lamellaire de la fonte grise ordinaire en termes de réduction de la fragilité [12].

II.7.2.2 Fonte malléable

La fonte malléable est une fonte qui a subi un traitement thermique spécifique, appelé recuit de malléabilisation, qui permet de convertir une partie du carbone présent sous forme de graphite en une forme de carbone sphéroïdale. Ce traitement confère à la fonte malléable une meilleure résistance à la traction, une ductilité améliorée et une meilleure capacité à absorber les chocs par rapport à la fonte grise ordinaire. On distingue ; la fonte malléable à cœur noir et la fonte malléable à cœur blanc, qui diffèrent par leur structure interne et leurs propriétés [13].

Elle est couramment utilisée pour la fabrication de pièces qui nécessitent une grande résistance à l'usure, telles que des pièces de machines-outils, des roulements et des engrenages [13].

II.7.2.2.1 Fonte malléable à cœur noir

La fonte malléable à cœur noir (**Fig II.24**) est produite en soumettant la fonte malléable à un traitement thermique qui consiste en une austénitisation suivie d'un refroidissement rapide dans un bain de sel ou d'eau salée. Elle présente une structure ferritique à cœur avec une couche externe de perlite et/ou de cémentite, ce qui confère à la fonte malléable à cœur noir une bonne résistance à la traction et une excellente usinabilité. Ce type de fonte est utilisé dans la fabrication de pièces automobiles, d'engrenages, de roulements et de pièces de machines-outils.

II.7.2.2.2 Fonte malléable à cœur blanc

La fonte malléable à cœur blanc (**Fig II.25**) est obtenue par un traitement thermique spécifique comprenant une austénitisation suivie d'un refroidissement lent dans un four, suivi d'un revenu à haute température. Cette fonte présente une structure constituée de perlite et/ou de cémentite, qui lui confère une grande résistance à l'usure et à la fatigue, ainsi qu'une bonne résistance à la rupture. Elle est souvent utilisée dans la fabrication de pièces nécessitant une grande résistance à l'usure, telles que les cylindres de machines-outils et les roues de wagon.

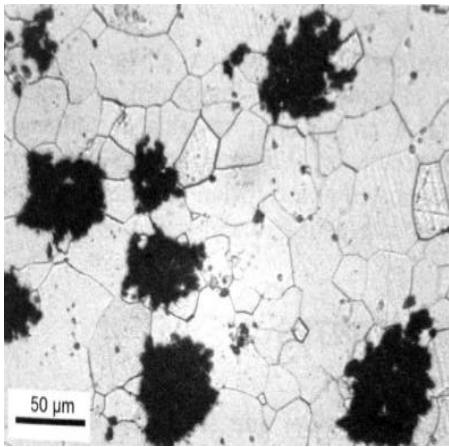


Fig II.25 : **Morphologies des fontes malléables à cœur noir** [37]

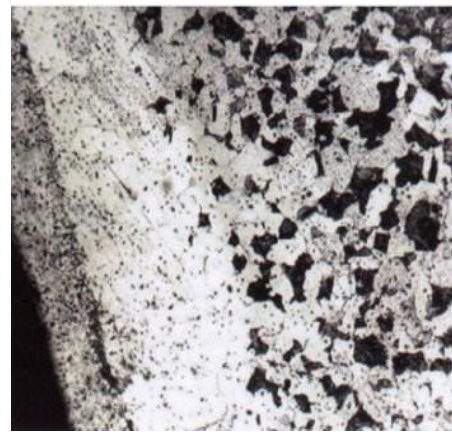


Fig II.24 : **Morphologies des fontes malléables à cœur blanc** [38]

II.7.2.3 Fonte blanche

Les fontes blanches sont des alliages de fer-carbone avec une teneur en carbone supérieure à 2% (**Fig II.26**). Elles se caractérisent par leur grande dureté et leur résistance à l'usure, ainsi que leur faible ductilité et leur fragilité en torsion et en flexion. Ce type de fonte est composé principalement de fer, de carbone, de silicium et de manganèse, avec d'autres éléments tels que le chrome, le nickel et le molybdène qui peuvent être ajoutés pour améliorer leurs propriétés. Elle est couramment utilisée pour des applications nécessitant une résistance élevée à l'usure [14].

Pour obtenir de la fonte blanche, il est recommandé d'avoir une température de coulée basse, un refroidissement rapide, un pourcentage élevé de manganèse et un faible pourcentage de silicium. La présence de manganèse favorise la formation de la cémentite qui est très dure et fragile tout en empêchant la précipitation du carbone sous forme de graphite libre [14].



Fig II.26 : **Microstructure d'une fonte blanche** [35]

Le diagramme de phases fer-carbone (**Fig II.27**) est un graphique du métallurgiste qui représente les différents constituants et transformations de phases qui se produisent lorsqu'on

allie le fer avec le carbone. Ce diagramme est basé sur la composition en pourcentage en poids de fer et de carbone, il fournit des données importantes sur les phases présentes dans l'alliage, les températures critiques à chaque étape, les vitesses de refroidissement requises pour produire différentes microstructures, ainsi que les propriétés mécaniques associées à chaque phase. Ces informations sont cruciales pour prédire et contrôler les caractéristiques et performances des alliages fer-carbone en fonction de leur composition et de leur traitement thermique.

Il n'est valable que pour des conditions proches de l'équilibre, c'est-à-dire pour un refroidissement ou un chauffage suffisamment lent [15].

Les phases métallurgiques en fonction de la teneur en carbone et de la température sont les suivantes [16] :

- **Ferrite (α -Fe)** : La ferrite est une solution solide du carbone dans le fer alpha avec une limite de solubilité maximale en carbone d'environ 0,02 % à 723°C. Cette phase d'équilibre existe à des températures relativement basses (en dessous de 910°C) et a une structure cristalline cubique centrée (CC). Elle est généralement douce, ductile et magnétique.
- **Austénite** : l'austénite est une solution solide du carbone dans le fer gamma avec une limite de solubilité élevée en carbone d'environ 2,11% à 1148°C. Cette phase d'équilibre existe à des températures élevées (au-dessus de 910°C) et a une structure cristalline cubique à faces centrée (CFC). Elle est généralement dure, résistante et non magnétique.
- **Perlite** : la perlite est une phase d'équilibre lamellaire composée de couches alternées de ferrite et de cémentite. Elle se forme lorsque l'austénite est refroidie lentement à travers la plage de températures critiques (environ 727-540°C). Elle est généralement dure et résistante, mais moins ductile que la ferrite.
- **Bainite** : c'est une phase hors d'équilibre qui se forme lorsque l'austénite est refroidie rapidement à des températures comprises entre celles de la perlite et de la martensite (environ 550-200°C). Elle est constituée de plaques d'austénite et de ferrite qui sont disposées en une structure aciculaire. Elle est généralement dure, résistante et plus ductile que la martensite.
- **Martensite** : c'est une phase hors d'équilibre qui se forme lorsque l'austénite est refroidie très rapidement (généralement par trempe) à des températures inférieures à celles de la bainite (environ 200°C). Elle a une structure cristalline tétragonale (quadratique). Elle est généralement dure, fragile et très résistante. La martensite a une

teneur élevée en carbone, qui est stabilisée par le blocage rapide des atomes de carbone dans la structure cristalline.

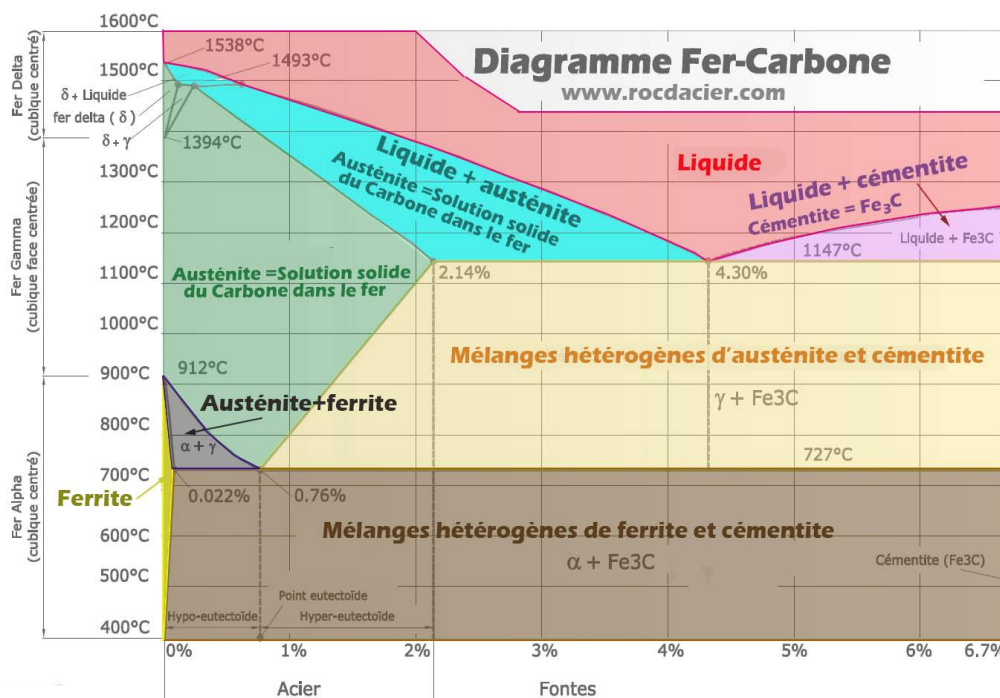


Fig. II.27 : Diagramme d'équilibre fer-carbone [36]

II.8 Influence des différents éléments d'addition sur les propriétés d'une fonte GL

Pour obtenir une fonte avec les caractéristiques mécaniques et la microstructure souhaitées dans la zone stable Fer/Graphite pendant la solidification, il est nécessaire d'ajouter des éléments d'addition dans le moule.

Il existe différents types d'éléments d'addition : ceux qui favorisent la formation de graphite et ceux qui favorisent la formation de la perlite. Ces éléments d'addition ont chacun un rôle différent et leur ajout peut modifier significativement les caractéristiques des fontes.

II.8.1 Silicium

Le silicium joue un rôle essentiel dans la fonte, étant le deuxième composant principal après le carbone. Il s'agit d'un agent de nodularisation qui favorise la formation de nodules de graphite sphériques et distribués uniformément dans la structure. Il est également appelé élément graphitisant améliorant la résistance à la traction, la ductilité, la ténacité, la résistance à la fatigue et la résistance à la chaleur de la fonte induisant une meilleure résistance à la déformation et à la fissuration à haute température.

En outre, l'addition de silicium peut également améliorer la résistance à l'usure et à la corrosion de la fonte, en particulier dans des environnements corrosifs tels que les acides et

les bases. Il forme une couche de silice protectrice sur la surface de la fonte, qui empêche la corrosion.

II.8.2 Phosphore

L'addition de phosphore à une fonte à graphite lamellaire peut avoir différents effets sur ses propriétés. À faible concentration, le phosphore peut améliorer la fluidité de la fonte, ce qui facilite le remplissage des moules lors de la coulée. Cependant, en excès, il peut réduire la fluidité et causer des problèmes de coulée. Il peut également affecter les propriétés mécaniques de la fonte, augmentant la résistance à la traction et la dureté à concentration modérée, mais réduisant la ductilité et la ténacité à concentration excessive, pouvant causer une fragilité à basse température, des quantités élevées de phosphore peuvent favoriser la formation de graphite en forme de nodules, améliorant la résistance à la fissuration à chaud de la fonte mais réduisant la résistance à la traction et la ductilité.

II.8.3 Etain

Lorsqu'il est ajouté en faibles quantités à une fonte à graphite lamellaire, l'étain peut engendrer plusieurs impacts sur ses propriétés, il peut améliorer la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure et la dureté de la fonte.

Cependant, des quantités excessives d'étain peuvent entraîner une réduction de la ductilité de la fonte, ce qui peut conduire à une fragilisation à basse température et une fissuration lors de la coulée [17]. L'étain peut également avoir un effet négatif sur la microstructure de la fonte, favorisant la formation de graphite en forme de flocons plutôt qu'en forme lamellaire, ce qui peut réduire la résistance mécanique de la fonte.

II.8.4 Cuivre

L'ajout de cuivre à une fonte graphite lamellaire peut avoir des effets sur la résistance à la traction, la dureté et la résistance à la corrosion de la fonte. En petites quantités, le cuivre peut augmenter la résistance à la traction et la dureté de cette dernière, tandis qu'en quantités plus élevées, il peut entraîner une diminution de sa ductilité. En outre, le cuivre peut également améliorer la résistance à la corrosion, ce qui est recommandé dans les applications où la fonte est exposée à des milieux corrosifs tels que les tuyaux d'eau [18].

II.8.5 Manganèse et Soufre

L'ajout de manganèse et de soufre à une fonte à graphite lamellaire influe sur ses propriétés. Le manganèse peut améliorer la résistance à la traction, la dureté, la résistance à la corrosion et la dureté de la fonte, tandis que le soufre peut améliorer sa fluidité et son

usinabilité. Cependant, il est important de traiter le rôle de ces deux éléments simultanément car une quantité excessive de soufre peut détériorer les propriétés mécaniques de la fonte, ce qui nécessite l'ajout d'une quantité minimale de manganèse pour compenser cet effet [19].

II.9 Traitements thermiques

Les fontes sont des alliages avec une matrice similaire à celle des aciers mais avec une teneur en carbone variable et des particules de graphite sphéroïdal ou lamellaire. Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud et destinée à modifier la microstructure d'un métal ou d'un alliage pour lui donner de nouvelles caractéristiques. Ces traitements sont la trempe suivi d'un revenu et la ferritisation. Ils permettent de modifier et d'ajuster les propriétés mécaniques de la fonte notamment la limite d'élasticité, la résistance à la traction, la ténacité, la dureté et la résilience aux besoins de l'utilisation. D'autres traitements, normalement désignés comme recuits, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique. Ils ont donc pour but de faire disparaître les états hors équilibre résultant des traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques [20].

II.9.1 Trempe

La trempe est un traitement thermique qui consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé dans le but d'obtenir la plus grande dureté possible, par formation de la martensite ou de la perlite fine. La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier, elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C.

En général, la trempe est réalisée en utilisant de l'eau, de l'huile ou de l'air, et le choix du milieu de trempe dépend de la trempabilité de l'acier. Pour les aciers au carbone, la trempe est généralement effectuée dans de l'eau à une température de 20-40 (°C), avec l'ajout éventuel de 10 % de chlorure de sodium pour augmenter l'efficacité de la trempe. Il est évident que les couches d'oxydes qui adhèrent à la surface de l'acier et les bulles de vapeur diminuent la vitesse de refroidissement, alors que l'agitation du milieu de trempe peut l'augmenter par la convection forcée.

Le refroidissement rapide par trempe empêche à la fois la germination et la croissance de nouvelles phases. La ségrégation du carbone et des éléments d'alliage nécessite une diffusion à longue distance, qui prendrait plus de temps pour produire un effet notable. Étant donné que l'austénite n'est pas stable à basse température et que la ferrite ne peut pas dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit.

II.9.2 Revenu

Le traitement thermique appelé revenu est généralement réalisé après une trempe pour corriger les défauts qui peuvent apparaître dans un acier après la trempe, tels que contraintes internes et fragilités. Pendant le revenu, l'acier est chauffé à une température inférieure à A_{C1} , en fonction de la résistance exigée, puis maintenu à cette température avant d'être refroidi jusqu'à la température ambiante.

L'objectif du revenu est de ramener l'acier à un état stable à froid et d'obtenir les propriétés mécaniques requises en transformant la martensite en nouveaux constituants tels que la sorbite ou la bainite. Donc le revenu permet d'éliminer les contraintes internes engendrées par la trempe, réduire la fragilité des pièces trempées, tout en conservant une dureté suffisante. La suppression de ces contraintes est maximale à des températures de revenu plus élevées, avec une atténuation des contraintes la plus importante lors d'un maintien entre 15 et 30 minutes à une température de 550°C.

La vitesse de refroidissement après revenu, a une faible influence sur l'état des contraintes résiduelles. Cependant, des contraintes thermiques résiduelles peuvent apparaître avec un refroidissement rapide dans l'eau à partir de 600°C.

Il existe trois types de traitement de revenu en fonction de la température :

- Le revenu à basse température 250°C.
- Le revenu à température intermédiaire 350 – 500°C.
- Le revenu à haute température 500 – 680°C.

II.9.3 Recuit

Le recuit est un traitement thermique qui consiste en un chauffage d'un matériau à une température spécifique, suivie d'un refroidissement contrôlé. Le recuit est souvent utilisé pour réduire les contraintes internes et améliorer les propriétés mécaniques et physiques des matériaux.

II.9.4 Recuit de ferritisation

Il est difficile d'obtenir une fonte grise sphéroïdale avec une matrice entièrement ferritique lors de la coulée. Donc Il est nécessaire dans certains cas de faire appel à un traitement thermique supplémentaire, appelé recuit de ferritisation, son but étant d'éliminer la perlite contenue dans la matrice.

II.9.4.1 Recuit à une température comprise entre 820 et 900°C

Le recuit de ferritisation est un traitement thermique qui comprend un chauffage jusqu'à un palier effectué à une température généralement comprise entre 700 – 900°C. La température et le temps de maintien sont choisis en fonction de la composition, des dimensions et de la proportion de carbures dans la microstructure de la pièce traitée. Pour assurer la ferritisation totale de la matrice, une plage de température située juste au-dessus de l'intervalle de transformation α / γ est utilisée (la température est ajustée en fonction de la teneur en silicium). Lors du traitement thermique, se passe une transition de la matrice ferritique pauvre en carbone contenant de la cémentite et du graphite vers une matrice austénitique capable de contenir une quantité plus importante de carbone (entre 0,8 et 2,1% selon la température). Pendant le maintien à la température d'austénitisation, le système atteint un équilibre et l'austénite va s'enrichir en carbone. Cette charge en carbone est issue de la décomposition de la cémentite et d'une remise en solution partielle des sphéroïdes de graphite [21].

Afin d'obtenir une matrice entièrement ferritique, il est crucial de refroidir la pièce lentement autour de la température de transformation Ac_1 . Cette vitesse de refroidissement est fonction de la morphologie du graphite et de la teneur en Si. Plus le graphite est grossier et la teneur en Si faible, plus cette vitesse devra être lente. Il faut désaturer l'austénite lentement pour ne pas former de Fe_3C . Si l'espace entre les sphéroïdes est important de nouvelles sphères de graphite peuvent nucléé et croître.

II.9.4.2 Recuit à une température comprise entre 730 et 790°C

Chauffer des pièces justes en dessous de leur intervalle de transformation peut provoquer la transformation de la perlite en ferrite et graphite, suivie d'un refroidissement lent. Pendant ce traitement, la cémentite de la perlite se décompose, tandis que la graphitisation se produit progressivement grâce à la diffusion des atomes de carbone vers les sphéroïdes de graphite [21].

Ce traitement est généralement réalisé à une température comprise entre 730 et 790°C, avec un temps de maintien prolongé par rapport à un traitement à plus haute température. Le refroidissement doit être effectué à une vitesse d'environ 55°C par heure. La vitesse de ferritisation dépend de la teneur en silicium, de la température de chauffage et de la forme du graphite. Si la température du traitement est trop basse, la vitesse de ferritisation diminue rapidement, et en dessous de 650°C, elle devient trop lente pour que le traitement puisse être réalisé dans des conditions économiques [21].

Bien que la ferritisation puisse être complète en dessous de l'intervalle de transformation, il est parfois plus avantageux d'effectuer un recuit à une température plus élevée en maintenant les pièces dans le domaine austénitique, pour assurer la dissolution de tous les carbures.

II.9.4.3 Influence du recuit de ferritisation sur le comportement mécanique

Le recuit de ferritisation peut améliorer les propriétés mécaniques de la fonte grise sphéroïdale, notamment en augmentant la ductilité et la ténacité, ce qui se traduit par une augmentation de l'allongement à la rupture. Cependant, cela peut être accompagné d'une diminution de la résistance à la traction et de la dureté. La limite conventionnelle d'élasticité et la contrainte de rupture peuvent être augmentées ou diminuées en fonction des conditions de traitement, elles sont influencées par plusieurs facteurs notamment la composition chimique de la fonte, la température de recuit, le temps de maintien et la vitesse de refroidissement [22].

Le tableau (Tab II.2) présenté ci-dessous illustre les résultats des essais de traction, y compris la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% ($\sigma_{0,2}$), la contrainte de rupture et l'allongement à la rupture (A), ainsi que les résultats des tests de ténacité J_{IC} et de dureté sur deux nuances de fonte présentant des différences dans leur teneur en silicium. Les tests ont été effectués à l'état brut. De coulée et après un traitement de recuit de ferritisation.

Tab. II. 2 : Caractéristiques mécaniques de fonte G.S. avant et après traitement thermique de ferritisation [22]

Nuance	Etat	Matrice	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	σ_r (MPa)	A (%)	J_{IC} (kJ/m ²)	Dureté HV (30 kgf)
%Si = 2,6	Brut de coulée	50% perlite + 50% ferrite	327	513	14	28,5	183
	Ferritisé à 880°C	2% perlite + 98% ferrite	277	413	25	61,5	147
%Si = 3,2	Brut de coulée	5% perlite + 95% ferrite	350	492	21	44	185
	Ferritisé à 880°C	2% perlite + 98% ferrite	315	463	24	55	161

II.10 Phénomènes de solidification, germination et surfusion

En métallurgie, les phénomènes de solidification, germination et surfusion jouent un rôle fondamental dans les transformations de phases. La solidification correspond au processus de transformation d'un matériau liquide en un matériau solide. La germination, quant à elle, est le début de la formation de cristaux dans un liquide en sur-refroidissement. Enfin, la surfusion se produit lorsque le liquide est refroidi en dessous de sa température de solidification et quand la transformation en solide ne se produit pas immédiatement. Au lieu de cela, le liquide reste en surfusion jusqu'à ce qu'un déclencheur extérieur provoque la formation de cristaux.

II.10.1 Solidification d'un métal pur

La solidification d'un métal pur est un processus clé en science et génie des matériaux. Elle peut être divisée en trois étapes principales : la formation de germes de cristallisation, la croissance des cristaux et la formation de la structure de grains. Lorsque le métal pur est refroidi à une température inférieure à son point de fusion, il commence à se solidifier. Les atomes du liquide commencent à se rassembler pour former des germes de cristallisation, qui sont de petits groupes d'atomes ordonnés. Plusieurs facteurs peuvent influencer la formation des germes de cristallisation, notamment la température, la concentration des atomes, la présence d'impuretés et la vitesse de refroidissement.

Une fois que les germes de cristallisation se forment, les atomes se déplacent du liquide vers les germes de cristallisation, entraînant la croissance des cristaux. Les atomes adjacents aux germes de cristallisation ont une orientation cristalline similaire, ce qui facilite la croissance des cristaux dans une direction spécifique.

Au fur et à mesure que les cristaux grandissent, ils se rencontrent et coalescent, formant des grains de cristal plus grands. La forme et la taille des grains dépendent de nombreux facteurs, tels que la température, la vitesse de refroidissement, la composition chimique et les conditions de traitement.

II.10.2 Solidification d'une fonte

La solidification de la fonte se produit en plusieurs étapes. Tout d'abord, le liquide est refroidi en dessous de sa température de solidification, ce qui entraîne la formation de noyaux de cristallisation. Ces noyaux se forment généralement autour des impuretés présentes dans le liquide et au fur et à mesure que la température continue de baisser, les noyaux de cristallisation se transforment en cristaux solides. Ces cristaux se développent en forme de dendrites ou encore sous forme de structures arborescentes.

Au fur et à mesure que les cristaux se développent, ils se rencontrent et se soudent les uns aux autres pour former un solide continu. Cependant, il peut y avoir des lacunes ou des porosités dans la structure solide résultante, ce qui peut affaiblir le matériau. Par conséquent, la fonte est souvent soumise à un traitement thermique pour éliminer ces défauts de structure.

II.11 Structure cristalline d'une pièce coulée

La structure cristalline d'une pièce coulée en fonte dépendra du type de fonte utilisé et des conditions de coulée et de refroidissement.

En général, la fonte est un alliage de fer avec une teneur en carbone supérieure à 2%, ce qui donne lieu à la formation de carbures de fer dans la structure cristalline. La fonte peut avoir une structure cristalline de type ferrite ($\alpha\text{-Fe}$), austénite ($\gamma\text{-Fe}$) ou une combinaison de ces deux phases.

Lorsqu'un liquide commence à se solidifier, des germes peuvent se développer et former des structures en forme d'arborescences appelées dendrites. Les dendrites continuent de croître jusqu'à ce qu'elles rencontrent d'autres dendrites voisines, et la solidification se poursuit alors dans les espaces inter-dendritiques. Finalement, lorsque la solidification est terminée, les dendrites ont généralement disparu et ont été remplacées par des grains juxtaposés.

Une pièce solidifiée dans un moule présente trois régions de microstructure différente (**Fig II.28**) qui sont :

- une zone de peau, où l'orientation des dendrites se fait au hasard et où les grains sont fins du fait d'une intense germination due à un refroidissement très rapide.
- une zone « basaltique », dans laquelle les dendrites croissent dans le sens du flux thermique.
- une zone « équiaxe », solidifiée en dernier, dans laquelle il n'y a plus de direction de croissance préférentielle des dendrites.

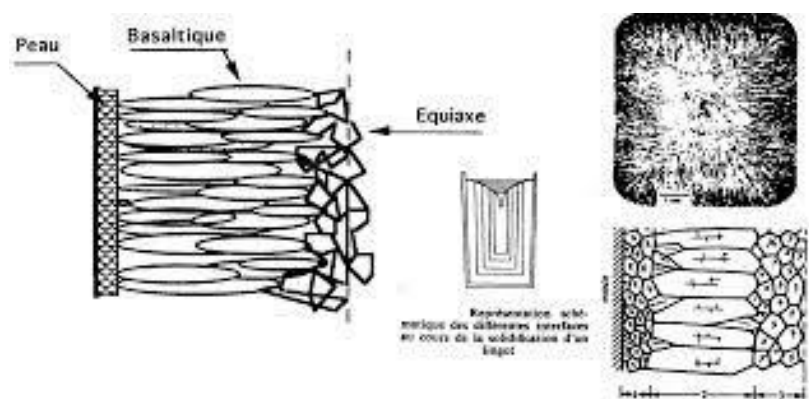


Fig. II.28 : Structure cristalline d'une pièce solidifiée

chapitre III

Etude et simulation

III.1 Introduction

De nos jours, l'utilisation des outils numériques est devenue essentielle dans de nombreux domaines de l'industrie, notamment pour la simulation. Les simulations numériques permettent de modéliser le comportement des pièces ou des systèmes dans des conditions réelles, ce qui permet aux ingénieurs de prévoir les éventuels problèmes et de les corriger avant que la production ne commence. Cette capacité à anticiper les résultats permet d'optimiser les processus de fabrication, de réduire les coûts des pièces rebutées et d'améliorer la qualité des produits. Les outils numériques sont utilisés dans de nombreux secteurs, tels que la conception assistée par ordinateur (CAO), la simulation, la modélisation, l'analyse de données, la gestion de la production, ...etc.

Dans ce contexte, nous allons nous intéresser plus particulièrement à l'utilisation de ces outils pour la simulation, en particulier pour la simulation de coulée de la fonte grise sphéroïdale à l'aide du logiciel **ProCAST**. Nous expliquerons comment cette technologie peut contribuer à optimiser le processus de fabrication, à prévoir les éventuels problèmes de production et à améliorer la qualité des produits finis tout en optimisant le poids du métal liquide.

Problématique

La fabrication des pièces pour véhicules industriels est un domaine spécifique de l'industrie automobile qui exige une vigilance accrue en ce qui concerne la conformité aux normes et la performance des pièces produites qui peuvent également avoir un impact direct sur l'économie. Des pièces défectueuses peuvent entraîner des coûts supplémentaires pour l'entreprise en termes de rejets, de rappels et de réparations. Donc il est crucial d'assurer une production de haute qualité et de haute performance pour minimiser les coûts de production et maximiser la rentabilité.

Comment peut-on améliorer le processus de coulée d'un support de couronne ABS de frein en fonte grise en optimisant le taux de PML à travers une simulation numérique à l'aide du logiciel ProCAST ?

L'objectif de ce travail consiste à étudier le système de coulée et l'alimentation d'un support de couronne ABS, ainsi que les défauts de fonderie qui peuvent apparaître pendant le processus de refroidissement et de solidification afin d'optimiser le taux de PML en utilisant le logiciel de conception **SolidWorks** et de simulation **ProCAST**.

III.2 Etude et conception de la pièce

III.2.1 Pièce étudiée

III.2.1.1 Définition

Le système ABS est un dispositif de sécurité (**Fig. III.1**) conçu pour empêcher le blocage des freins. Les capteurs de vitesse du véhicule détectent si une roue est susceptible de se bloquer. Par la suite, le calculateur prend le contrôle de la valve de régulation appropriée. Cette action permet d'éviter toute augmentation de la pression de freinage jusqu'à ce que la roue retrouve une décélération normale.



Fig. III.1 : Support de couronne ABS

La fonction principale de la traction intégrale du véhicule est d'éviter le patinage des roues en cas de perte de traction. Ce système améliore les performances du véhicule dans des conditions de routes glissantes. Il est essentiel de souligner l'importance de contrôler la traction lors de l'accélération afin de prévenir le patinage des roues. En effet, cela a un impact direct sur la surchauffe des différentiels ou le bris de composants tels que l'arbre de transmission, les essieux, les roulements de roues, ...etc.

L'ABS octroie au conducteur la capacité de préserver la trajectoire du véhicule même en cas de freinage intense, grâce à la prévention du blocage des roues. Par conséquent, les voitures équipées de l'ABS bénéficient d'une distance d'arrêt plus courte, puisque l'efficacité de freinage demeure maximale jusqu'à l'immobilisation complète.

III.2.1.2 Carte technique

Le tableau (**Tab III.1**) donne toutes les caractéristiques techniques des supports de couronne ABS.

Tab. III.1 : Carte technique d'un support de couronne ABS

Nom de la pièce	Support de couronne ABS
Nuance	Fonte GS 38-15
Résistance à la traction (R_m)	380 MPa
Poids de la pièce brute (GPc)	9,823 kg
Poids de la pièce net (GP)	8,93 kg
Épaisseur prédominant de la pièce	10 mm
Hauteur de la pièce brute (hpc)	71 mm
Surépaisseur d'usinage	3 mm
Dépouilles	3°-6°
Hauteur de la descente de coulé (hdc)	220 mm
Hauteur de la pièce coulée au-dessus des attaques (hs)	71 mm
Dimension de la plaque modèle	(630 x 500) mm
Dimensions des châssis	(630 x 500 x 500) mm
Poids du moule	500 kg
Nombre de pièces par moule	1
Procédé de moulage	Moulage mécanique (à vert)
Température de coulée	1410°C
Temps du remplissage du moule	6,895 s

III.2.2 Étapes de réalisation du plan de brut

1. Détermination de la surépaisseur d'usinage

En usinage, un processus progressif permet d'obtenir les dimensions et la qualité de surface requises par le dessin à partir de pièces brutes, tout en respectant les tolérances spécifiées. Chaque opération consiste à enlever une fine couche de métal de la surface de la pièce sous forme de copeau, modifiant ainsi les dimensions. La quantité de métal retirée pour atteindre les dimensions et formes précises exigées.

Il est déterminé en mesurant la différence entre la taille de la pièce brute avant l'usinage et la taille de la pièce finie après l'usinage. Cette différence est généralement exprimée en

millimètres ou en pouces. Il est important de prendre en compte cette surépaisseur lors de la conception des pièces pour s'assurer qu'elles ont les dimensions requises après l'usinage.

2. Choix du plan joint

Le choix du plan de joint du moule est déterminé en fonction de la forme et de la taille de la pièce. Il doit prendre en considération :

- ✓ le processus de remplissage de la cavité.
- ✓ la facilité de démoulage de la pièce.
- ✓ les limites des opérations d'ébavurage.

Dans notre cas, le plan de joint utilisé est appelé plan de joint brisé qui divise la pièce en deux.

III.2.3 Facteurs de sélection des matériaux

Le choix final du matériau et du procédé de fabrication dépend de plusieurs facteurs, notamment les caractéristiques techniques du matériau, les coûts récurrents et non récurrents associés, les considérations techniques associées au processus de conversion ou d'assemblage et les exigences environnementales.

- **Normes techniques**

- ✓ caractéristiques mécaniques (la résistance mécanique, la limite élastique, l'allongement, la résistance à la fatigue).
- ✓ la résistance à l'usure.
- ✓ la résistance à la corrosion.
- ✓ la conductivité ou la diffusivité thermique ou électrique.
- ✓ le conservateur.

- **Normes économiques**

Il est nécessaire de prendre en compte :

- ✓ le coût du matériau en lui-même et sa possible évolution.
- ✓ le coût de la mise en œuvre associé aux investissements nécessaires.
- ✓ les coûts récurrents (essais VA) et non récurrents (prototypes, outils de production, mise au point initiale) et durée de vie des outils.
- ✓ les prix des matériaux (et leur évolution probable).
- ✓ autres coûts indirects (emballage, transport, contrôle qualité, ...etc.)

- **Normes technologique**

Les critères technologiques liés à l'environnement de la pièce ont un impact sur la facilité de réalisation du sous-ensemble. Parmi ces critères, on retrouve :

- ✓ l'assemblage avec d'autres matériaux.
- ✓ l'usinabilité ou la susceptibilité à la déformation (à froid ou à chaud).
- ✓ la possibilité d'automatisation du processus de fabrication.
- ✓ les traitements thermiques ou traitements de surface ultérieurs.

- **Normes d'éco-conception**

Ces critères sont liés au concept de développement durable, ils peuvent inclure :

- ✓ l'impact en termes d'émissions de CO₂ (ou de gaz plus globalement) du matériau et du processus choisi, en prenant en compte la production primaire, le transport, ...etc.
- ✓ l'impact en termes de facilité de recyclage ou de démontage.
- ✓ la disponibilité mondiale du matériau et la facilité de trouver des matériaux.

III.2.4 Etude de moulage

Avant de démarrer la production d'une pièce, il est essentiel de réaliser une étude de moulage approfondie. Cette étude permet de détecter d'éventuels problèmes de fabrication ou de conception qui pourraient entraîner des défauts dans le produit final. De plus, elle vise à optimiser le processus de production, en assurant une fabrication efficiente et économiquement viable.

L'étude comprend l'utilisation de logiciels de conception assistée par ordinateur pour créer des modèles numériques de la pièce, qui servent ensuite à fabriquer les moules de moulage. Cette étape permet également de déterminer les éléments suivants :

- ✓ la quantité de matériau requise.
- ✓ les coûts associés à la production.
- ✓ les éventuels problèmes de fabrication.
- ✓ le dessin de définition complet, qui comprend des perspectives, plusieurs vues, des coupes, ... etc.
- ✓ les surépaisseurs, les dépouilles et les contre-dépouilles éventuelles, ainsi que les modifications mineures nécessaires pour faciliter le démoulage.
- ✓ le plan de joint approprié.
- ✓ les points d'attaque.
- ✓ le nombre d'empreintes nécessaires.

III.2.5 Création du système de coulée et d'alimentation

Le dispositif de coulée et d'alimentation est composé des éléments suivants :

- ✓ un entonnoir de coulé, placé en haut du moule, qui sert de réserve de métal.
- ✓ une descente de coulée, une conduite verticale par laquelle le métal liquide s'écoule vers le chenal.
- ✓ des chenaux (ou canaux) qui assurent une circulation régulière du métal, permettant ainsi de remplir l'empreinte de manière contrôlée et uniforme.
- ✓ des attaques de coulée qui permettent l'entrée du métal dans l'empreinte.
- ✓ des événements, des conduites verticales qui facilitent l'évacuation des gaz présents dans l'empreinte pendant la coulée.

III.3 Modélisation de la pièce

III.3.1 Présentation du logiciel utilisé

SolidWorks est un logiciel de CAO (conception assistée par ordinateur) qui permet de concevoir, de modéliser et de simuler des pièces mécaniques en 3D. Il est largement utilisé dans divers secteurs tels que l'ingénierie, la conception de produits, la fabrication, l'architecture et la construction [23].

Le logiciel de CAO SolidWorks se base sur trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Son fonctionnement est basé sur la modélisation 3D de pièces et d'assemblages en utilisant une variété d'outils de conception et de simulation. Les fonctionnalités telles que les chanfreins, les congés, les nervures et les filetages peuvent être appliqués pour ajouter des détails aux modèles. Il permet aussi de la création de mises en plan 2D [24].

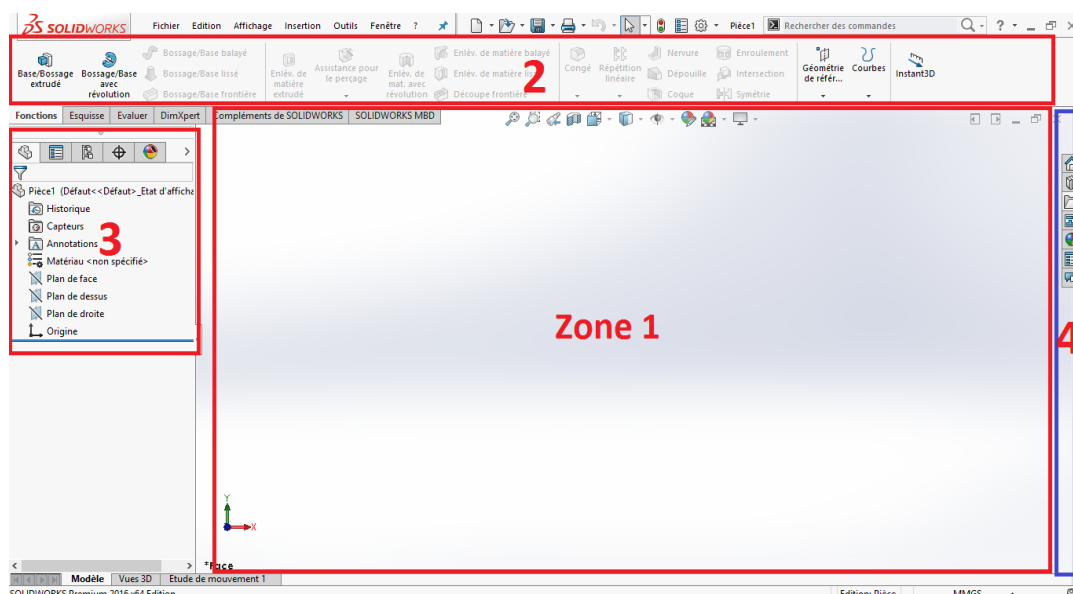


Fig. III.2 : Interface du logiciel SolidWorks

Zone 1 : La zone graphique permet de manipuler les pièces, les assemblages et les mises en plan. On trouve aussi le réticule qui donne l'origine (0,0) et la barre d'accès rapide.

Zone 2 : Le gestionnaire de commande donne accès aux outils de SolidWorks.

Zone 3 : Le volet de définition gère les conceptions de pièce et d'assemblage, les feuilles de mise en plan, les propriétés, les configurations et les applications de tierces parties.

Zone 4 : Le volet des tâches permet d'accéder aux ressources, aux bibliothèques d'éléments de conception réutilisables et aux vues de SolidWorks à faire glisser sur les feuilles de mise en plan, ainsi qu'à d'autres objets et informations utiles [25].

La réalisation de la conception de notre support de couronne de freins ABS a été possible grâce aux opérations suivantes :

- sélection de l'axe de rotation,
- réaliser le plan, les esquisses et les cotations nécessaires pour obtenir le modèle final de la pièce comme illustré par la figure (**Fig III.3**).

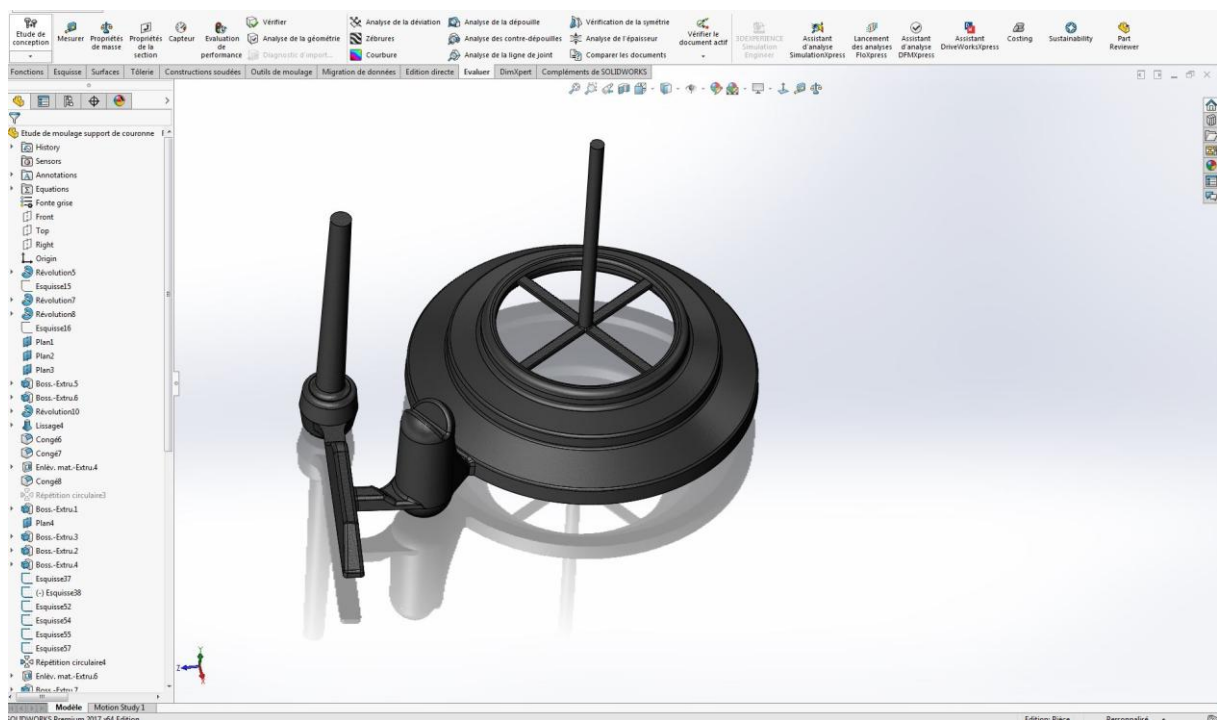


Fig. III.3 : Dessin de support de couronne ABS par le SolidWorks

III.4 Simulation de la pièce

III.4.1 Présentation du logiciel utilisé

Le logiciel ProCAST développé par la société ESI Group basée en Amérique du Nord est un outil de simulation précieux pour les ingénieurs de fonderie (**Fig III.4**) leur permettant de résoudre rapidement les problèmes de fonderie.

Ce logiciel donne la possibilité aux ingénieurs de mieux comprendre et identifier les sources de défauts de fonderie, tels que les bavures, les piqûres, les soufflures, les retassures, les tapures, les criques à chaud et les inclusions, en simulant le comportement des différents métaux et alliages lors de la coulée, tout en prenant en compte les conditions environnementales. Il aide à rectifier efficacement ces défauts, ce qui contribue à améliorer la qualité globale des pièces moulées, à réduire les défauts de fabrication et à diminuer le taux de rebuts. De plus, grâce au suivi de la trajectoire du métal dans le moule, son mouvement et sa température de solidification, Il peut assurer également l'optimisation du poids de métal liquide «PML».

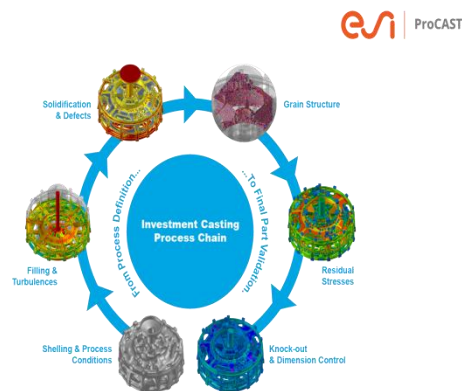


Fig III.4 : Présentation du logiciel ProCAST

III.4.2 Etape à suivre pour la modélisation

Pour modéliser ou simuler une pièce avec ProCAST, il est important de suivre un certain nombre d'étapes précises qui sont :

1. **Importer la géométrie de la pièce conçue par SolidWorks** : dans le menu "File", sélectionner "Import geometry" et choisir le format de fichier approprié « IGS ».
2. **Créer un modèle de moule** : dans le menu "Modeling", sélectionner "New model" et créer un nouveau modèle de moule. Dessiner les contours du moule, ajouter les événements, les événements de purge et les canaux de coulée en fonction de la géométrie de la pièce.
3. **Configurer les paramètres de simulation** : dans le menu "Simulation", sélectionner "New simulation" et choisir les paramètres de simulation appropriés, tels que la nuance du matériau, la méthode de coulée, la vitesse de coulée, la température de coulée, la fraction de solide, la gravité et le type de sable.
4. **Mailler le moule et la pièce** : dans le menu "Meshing", sélectionner "New mesh" et mailler le moule et la pièce.

5. **Exécuter la simulation** : dans le menu "Simulation", sélectionner "Execute simulation".
6. **Analyser les résultats de la simulation** : dans le menu "Analysis", sélectionner "New analysis".

Le logiciel ProCAST nous donnera la possibilité de calculer le poids de métal liquide « PML » nécessaire pour produire la pièce, lequel varie proportionnellement avec le volume. Le PML englobe le poids de la pièce en plus de tous les autres éléments du système de coulée, tels que le canal, les attaques, les masselottes, ... etc.

III.4.3 Maillage

Le maillage est une technique de discrétisation numérique utilisée pour diviser un domaine continu en éléments finis de forme géométrique simple. Il permet de représenter discrètement la géométrie et les propriétés physiques d'un objet ou d'un phénomène. Dans le cas de la simulation de coulée de métaux, le maillage est utilisé pour diviser un volume de métal en plusieurs éléments finis de forme géométrique simple.

La qualité du maillage est déterminée par des variables telles que la taille des mailles, la forme des éléments, la densité de mailles, ainsi que les critères de raffinement et d'adaptation de maillage. Un bon maillage est celui qui représente de manière précise et efficace la géométrie et les propriétés physiques du système simulé. Il doit avoir une densité de mailles suffisante pour capturer les variations spatiales de la solution, tout en évitant une surcharge inutile en termes de temps de calcul.

III.4.4 Coulée

Pour produire une pièce moulée saine et de qualité, nous allons étudier le processus de remplissage du moule durant cette étape. Cela consiste à analyser l'environnement de production et à mettre en place des mesures préventives pour éviter différents problèmes tels que les cassures, les retassures, les malvenus, les soufflures, la solidification prématurée et l'insuffisance de la pression. Il est important de ne pas remplir le moule trop vite ou trop lentement afin d'éviter toute érosion. En général, il est préférable de maintenir une vitesse de remplissage (**Fig III.5**) inférieure à 1m/s pour éviter cela.

Simulation 1

III.4.5 Analyse des images de remplissage du moule

Une fois tous les paramètres souhaités sélectionnés, nous démarrons la simulation de l'écoulement de la fonte FGS 38-15 liquide jusqu'à sa solidification en fonction de temps.

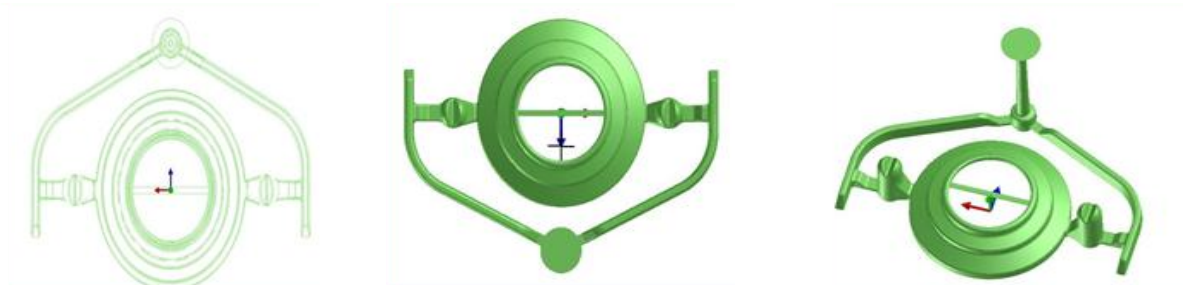


Fig III.5 : Remplissage de l'empreinte du support de couronne ABS et du système de coulée

Une fois le moule rempli, la pièce commence à se solidifier graduellement, conformément au temps de refroidissement estimé par ProCAST. Le métal liquide commence alors à se solidifier progressivement, en commençant par les contours et les parties fines de la pièce (Fig III.5) avant de se solidifier complètement dans les zones les plus massives. Pendant ce processus, la contraction volumique se produit à mesure que le métal passe de l'état liquide à l'état solide, ce qui peut entraîner des défauts tels que des fissures ou des déformations si elle n'est pas correctement gérée.

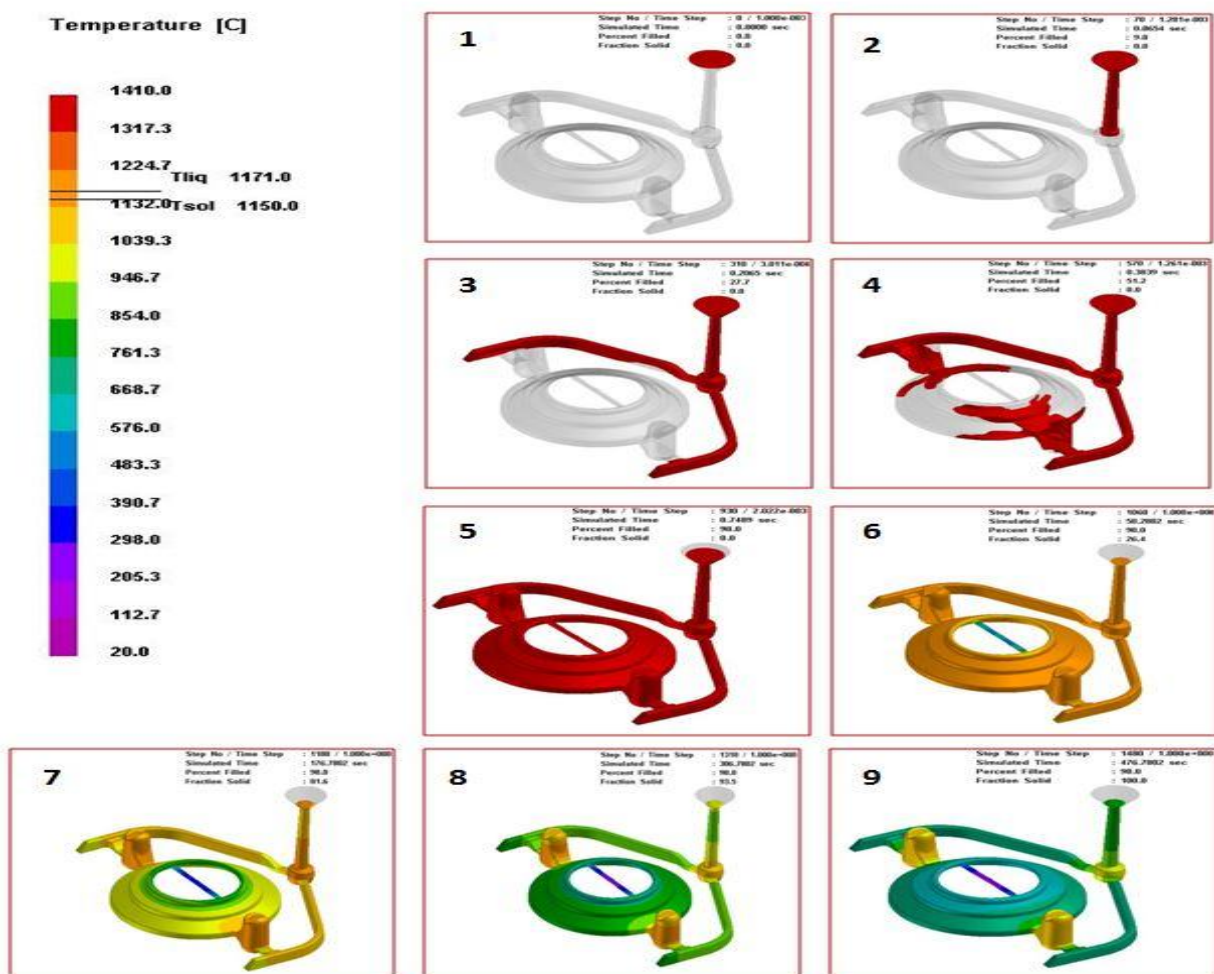


Fig III.6 : Simulation de la solidification du métal liquide dans toutes les parties de la pièce

Le processus de solidification du métal liquide dans toutes les parties de la pièce est illustré dans la figure (**Fig III.6**). La solidification commence par la pièce elle-même, se propageant progressivement vers les masselottes, et enfin vers l'entonnoir, qui est le dernier point à se solidifier. La température initiale de coulée est de 1410°C , et la solidification prend 345,9 s soit 5,76 min pour s'achever. La température est l'un des paramètres qui influencent le refroidissement du métal liquide coulé.

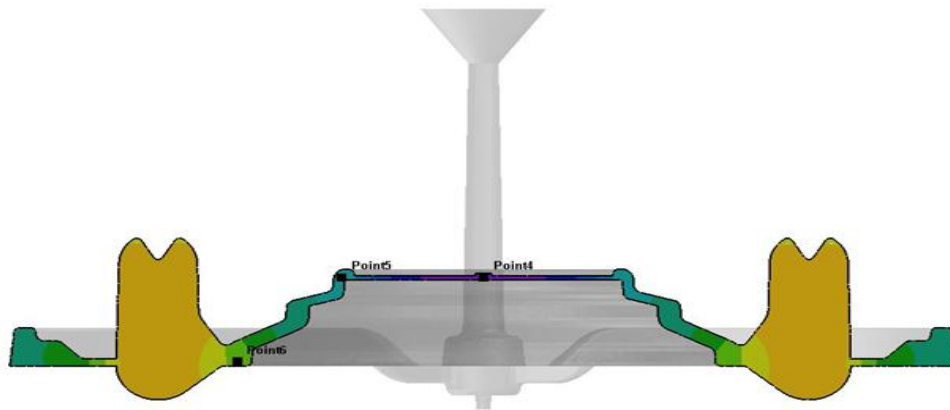


Fig III.7 : Variation de la température dans différentes zones de la pièce

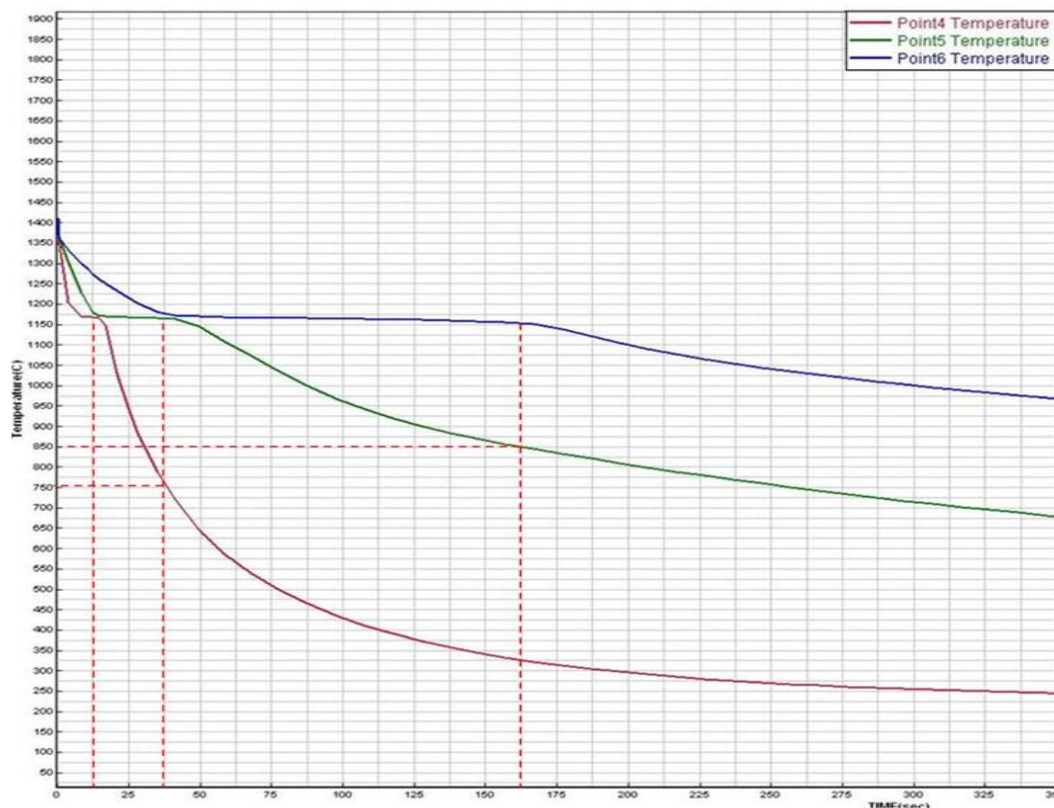


Fig. III.8 : Variation de la température en fonction du temps des zones correspondants aux points (4, 5, 6)

Le graphe illustré dans la figure (**Fig III.8**) représente trois courbes illustrant la variation de la température en fonction du temps dans les zones correspondants aux points (4), (5) et (6), tels qu'indiqués dans la figure (**Fig III.7**). On observe que la zone qui correspond au point (4) se solidifie très rapidement par rapport aux autres zones.

À partir de la température initiale de coulée 1410°C, ces zones entrent dans la phase de germination puis dans la phase de solidification. Ensuite, ils entrent dans la phase de refroidissement.

Tab III.2 : Paramètres obtenus à partir du logiciel ProCAST

Zone	Température initiale de coulée (°C)	Température initiale de germination (°C)	Durée de germination (s)
Zone (4)	1410	1175	6,25
Zone (5)	1410	850	25
Zone (6)	1410	300	125

III.5 Présentation du problème détecté

Les paramètres qui influencent le refroidissement du métal liquide peuvent causer des défauts de fonderie tels que les soufflures, les pores, les criques, les cassures, les fissures et les retassures. Ils comprennent la température du métal liquide, la vitesse de refroidissement, le matériau et la conception du moule, ainsi que les conditions d'agitation du métal liquide.

Après analyse des résultats présentés au tableau (**Tab III.2**), nous pouvons remarquer que la zone (6) présente une période de changement d'état la plus élevée soit 125 s par rapport aux autres zones 6,25s et 25 s. Cette zone entraîne un refroidissement hétérogène du métal liquide, ce qui cause des contraintes dans la pièce lors de la solidification. Ces contraintes conduisent finalement à la formation de retassures.

Donc lors de la fabrication du support de couronne ABS, la retassure est le seul défaut qui apparaît.

III.6 Remède au défaut

Les retassures sont des défauts fréquents dans les pièces moulées qui peuvent compromettre la qualité et la durabilité du produit final. Cependant, l'utilisation du logiciel ProCAST permet de prévenir ces défauts dès la conception du moule grâce à la simulation numérique.

En effet, le logiciel ProCAST peut efficacement simuler l'écoulement du métal dans le moule et sa solidification pour déterminer le système de coulée et d'alimentation le plus adéquat, afin d'éviter l'apparition des défauts et d'obtenir un produit final de haute qualité tout en réduisant les coûts et le temps de production.

Donc pour assurer la production d'un support de couronne ABS exempt de tout défaut, il est nécessaire d'apporter des modifications aux paramètres du système de coulée, tels que les dimensions du moule, la température et la vitesse de coulée, le type de sable, ... etc., en tenant compte du temps de remplissage et de solidification dans le moule. Par ailleurs, une réduction du taux du PML a été envisagée dans le but de valoriser notre travail.

Simulation 2

Nous avons réalisé les modifications suivantes :

- Introduit un (01) événement
- Modifié la forme du chenal
- Réduit le nombre de masselottes en gardant une (01) seule
- Réduit le nombre d'attaques en gardant une (01) seule

III.6.1 Analyse des images de remplissage du moule

La figure (Fig III.9) illustre bien l'étape du remplissage du moule lors de la simulation 2.



Fig. III.9 : Remplissage de l'empreinte du support de couronne ABS et du système de coulée

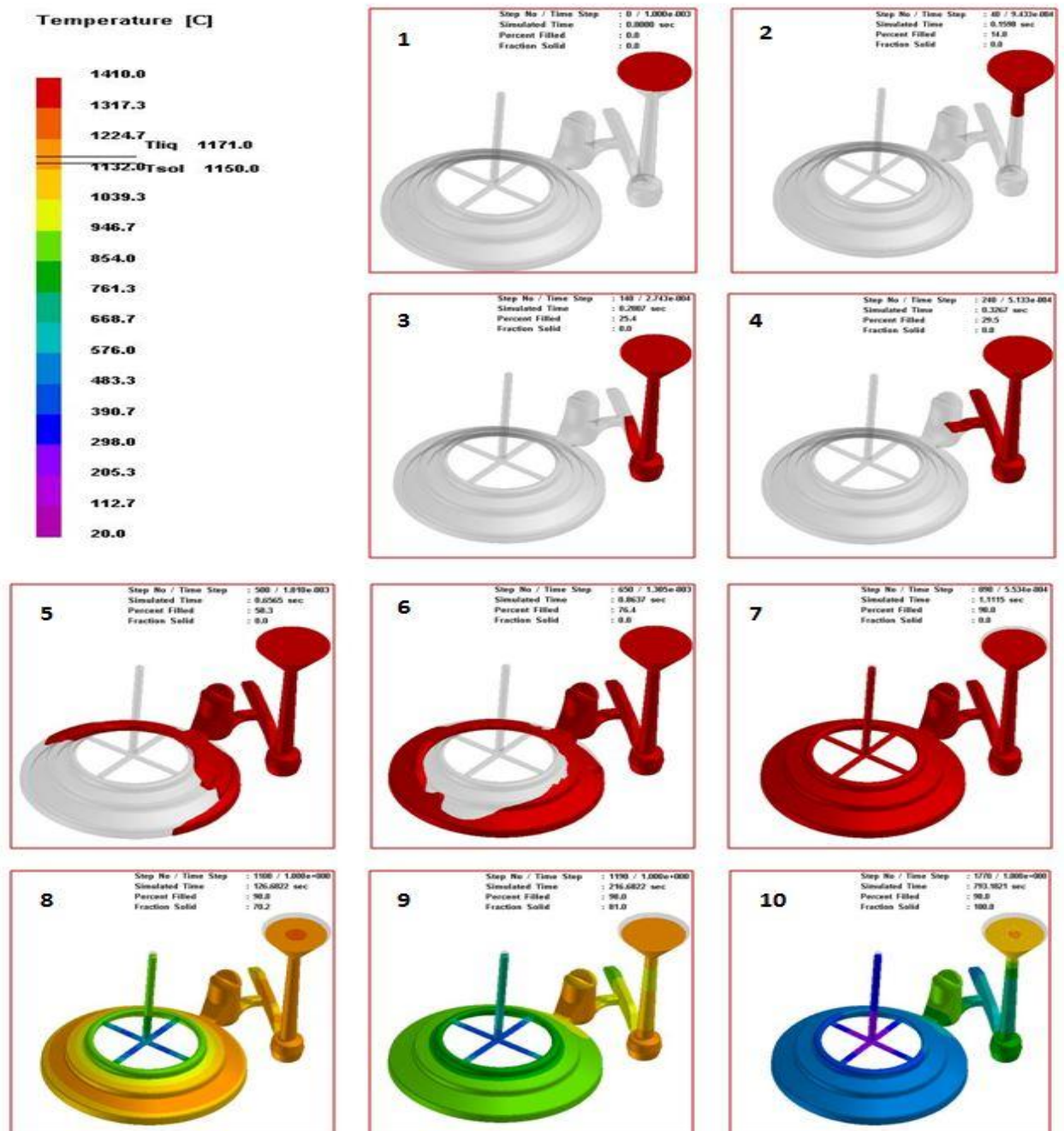


Fig. III.10 : Simulation de la solidification du métal liquide dans toutes les parties de la pièce au cours du temps

La figure (**Fig III.10**) représente le processus de solidification du métal liquide dans toutes les parties de la pièce après la modification du système de coulée. Les variations de couleur témoignent des variations de température. La solidification débute à partir de la pièce elle-même, se propage progressivement vers la masselotte, pour finalement atteindre l'entonnoir, qui constitue le dernier point de solidification. La température initiale de coulée était de 1410°C, et la solidification a pris 569,4 s soit 9,49 min pour se compléter.

Les figures ci-dessous présentent les zones correspondants aux points (1, 4, 5) après modification du système de coulée.

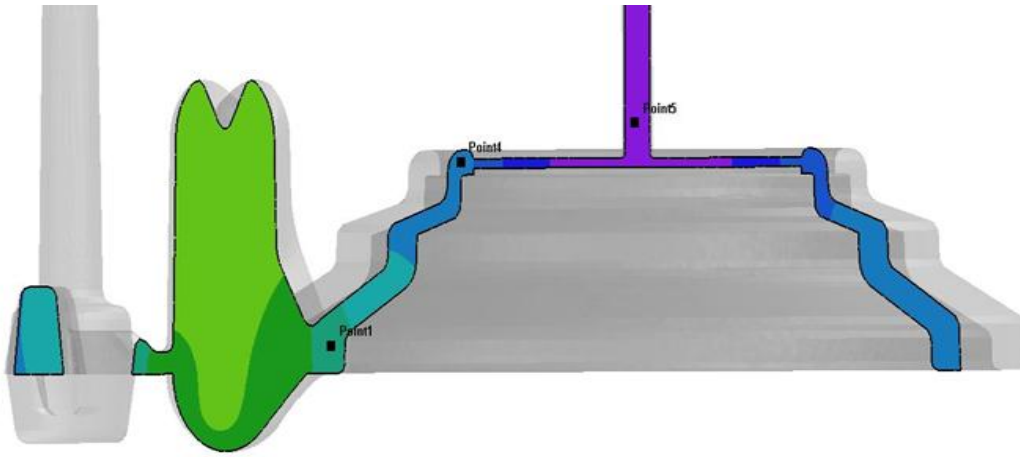


Fig. III.11 : Variation de la température dans les différentes zones de la pièce

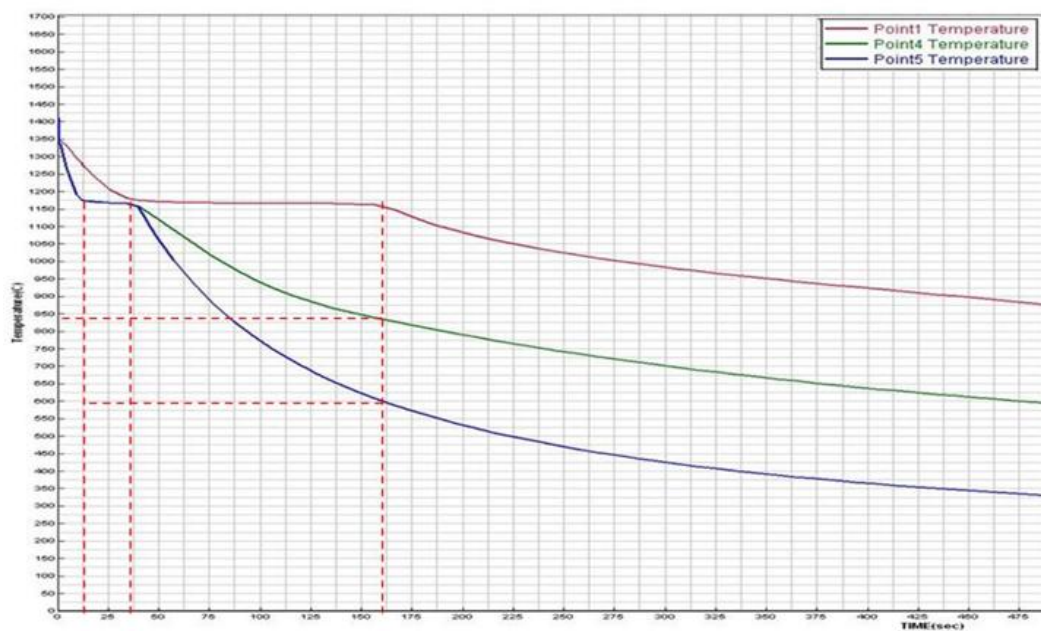


Fig. III.12 : Variation de la température en fonction du temps de solidification des zones correspondants aux points (1, 4, 5)

La courbe présentée ci-dessus illustre la variation de la température au cours du temps dans les parties correspondants aux points (1), (4) et (5), comme indiqué dans la figure (**Fig III.11**).

D'après la figure (**Fig III.12**), nous pouvons constater initialement une superposition des courbes des points 4 et 5 jusqu'à $t=37,5$ s, qui marque la durée totale de la germination. Au-delà de ce moment, la solidification se poursuit progressivement. De plus, la courbe du point (5) décroît rapidement par rapport à la courbe du point (4). Cela indique que la zone correspondant au point (5), située au niveau de l'évent, se solidifie plus rapidement que la zone du point (4).

Lors de la solidification de la pièce, le phénomène du retrait peut se produire, entraînant la formation de cavités et de retassures internes. La masselotte joue un rôle crucial à ce moment-là, en assurant l'alimentation continue de la pièce pendant sa solidification. Les retassures se forment ainsi au niveau de la masselotte, qui représente le dernier point chaud à se solidifier. Notre objectif consiste à éviter la formation de retassures dans la pièce.

Tabl. III.3: Paramètres obtenus à partir du logiciel ProCAST

Zones	Température initiale de coulée (°C)	Température initiale de germination (°C)	Durée de germination (s)
Zone (1)	1410	1175	112,5
Zone (4)	1410	1175	25
Zone (5)	1410	1175	25

Après l'analyse des résultats du tableau (**Tab III.3**), nous remarquons bien que les zones correspondantes aux points (4) et (5) ont une période de changement d'état très courte soit 25s (**Fig. III.12**), entraînant une transformation des germes très rapide. Par conséquent, le taux d'apparition de défauts dans ces zones est très faible. En revanche, la zone associée au point (1) présente une période de changement d'état plus longue soit 112,5s, ce qui conduit à une transformation plus lente des germes. Cela favorise donc l'apparition de retassures dans cette zone. Par conséquent, le rétrécissement est toujours possible dans la zone (1).

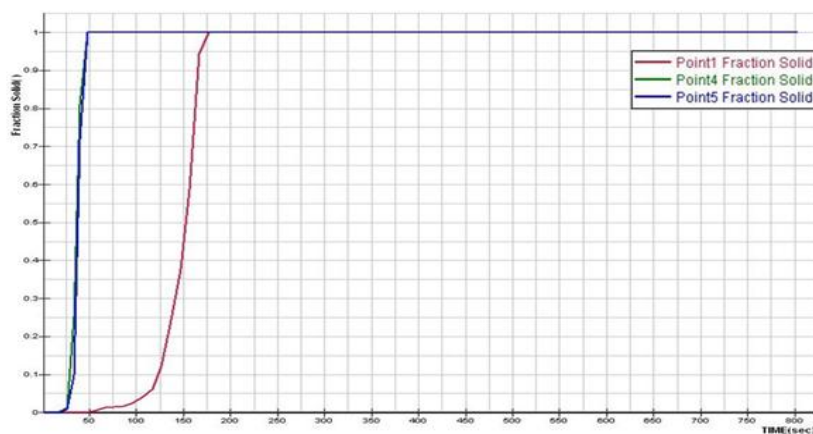


Fig. III.13 : Variation de la fraction solide dans les zones associées aux points (1, 4, 5) au fil du temps

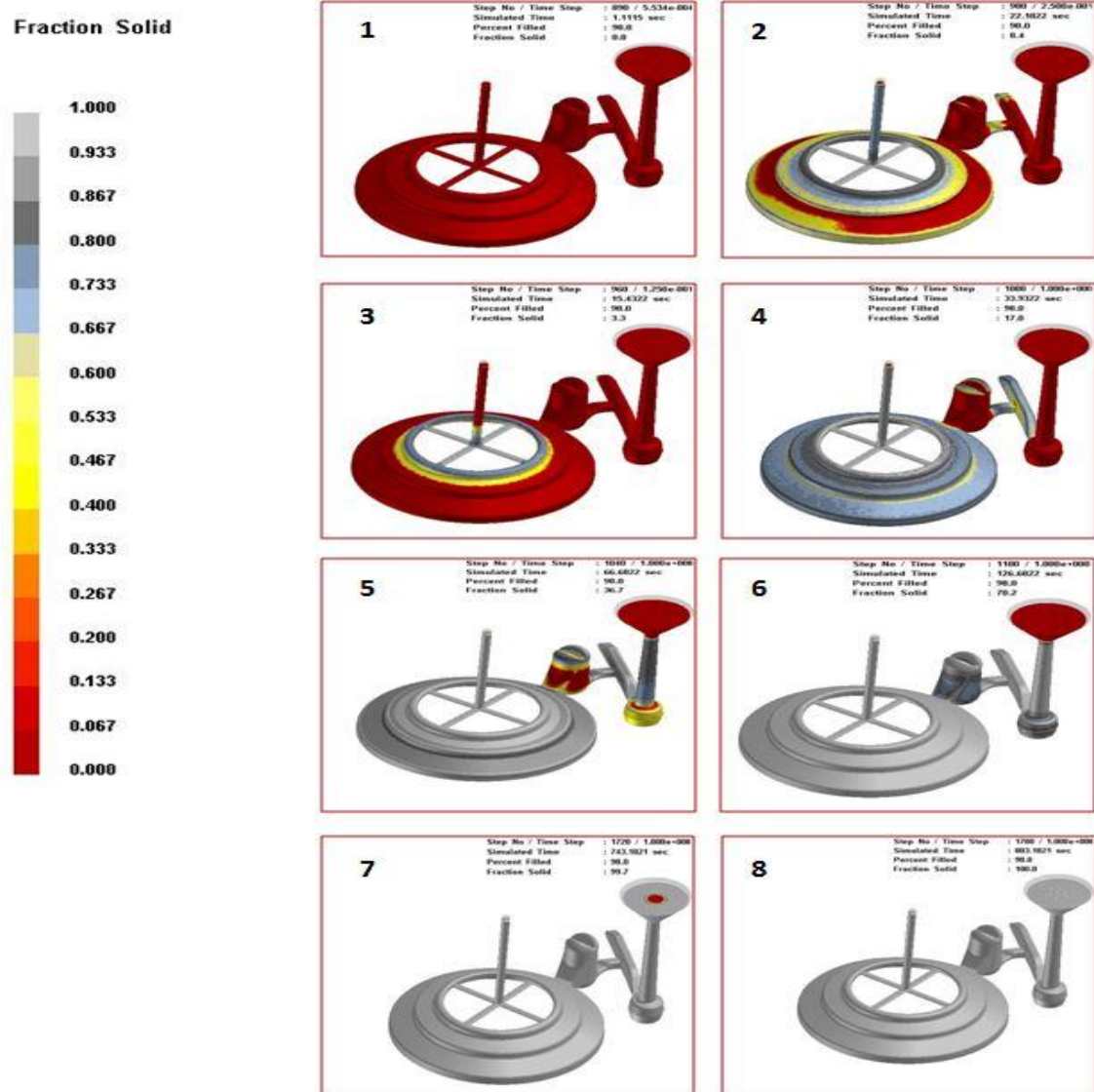


Fig. III.14 : Simulation de l'évolution de la proportion de solide dans tout le système au fil du temps

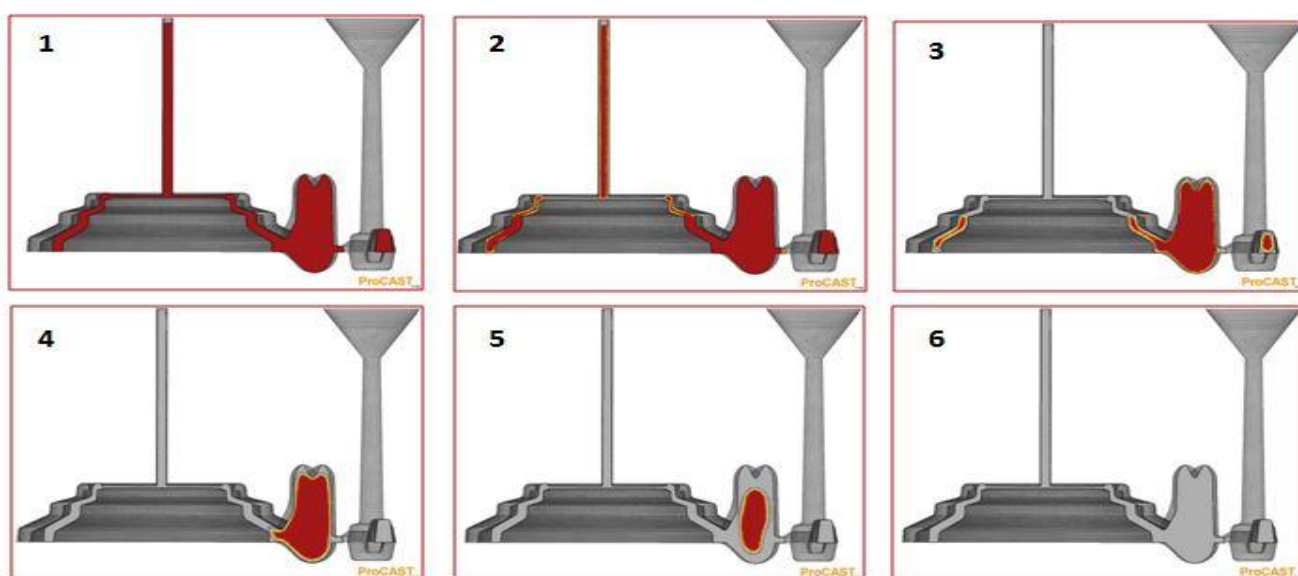


Fig. III.15 : Les étapes de formation de la fraction solide au fil temps

Notre objectif est de déplacer le dernier point chaud vers la masselotte afin de prévenir l'apparition de retassures dans la pièce. La figure (**Fig III.15**) illustre les différentes étapes de formation de la fraction solide au fil du temps. On observe que la formation de la fraction solide débute par l'évent et se termine dans la masselotte, qui constitue le dernier point chaud.

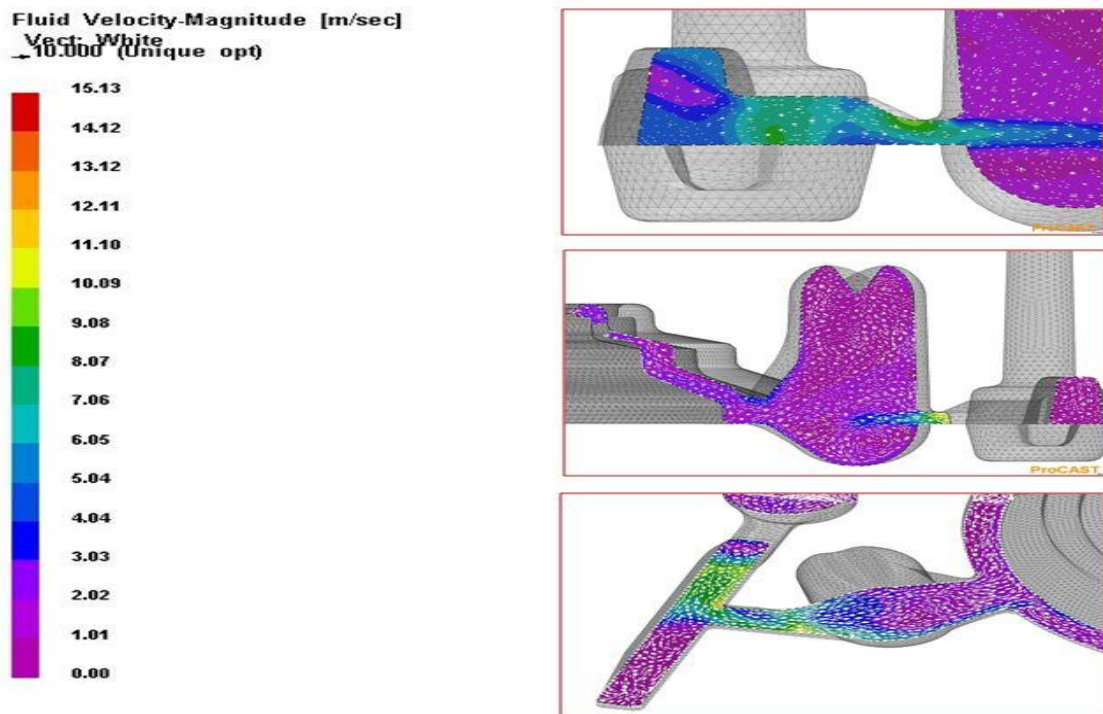


Fig. III.16 : Simulation de la vitesse d'écoulement du métal au cours du temps

La figure (**Fig III.16**) illustre la simulation de la vitesse d'écoulement du métal dans le chenal et l'attaque, qui permettent l'écoulement du métal vers le support. Il apparaît clairement que la vitesse moyenne d'écoulement dans le chenal, qui a une section de 28 mm est de 4,04 m/s. Par ailleurs, la vitesse moyenne d'écoulement dans l'attaque, avec une section de 14 mm, s'élève à 7,06 m/s.

Selon les résultats des tableaux (**Tab III.2**) et (**Tab III.3**) présentés ci-dessus, on a remarqué que la durée de germination de la zone correspondant au point (6) (qui correspond au point 1 après modification du système de coulée) était de 125 s, avec un début de refroidissement à $t = 300^{\circ}\text{C}$. Après la modification du système de coulée, cette durée est réduite à $T = 112,5$ s, avec un début de refroidissement à $t = 1175^{\circ}\text{C}$. Par conséquent, nous observons une différence de temps de $T=12,5$ s, ce qui accélère légèrement le temps de remplissage et réduit le temps de transformation des germes pendant la phase de changement d'état. Donc, cela permet de réduire la taille des retassures, bien que cette modification ne les élimine pas complètement.

III.6.2 Optimisation du taux de poids de métal liquide «PML»

En règle générale, l'optimisation du taux de PML vise à déterminer la quantité optimale de métal liquide nécessaire pour atteindre les propriétés souhaitées du produit, tout en minimisant les coûts et les pertes de matériau. Cette démarche prend en compte divers facteurs tels que les contraintes de production, les exigences de qualité, les coûts associés au métal liquide et les considérations environnementales.

Elle est souvent réalisée à l'aide de techniques de modélisation et de simulation pour prédire les résultats du processus de coulée avant la production réelle.

Avant d'apporter des modifications au système de coulée, le taux de PML était de 13 kg. En utilisant le logiciel ProCAST, des essais ont été effectués pour réduire cette valeur en modifiant le système de coulée, jusqu'à atteindre une valeur de 8,93 kg. Donc nous avons pu réduire environ 4,07kg de la matière perdue.

- PML (avant modification) = Coef. P = $6,5 \times 2 = 13$ kg
- PML (après modification) = Coef. P = $4,465 \times 2 = 8,93$ kg

III.7 Résultats obtenus suite aux récentes modifications

Suite à l'application des modifications nécessaires, nous avons réussi à réduire la taille de la retassure dans la zone correspondant au point 1, tel qu'illustré dans la figure (**Fig III.11**). Cependant, il est important de noter que malgré ces changements, la retassure n'a pas été complètement éliminée.



Fig. III.17 : Système de coulée et d'alimentation avant modification



Fig. III.18 : Système de coulée et d'alimentation après modification

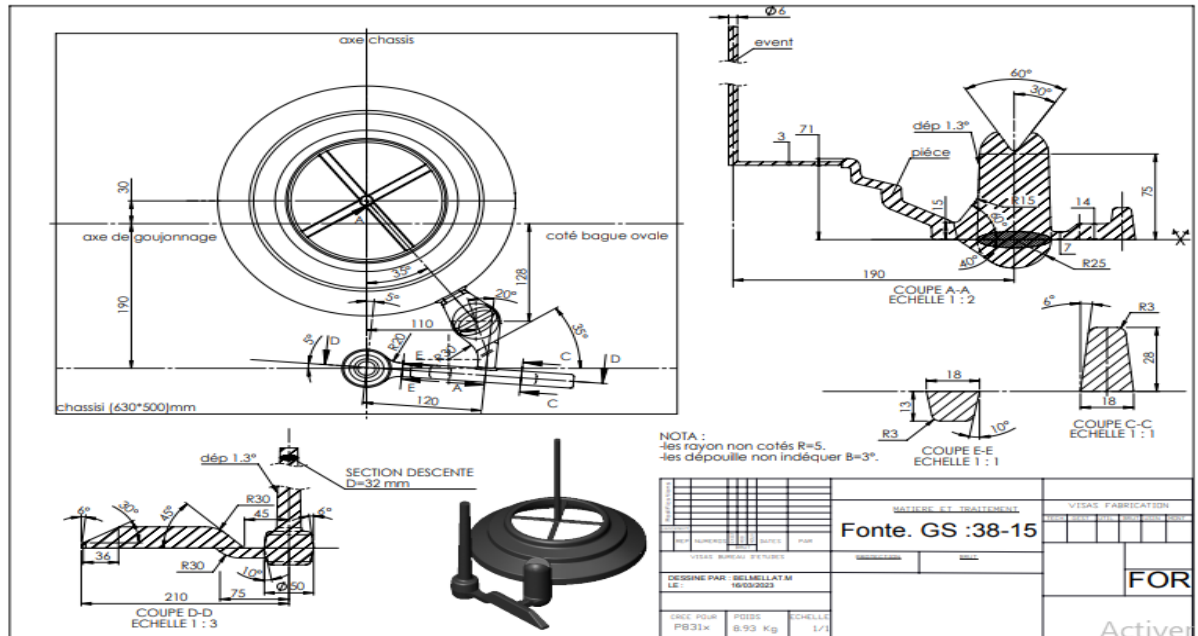
III.8 But de la modélisation et de la simulation

Les supports de couronne ABS fabriqués par la SNVI présentent souvent des retassures, qui ont un impact significatif sur leur qualité et leur performance.

En effet, ces défauts peuvent causer des problèmes de fonctionnement de la pièce produite, affecter sa durée de vie et réduire la qualité esthétique du produit. Par conséquent, il

est donc impératif de trouver des solutions pour éliminer les retassures et améliorer la qualité des supports.

Grâce à l'utilisation du logiciel ProCAST, ce projet de fin d'étude a abouti à la réduction de la taille des retassures sur les supports de couronne ABS et à l'optimisation du taux du PML de 13 kg à 8,93 kg.



III.9 Calcul de système d'alimentation

La pièce d'étude (support de couronne ABS) pèse 8,93 kg (< 45 kg). Par conséquent, le calcul du système de coulée est effectué à l'aide de la méthode DITTRRT.

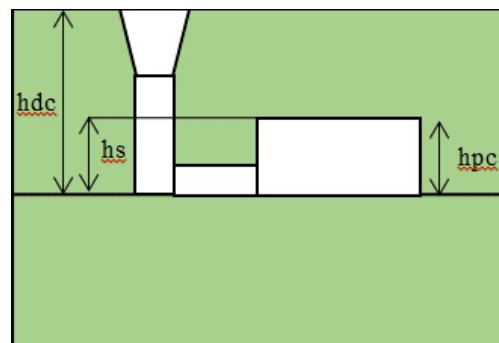


Fig III.20 : Position de la pièce dans le moule

D'après la figure (Fig III.20), nous pouvons constater que la pièce est insérée en haut du châssis (système de coulée en bas).

a. Poids de la pièce coulée brute Gpc

$$G_{pc} = G_p + (0,05 - 0,15) G_p$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} G_{pc} : \text{Poids de la pièce coulée brute (kg)} \\ G_p : \text{Poids de la pièce (kg)} \end{array} \right.$

Donc : $G_{pc} = 8,93 + 0,1 \cdot 8,93 = 9,823 \text{ kg}$

b. Hauteur métallog-statique H_m

$$H_m = h_{dc} - \frac{h_s^2}{2h_{pc}}$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} H_m : \text{Hauteur métallog-statique (mm)} \\ h_{dc} : \text{hauteur de la descente de coulée} = 220 \text{ (mm)} \\ h_{pc} : \text{hauteur de la pièce coulée brute} = 71 \text{ (mm)} \\ h_s : \text{hauteur de la pièce coulée au-dessus des attaques} = 71 \text{ (mm)} \end{array} \right.$

Donc : $H_m = 220 - \frac{71^2}{2 \cdot 71} = 184,5 \text{ mm}$

c. Section d'attaque S_a

$$S_a = x \frac{\sqrt{G_{pc}}}{\sqrt{H_m}}$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} S_a : \text{Section globale des attaques pour une seule pièce coulée (mm}^2\text{)}. \\ x : \text{Coefficient que l'on choisit en fonction de l'épaisseur des parois de la pièce coulée.} \end{array} \right.$

Tab III.4 : Valeurs du coefficient x

Epaisseur des parois (mm)	2,5 - 3,5	3,5 - 8,0	8,0 - 15
X	5,8	4,9	4,3

Tant que l'épaisseur la plus prédominante de la pièce est de 10 mm, la valeur du coefficient x correspondant est de 4,3.

Donc : $S_a = 4,3 \frac{\sqrt{9,823}}{\sqrt{18,45}} = 313,75 \text{ mm}^2$

d. Sections globales de l'attaque, du chenal et de la descente de coulée S_a , S_{sch} , S_{dc}

L'échelonnement de cette méthode est : $\sum S_a : \sum S_{sch} : \sum S_{dc} = 1 : 1,06 : 1,11$

$$\sum S_a = S_a \cdot n$$

$$\sum S_{sch} = \sum S_a \cdot 1,06$$

$$\sum S_{dc} = \sum S_a \cdot 1,11$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} S_a : \text{Section globale des attaques pour une seule pièce coulée (mm}^2\text{)} \\ S_{ch} : \text{Section du chenal (mm}^2\text{)} \\ S_{dc} : \text{Section de la descente de coulée (mm}^2\text{)} \\ n : \text{nombre d'attaques pour une seule pièce} \end{array} \right.$

$$\text{Donc : } \sum S_a = 313,75 \cdot 1 = \boxed{313,75 \text{ mm}^2}$$

$$\sum S_{ch} = \sum 313,75 \cdot 1,06 = \boxed{332,57 \text{ mm}^2}$$

$$\sum S_{dc} = \sum 313,75 \cdot 1,11 = \boxed{348,26 \text{ mm}^2}$$

e. Dimension de la descente de coulée

$$D_{\text{inf dc}} = \sqrt{\frac{4 S_{dc}}{\pi}}$$

$$D_{\text{sup dc}} = D_{\text{inf dc}} + 0,01 h_{dc}$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} D_{\text{inf dc}} : \text{Diamètre inférieure de la descente de coulée (mm)} \\ D_{\text{sup dc}} : \text{Diamètre supérieure de la descente de coulée (mm)} \end{array} \right.$

$$\text{Donc : } D_{\text{inf dc}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 348,26}{\pi}} = \boxed{21,05 \text{ mm}}$$

$$D_{\text{sup dc}} = 21,05 + 0,01 \cdot 220 = \boxed{23,25 \text{ mm}}$$

f. Dimension du chenal de coulée

$$S_{ch} = \frac{\sum S_{ch}}{n}$$

$$b_{ch} = \sqrt{\frac{S_{ch}}{1,2}}$$

$$h_{ch} = 1,2 b_{ch}$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} b_{ch} : \text{largeur du chenal (mm)} \\ h_{ch} : \text{hauteur du chenal (mm)} \end{array} \right.$

$$\text{Donc : } S_{ch} = \frac{332,57}{1} = \boxed{332,57 \text{ mm}}$$

$$b_{ch} = \sqrt{\frac{332,57}{1,2}} = \boxed{16,64 \text{ mm}}$$

$$h_{ch} = 1,2 \cdot 16,64 = \boxed{19,96 \text{ mm}}$$

g. Dimension des attaques de coulée

$$S_a = \frac{\sum S_a}{n}$$

$$h_{att} = \frac{2}{3} \delta$$

$$b_{att} = \frac{S_a}{h_{att}}$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} h_{att} : \text{hauteur de l'attaque (mm)} \\ b_{att} : \text{largeur de l'attaque (mm)} \\ \delta : \text{épaisseur de la pièce (mm)} \end{array} \right.$

$$\text{Donc : } S_a = \frac{313,75}{1} = \boxed{313,75 \text{ mm}^2}$$

$$h_{att} = \frac{2}{3} \cdot 10 = \boxed{6,66 \text{ mm}}$$

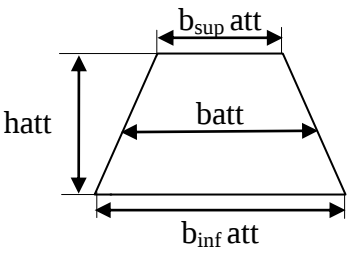
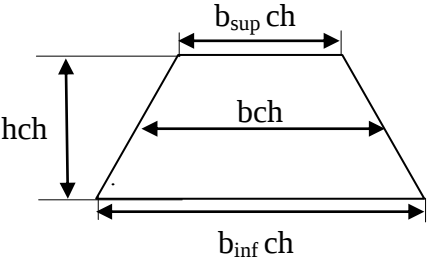
$$b_{att} = \frac{313,75}{6,66} = \boxed{47,10 \text{ mm}}$$

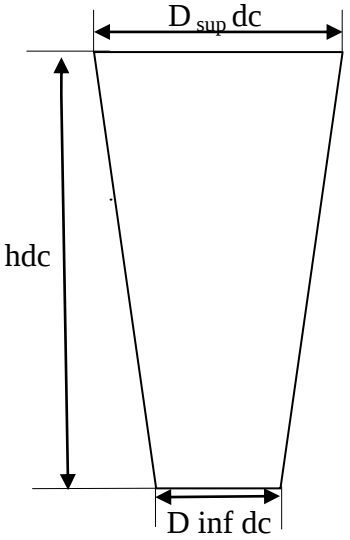
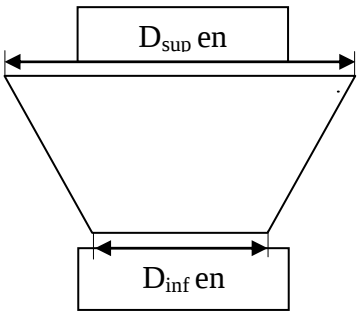
h. Dimension de l'entonnoir de coulée

$$D_{sup \text{ en}} = (2 - 3) D_{sup \text{ dc}}$$

Avec $\left\{ D_{sup \text{ en}} : \text{Diamètre supérieure de la descente de coulée (mm)} \right.$

$$\text{Donc : } D_{sup \text{ en}} = (2,5) \cdot 23,25 = \boxed{58,12 \text{ mm}}$$

$\begin{aligned} h_{att} &= 6,66 \text{ mm} \\ b_{att} &= 47,10 \text{ mm} \\ b_{inf \text{ att}} &= 46,10 \text{ mm} \\ b_{sup \text{ att}} &= 48,10 \text{ mm} \end{aligned}$	 Fig. III.21 : Attaque de coulée
$\begin{aligned} h_{ch} &= 19,96 \text{ mm} \\ b_{ch} &= 16,64 \text{ mm} \\ b_{inf \text{ ch}} &= 15,64 \text{ mm} \\ b_{sup \text{ ch}} &= 17,64 \text{ mm} \end{aligned}$	 Fig III.22 : Chenal de coulée

$D_{sup} dc = 23,25 \text{ mm}$ $hdc = 220 \text{ mm}$ $D_{inf} dc = 21,05 \text{ mm}$	 Fig III.23 : Descente de coulé
$D_{sup} en = 58,12 \text{ mm}$ $D_{inf} en = 23,25 \text{ mm}$	 Fig III.24 : Entonnoir de coulé

i. Durée de remplissage du moule

La durée de remplissage du moule est donnée par cette relation : $\tau = S\sqrt{Gpc}$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} \tau : \text{Durée de remplissage du moule (s)} \\ S : \text{Coefficient que l'on choisit en fonction de l'épaisseur des} \\ \text{parois de la pièce coulée} \end{array} \right.$

Tab. III.5 : Valeurs du coefficient S

Epaisseur des parois (mm)	2,5 - 3,5	3,5 - 8,0	8,0 – 15
S	1,68	1,85	2,2

Tant que l'épaisseur la plus prédominante de la pièce est de 10 mm, la valeur du coefficient S correspondant est de 2,2.

Donc : $\tau = 2,2 \sqrt{9,823} = 6,895 \text{ s}$

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord procédé à la conception de la pièce dans notre cas le support de couronne de frein ABS à l'aide de SolidWorks. Ensuite, nous avons effectué une simulation numérique à l'aide du logiciel ProCAST, qui permet de mieux comprendre et d'identifier les sources de défauts de fonderie. Cela nous a beaucoup aidés à corriger efficacement ces défauts, contribuant ainsi à améliorer la qualité globale des pièces moulées. De plus, le logiciel nous a permis de calculer le taux de PML qui a été réduit d'environ la moitié, passant de 13 kg à 8,93 kg, ce qui a entraîné une réduction des coûts de production

De plus, nous avons pu minimiser le taux de micro-retassures en modifiant le système de coulée et d'alimentation, malgré le manque de temps pour les éliminer complètement mais cela nous a permis de produire un support de couronne ABS sain et exempt de défauts.

chapitre IV

Matériaux et techniques expérimentales

IV.1 Introduction

Notre projet de fin de cycle consiste à étudier le système de coulée de la couronne de frein ABS fabriquée par l'entreprise SNVI de Rouïba. Outre cela, le travail a également porté sur l'optimisation du poids de métal liquide (PML) et du traitement de ferritisation de la fonte à graphite sphéroïdal dans l'objectif d'améliorer les propriétés mécaniques. Le chapitre en question est donc dédié à la présentation des méthodes et techniques expérimentales mises en œuvre pour caractériser le support de couronne ABS. Il décrit également les techniques utilisées pour l'optimisation du traitement de ferritisation des couronnes de frein en fonte FGS 38-15.

IV.2 Type du matériau de la pièce étudiée

La fonte grise à graphite sphéroïdal GS 38-15 est le matériau privilégié pour la fabrication des supports de couronne ABS (**Fig IV.1**).



Fig IV.1 : Pièces des supports de couronne ABS

Ce type de fonte se caractérise par une structure constituée de sphéroïdes ou nodules de graphite, ce qui confère à la fois une usinabilité améliorée et une résistance accrue aux contraintes mécaniques telles que la traction, la fatigue, la compression et la flexion. De plus, elle présente une capacité à absorber les chocs.

IV.3 Quelques Caractéristiques du matériau de la pièce étudié

Le tableau **IV.1** illustre les principales caractéristiques des fontes grises à graphite sphéroïdal FGS 38-15 après élaboration.

Tab IV.1 : Les principales caractéristiques de fonte FGS 38-15

Caractéristiques	Rm (Mpa)	A %	KCU (J/cm ²)	Dureté (HV)	Phase	T.TH
Données	≥ 400	≥ 15	≥ 15	145 - 190	Ferrite Perlite ≤ 15% Cémentite ≤ 2%	Ferritisation

IV.4 Caractérisation de la fonte FGS 38-15

Afin de caractériser le matériau de la couronne de frein faisant l'objet de notre étude, nous avons prélevé des échantillons sur des pièces fabriquées avec le système de coulée et d'alimentation initialement employé par la SNVI.

IV.4.1.1 Analyse chimique

Des analyses chimiques ont été réalisées au niveau des laboratoires de la SNVI à l'aide de deux appareils différents : l'un pour détecter les teneurs des éléments chimiques (C, Si, Mn, Mg, Cu) (**Fig IV.2**), et l'autre pour détecter les teneurs en carbone et en soufre (**Fig IV.3**).

Pour fabriquer les supports de couronnes de frein ABS à la SNVI, les ingénieurs se basent sur les normes et spécifications techniques précisant la composition chimique de ces pièces (**Tab IV.2**).

Tab IV.2 : Les teneurs en éléments constituant la fonte FGS 38-15

Eléments	C	Si	Mn	S	P	Mg	Cu
Teneurs (%)	3,50 – 4	2,5 – 3	< 0.30	< 0,02	< 0,06	< 0,06	< 0,20



Fig IV.2 : Image de l'analyseur spectrométrique Fig IV.3 : Analyseur de soufre et de carbone de type Leco

IV.4.1.2 Traitement thermique

Afin d'optimiser le taux de perlite dans la structure finale du support de couronne fabriquée par la SNVI et par conséquent optimiser les caractéristiques mécaniques, nous avons réalisé différents régimes de traitements thermiques de ferritisation.

Ces traitements thermiques ont été effectués sur 7 échantillons dans le laboratoire de notre Ecole ENSTI Ex ENSMM en utilisant un four à chambre de type NABERTHERM (**Fig IV.4**). Les cycles de ces traitements sont présentés dans le tableau (**Tab IV.3**):



Fig IV.4 : Four de chauffage de type NABERTHERM

Tab IV.3 : Les régimes de traitement thermique de ferritisation proposés

Echantillon	Conditions de traitement			
	Température de chauffage (°C)	Temps de maintien (h)	Temps de refroidissement au four (h)	Refroidissement à l'air libre
1	800	1	2	✓
2	850	1	2	✓
3	900	1	2	✓
4	950	1	2	✓
5	950	0,5	2	✓
6	950	1	2	✓
7	950	1,5	2	✓

IV.4.1.3 Etude des propriétés

IV.4.1.3.1 Préparation d'échantillons

La fonderie de Rouïba utilise une scie mécanique de type MOMAC (**Fig IV.5**) pour découper les échantillons aux dimensions de 50 x 10 x 30 mm.



Fig IV.5 : Image de la scie mécanique de la SNVI

Une fois la pièce découpée, l'échantillon subi une préparation de surface, il est donc poli avec du papier abrasif de différentes granulométries (200, 400, 600, 1200 ppm) sous un jet d'eau (**Fig IV.6**). La dernière étape est l'étape de finition qui se fait avec une pâte diamantée.



Fig IV.6 : Polissage avec du papier abrasif

Enfin, l'échantillon est attaqué chimiquement au Nital à 4% (un mélange d'alcool éthylique $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ à 95% et d'acide nitrique HNO_3 à 5%), cela permet de mieux visualiser la microstructure de la pièce.

IV.4.1.3.2 Observation métallographique

L'observation métallographique de l'échantillon préparé s'est faite à l'aide du microscope optique de type OPTIKA (**Fig IV.7**) de la SNVI. Cependant, les échantillons traités thermiquement au laboratoire ont été analysés et observés à l'aide du microscope de l'ENSTI de type Nikon. Cette étape permet de révéler la structure tout en quantifiant le taux de perlite, la forme et dimensions du graphite dans la matrice et l'identification des éventuels défauts dus à l'élaboration.



Fig IV.7 : Microscopie optique de type OPTIKA

IV.4.1.3.3 Essai de dureté

Cet essai est réalisé au sein du laboratoire de l'entreprise ETRAG à l'aide du duromètre de type Zwick/Roell (**Fig IV.8**). Nous avons effectué l'essai de dureté Vickers avec une charge de 187,5 kgf.



Fig IV.8 : Duromètre de type Zwick/Roell

IV.4.1.3.4 Essai de micro-dureté

Afin d'évaluer les propriétés mécaniques de la fonte FGS 38-15 à l'échelle microscopique, nous avons réalisé l'essai de micro-dureté Vickers en appliquant une charge de 300 gf au laboratoire de la SNVI à l'aide d'un duromètre de type Zwick/Roell (**Fig IV.9**).



Fig IV.9 : Micro-duromètre de type Zwick/Roell

IV.4.1.3.5 Essai de traction

En soumettant une éprouvette de fonte GS 38-15 à une force de traction progressive jusqu'à sa rupture, nous mesurons simultanément la valeur de la résistance mécanique, la limite d'élasticité et l'allongement à l'aide de la machine de traction de la SNVI et de type SHIMADZ (Fig IV.10).



Fig IV.10 : Machine de traction de type SHIMADZ

chapitre V

Interprétation des résultats

V.1 Introduction

Dans le but d'améliorer les caractéristiques mécaniques et technologiques du support de couronne ABS, différentes conditions de traitement thermique de ferritisation ont été proposées afin de déterminer le traitement optimal. Dans ce chapitre, nous interprétons et discutons des résultats obtenus à partir des analyses et des essais réalisés sur des échantillons et des éprouvettes en fonte GS 38-15 utilisée pour fabriquer les supports de couronne ABS, afin de déterminer les effets de ces traitements sur les propriétés du matériau. Ces essais et analyses ont été effectués aux laboratoires de la SNVI et ceux de notre école.

V.2 Résultats des analyses et essais réalisés

V.2.1 Analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique réalisée sur des échantillons de support de couronne en fonte à graphite sphéroïdal GS 38-15 sont présentés dans le tableau ci-dessous (**Tab V.1**) :

Tab V.1 : Composition chimique de la fonte GS 38-15

Eléments	C	Si	Mn	S	P	Mg	Cu
Teneurs (%)	3,77	2,683	0,198	0,0074	0,028	0,027	0,054

Nous remarquons que ces teneurs sont proches des valeurs exigées par les spécifications techniques de la SNVI et qui sont présentées dans le tableau (**Tab. IV.2**). Ceci nous confirme bien que la couronne de frein ABS fabriquée et coulée en fonte à graphite sphéroïdal est conforme du point de vue analyse chimique.

V.2.2 Observation métallographique

Les résultats des analyses microstructurales des échantillons de fonte GS 38-15 utilisés pour la fabrication du support de couronne ABS, avant et après le traitement thermique de ferritisation, sont illustrés dans les figures ci-dessous.

Échantillon (0) : Il s'agit de l'échantillon brut qui n'a pas subi de traitement thermique.

Échantillons (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) : Ce sont les échantillons ferritisés selon les conditions proposées.

Échantillon (8) : Il s'agit de l'échantillon ferritisé selon les conditions de l'entreprise SNVI.

Tab V.2 : L'état des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8

Echantillon	Etat
0	Brut
1	Traité à 800°C – 1h
2	Traité à 850°C - 1h
3	Traité à 900°C – 1h
4	Traité à 950°C – 1h
5	Traité à 950°C – 30min
6	Traité à 950°C – 1h
7	Traité à 950°C- 1h30
8	Traité à 900°C – 2h

V.2.2.1 Analyse de la microstructure de l'échantillon 0 (non traité thermiquement)

L'échantillon (0) a été prélevé d'un support de couronne brut de coulée et non ferritisé. Cet échantillon sera considéré comme l'état de référence, sa microstructure à l'état non attaqué révèle la présence de nodules de graphite sphériques uniformément dispersés dans la matrice métallique, avec une taille moyenne de 3 mm à 6 mm. À cet état, seule la sphéroïdisation du graphite est révélée (**Fig V.1**).

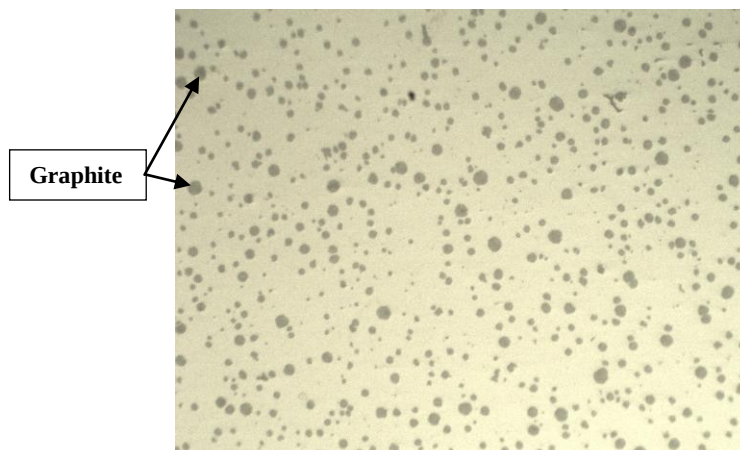


Fig V.1 : Microstructure de l'échantillon (0) non traité thermiquement non attaqué (x100)

La figure (**Fig V.2**) illustre la microstructure de l'échantillon qui n'a pas subi de traitement thermique après une attaque chimique.

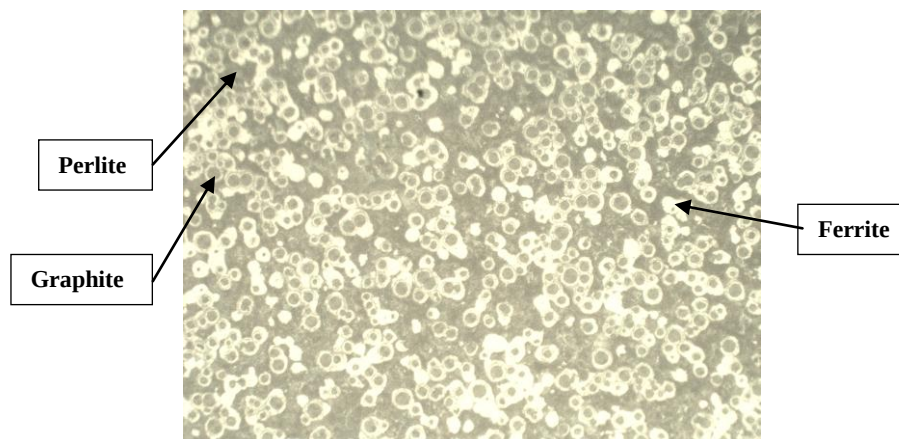


Fig V.2 : Microstructure de l'échantillon (0) non traité thermiquement attaqué (x100)

Après attaque chimique au Nital à 4%, l'observation de la microstructure révèle que la matrice métallique de la fonte est constituée de perlite, avec une proportion limitée de ferrite entourant les nodules de graphite. Des joints de grains sont également observables. Il est important de noter que la présence de perlite accroît la dureté et réduit l'allongement, rendant ainsi le matériau un peu plus fragile.

V.2.2.2 Analyse de la microstructure de l'échantillon 8 (traité thermiquement)

La figure (Fig V.3) présente la structure métallographique de l'échantillon soumis à une ferritisation selon les conditions appliquées à la SNVI (Traité à 900°C pendant 2h00) après attaque chimique.

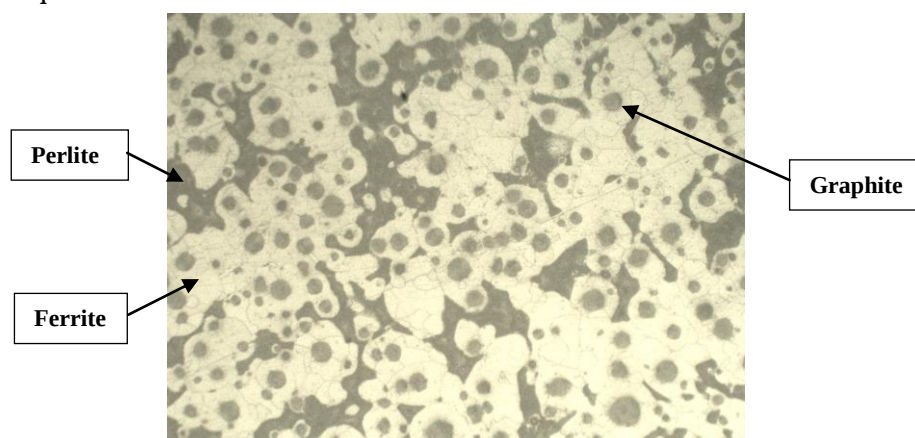


Fig V.3 : Microstructure de l'échantillon (8) traité thermiquement attaqué (x100)

On peut constater une diminution notable de la teneur en perlite après le traitement thermique de ferritisation à 900°C et par conséquent une augmentation de la teneur en ferrite, ce qui pourrait améliorer l'allongement, la résilience et l'usinabilité de la pièce (Fig V.3).

V.2.2.3 Analyse de la microstructure des échantillons 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 (traités thermiquement)

Les figures ci-dessous représentent les résultats d'observation pour chaque échantillon ayant subi une ferritisation dans des conditions différentes (température de chauffage, durée du maintien) après une attaque chimique.

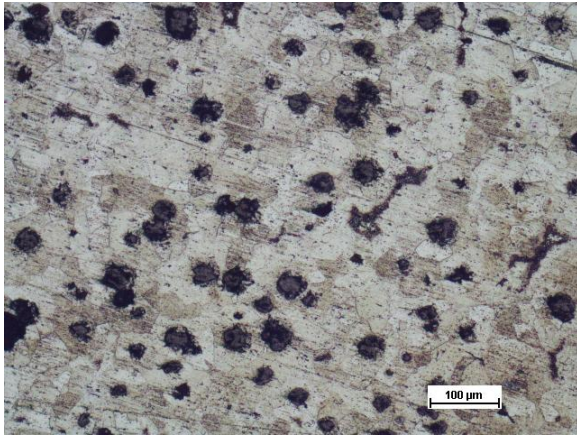


Fig V.5 : Microstructure de l'échantillon 1 traité thermiquement attaqué (x100)

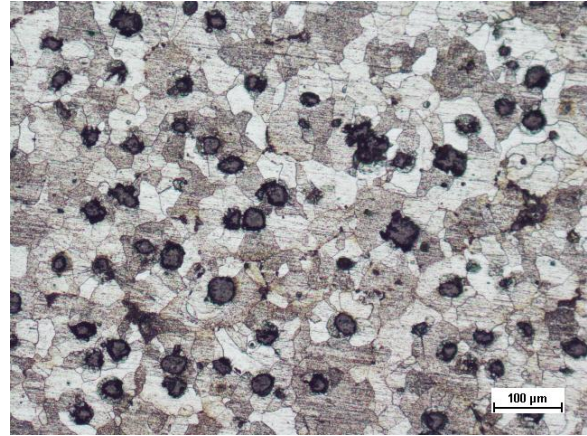


Fig V.4 : Microstructure de l'échantillon 2 traité thermiquement attaqué (x100)

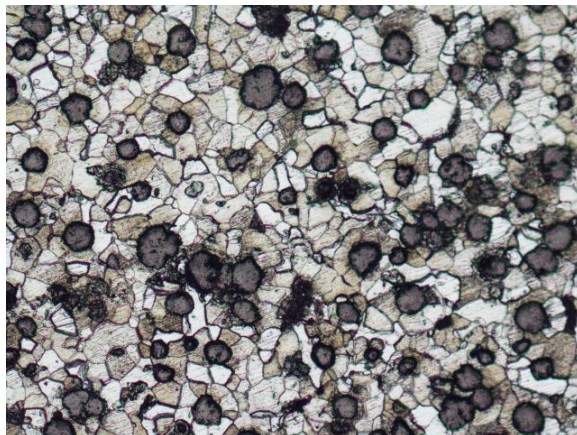


Fig V.7 : Microstructure de l'échantillon 3 traité thermiquement attaqué (x100)

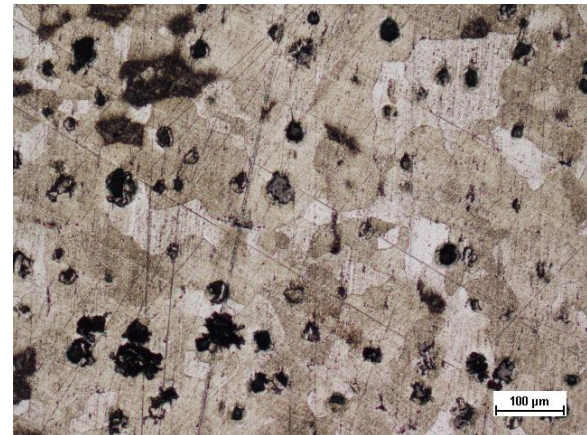


Fig V.6 : Microstructure de l'échantillon 4 traité thermiquement attaqué (x100)

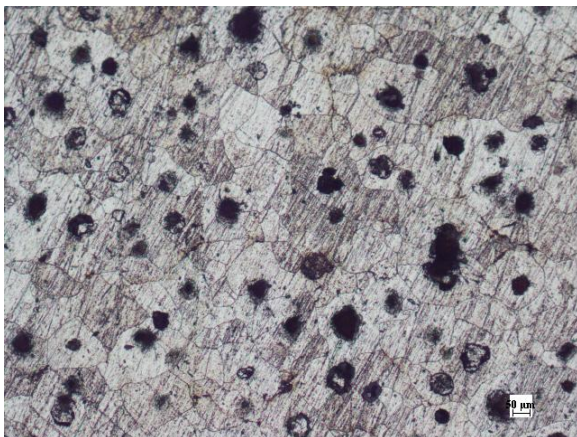


Fig V.9 : Microstructure de l'échantillon 5 traité thermiquement attaqué (x100)

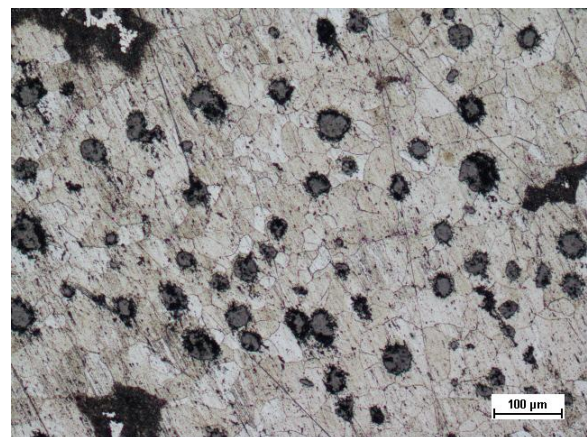


Fig V.8 : Microstructure de l'échantillon 6 traité thermiquement attaqué (x100)

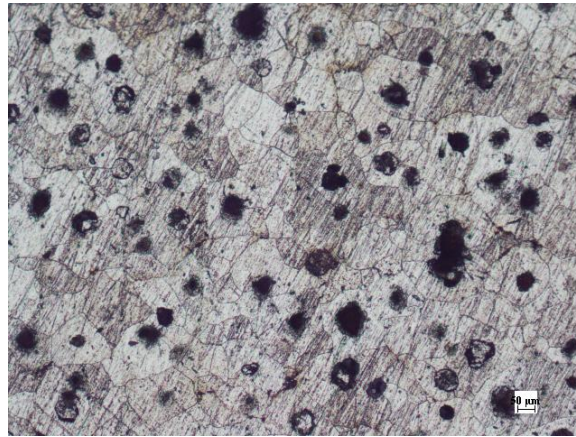


Fig V.10 : Microstructure de l'échantillon 7 traité thermiquement attaqué (x100)

Les valeurs des taux de ferrite déduites des microstructures types utilisées par le laboratoire de la SNVI sont regroupées dans le tableau (**Tab V.2**)

Tab V.3 : Taux de ferrite dans les différentes microstructures

Echantillon	Taux de ferrite (%)
0	~ 30
1	~ 90
2	≥ 97
3	≥ 97
4	≥ 97
5	≥ 97
6	≥ 97
7	≥ 97
8	~ 75

V.2.3 Discussion des résultats obtenus

V.2.3.1 Influence de la température de chauffage sur la microstructure des échantillons 1, 2, 3 et 4

Les figures (**Fig V.4**, **Fig V.5**, **Fig V.6**, **Fig V.7**) illustrent les microstructures des échantillons 1, 2, 3 et 4 préalablement soumis à une ferritisation à des températures variables (800°C, 850°C, 900°C et 950°C), tout en maintenant une durée de maintien dans le four de (1h). On peut observer que la microstructure de l'échantillon 1 (**Fig V.4**) présente un taux de ferrite de ~ 90% après avoir été chauffé jusqu'à 800°C, tandis que la microstructure de l'échantillon 2 (**Fig V.5**) présente un taux de ferrite de $\geq 97\%$ après avoir été chauffé jusqu'à 850°C. De plus, les échantillons 3 et 4 chauffés à des températures supérieures à 850°C (900°C, 950°C) n'ont pas subi de modification notable de microstructure (**Fig V.6**, **Fig V.7**)

même si un début de dégradation des nodules de graphite est observé. Cependant le taux de ferrite de ces deux échantillons reste $\geq 97\%$.

On retient donc qu'au-delà de la température de 850°C, le taux de ferrite demeure constant, sans subir de modification, et reste $\geq 97\%$.

V.2.3.2 Influence du temps de maintien sur la microstructure des échantillons 5,6 et 7

Les figures (**Fig V.8, Fig V.9, Fig V.10**) illustrent la microstructure des échantillons 5, 6 et 7 qui ont été ferritisés à 950°C pendant des durées de maintien variables de (30min, 1h et 1h30min). On note qu'avec l'augmentation du temps de maintien, il y a diminution de la taille des nodules de graphite. Ceci s'explique par la rupture des liaisons C-C et la libération des atomes de carbone qui créent les conditions favorables pour la reformation de la cémentite. Les échantillons 5 et 6 présentent un pourcentage de ferrite similaire à celui des échantillons 2, 3 et 4. De plus, la microstructure de l'échantillon 7 révèle la présence de grains plus grossiers (**Fig V.10**) par rapport à celle des échantillons 2, 3, 4, 5 et 6.

Par conséquent, on peut conclure que l'augmentation de la durée de maintien entraîne un grossissement des grains plutôt que des modifications de proportion des phases.

V.2.3.3 Comparaison entre l'échantillon traité à la SNVI et l'échantillon (2)

Les figures (**Fig V.3, Fig V.5**) montrent la microstructure des échantillons ferritisés, l'un a été chauffé à 900°C avec un temps de maintien de 2 heures (conditions utilisées par la SNVI), tandis que l'autre a été chauffé à 850°C avec un temps de maintien de 1 heure (régime optimal).

On peut remarquer que la microstructure de l'échantillon 5 (**Fig V.8**) dont le traitement a été réalisé au laboratoire de l'Ecole présente un pourcentage de phase ferritique supérieur à celui observé dans la microstructure de l'échantillon 3 ferritisé à la SNVI (**Fig V.6**).

V.2.4 Essai de dureté

Les résultats obtenus après la réalisation de l'essai de dureté sont présentés dans la figure suivant (**Fig V.11**) :

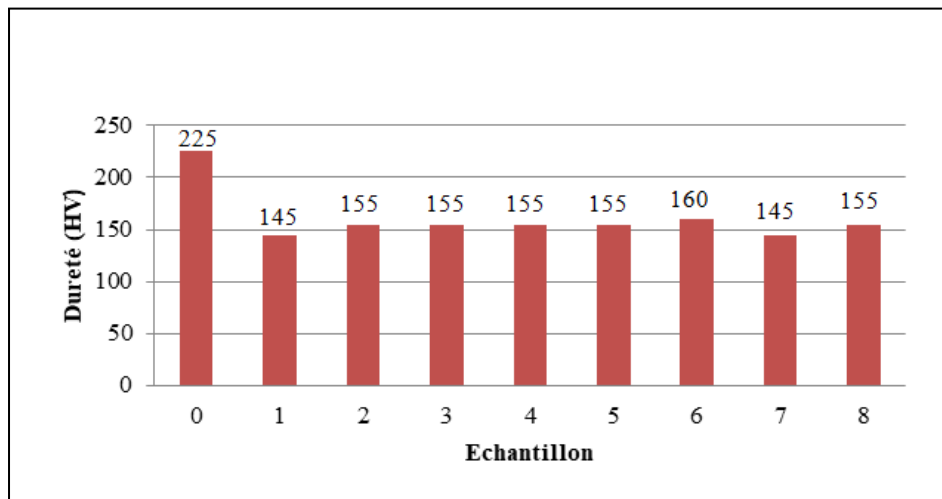


Fig V.11 : Variations de la dureté (HV) des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8

Les mesures de dureté effectuées après les traitements présentent une plage allant de 145 à 160 HV. Cependant, les exigences de la norme spécifient une plage de dureté légèrement plus élevée, allant de 145 à 190 HV, avec une valeur moyenne de 167 HV. Cette légère diminution de la dureté observée peut être attribuée à la présence de défauts de fabrication tels que des micro-retassures, les soufflures et relaxation des contraintes dus au refroidissement rapide lors du moulage des échantillons en fonte GS 38-15.

V.2.4.1 Influence de la température de chauffage sur la dureté des échantillons 1, 2, 3 et 4

La figure (**Fig. V.11**) illustre la variation de la valeur de dureté des échantillons 1, 2, 3 et 4 qui ont subi une ferritisation à différentes températures croissantes respectivement (800°C, 850°C, 900°C et 950°C) pendant une durée de maintien constante de 1h00. On peut observer une augmentation de la valeur de dureté entre l'échantillon 1 et 2, passant de 145 HV à 155 HV. Cette valeur de dureté 155 HV demeure constante pour les échantillons (3) et (4), malgré l'augmentation de la température. Ainsi, on peut conclure que l'augmentation de la température au-delà de 850°C n'affecte pas la valeur de dureté, qui reste stable à 155 HV.

L'explication la plus plausible est la suivante : l'évolution de la dureté est le résultat de deux phénomènes contradictoires :

- ✓ Désintégration des nodules de Graphite à partir de la surface et reformation de la cémentite et par conséquent un durcissement de la matrice ferritique.
- ✓ Grossissement du grain ferritique d'où diminution de la dureté.

V.2.4.2 Influence du temps de maintien sur la dureté des échantillons 5,6 et 7

On constate que la valeur de la dureté des échantillons (4) et (5) reste constante à 155 HV. En revanche, la dureté de l'échantillon (6) a augmenté, passant de 155 HV à 160 HV, comme le montre la figure (**Fig. V.11**). Par ailleurs, malgré l'évolution du temps de maintien, la dureté l'échantillon (7) a diminué jusqu'à 145 HV. Cependant, lorsqu'on augmente le temps de maintien, la dureté diminue. Ceci est probablement dû au grossissement ferritique, qui se traduit par une diminution des caractéristiques de résistance.

V.2.4.3 Comparaison entre l'échantillon traité à la SNVI et l'échantillon (2)

Les deux échantillons atteignent la même valeur de dureté de 155 HV, mais le cycle de traitement de l'échantillon 2 est plus économique du point de vue de la consommation d'énergie comparé à celui de l'échantillon (2) traité selon le régime de la SNVI.

V.2.5 Essai de micro dureté

Nous avons effectué un essai de micro dureté en utilisant une charge de 300 g. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous (**Fig V.12**) :

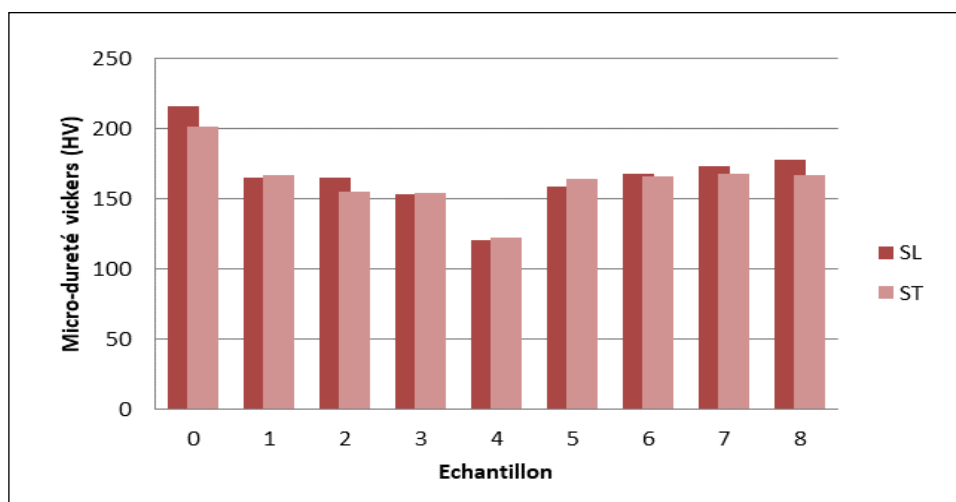


Fig V.12 : Variations de la micro dureté (HV) des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8

La figure (**Fig. V.12**) présente les histogrammes illustrant les variations de la micro-dureté HV en fonction de l'état des différents échantillons. On peut observer que la micro-dureté de l'échantillon à l'état brut était initialement de 216 HV en sens longitudinal et 201 HV en sens transversal. Après le traitement de ferritisation (effectué à la SNVI), la valeur de dureté diminue significativement pour atteindre 178 HV en sens longitudinal et 167 HV échantillon

(8), en raison de la réduction du taux de perlite. Les valeurs s dans le sens longitudinal et transversal n'accusent pas de différence sensible, ce qui signifie l'absence d'anisotropie des propriétés.

V.2.5.1 Influence de la température de chauffage sur la micro dureté des échantillons 1, 2, 3 et 4

En examinant l'histogramme de la figure (**Fig. V.12**), on peut clairement observer que la valeur de dureté des échantillons 1, 2, 3 et 4 diminue de manière proportionnelle avec l'augmentation de la température. Ces échantillons ont subi un traitement à des températures croissantes allant de 800 à 950°C, avec un temps de maintien constant (1h).

V.2.5.2 Influence de la température de chauffage sur la micro dureté des échantillons 5,6 et 7

Pour les échantillons 5, 6 et 7 traités à 950°C, avec des temps de maintien croissants (30 min, 1 h et 1h30min), la micro-dureté n'accuse pas des changements sensibles.

V.2.5.3 Comparaison entre l'échantillon traité à la SNVI et l'échantillon (2)

Selon la figure (**Fig. V.12**), on peut déduire que la valeur de micro-dureté de l'échantillon (8), traité selon la méthode SNVI, est de 178 HV dans le sens transversal et de 167 HV dans le sens longitudinal, ce qui est supérieur à celle de l'échantillon (2) ferritisé au laboratoire de l'Ecole qui est de 165 HV dans le sens transversal et de 155 HV dans le sens longitudinal. Toutefois, il est important de noter que la valeur de micro-dureté de l'échantillon (2) est meilleure que celle de l'échantillon (8) car le traitement de ferritisation vise à réduire le taux de perlite, ce qui entraîne une diminution de la dureté du matériau.

V.2.6 Essai de traction

Nous avons réalisé nos essais de traction au sein du laboratoire de la SNVI, les résultats sont présentés ci-dessous (**Fig V.13**) :

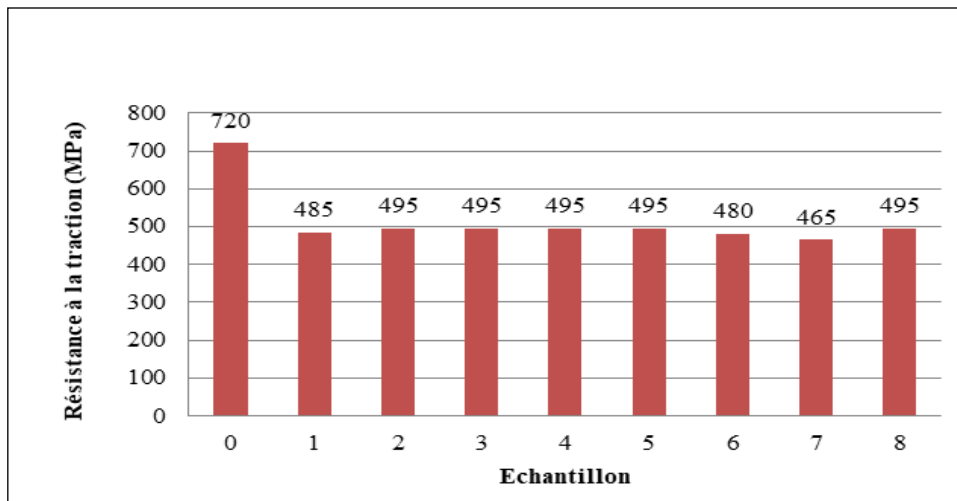


Fig V.13 : Variations de la Résistance à la traction des échantillons 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8

À partir de l'histogramme illustré ci-dessus (**Fig. V.13**), on peut observer que la résistance à la traction de l'échantillon (0) avant traitement était de 720 MPa. Après le traitement réalisé à la SNVI, la valeur de la résistance diminue jusqu'à atteindre 495 MPa, correspondant à l'échantillon (8). On retient que l'évolution des valeurs de R_m obéissent aux mêmes lois de la dureté.

Il convient de souligner que les valeurs de résistance à la traction " R_m " respectent les spécifications de la norme, qui exigent une $R_m \geq 400$ (MPa).

V.2.7 Caractérisation mécanique de la fonte GS 38-15

En raison du manque de ressources à la fois au sein de l'entreprise SNVI et de nos laboratoires à l'école, il est pratiquement impossible de déterminer expérimentalement ces valeurs cruciales pour l'exploitation de notre pièce. Cependant, en utilisant ces données théoriques, nous avons la possibilité de calculer ces valeurs afin de mieux comprendre le comportement du support de couronne ABS.

- Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% = (0,8 - 0,9) R_m
- Résistance à la compression = (2,5 - 4) R_m
- Limite de fatigue (flexion rotative) = (0,3 - 0,5) R_m
- Résistance aux chocs augmente avec R_m

Tab V.4 : Caractéristiques mécaniques de la fonte GS 38-15

Caractéristiques mécaniques des fontes	Propriété de la fonte grise GGG50
Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2%	396- 445,5

Résistance à la compression	1237,5 -1980
Limite de fatigue	148,5 -247,5
Résistance aux chocs	Proportionnelle à Rm

Grâce à l'application du traitement de ferritisation, il a été constaté une amélioration de la résistance à la traction. Cette amélioration pourrait s'étendre à d'autres caractéristiques telles que la résistance à la flexion, la résistance à la fatigue, etc., qui sont des caractéristiques essentielles pour l'utilisation du support de couronne ABS dans des conditions d'exploitation.

V.2.8 Conclusion

En conclusion, le cycle de traitement thermique le plus approprié pour une ferritisation optimale assurant un taux élevé de ferrite et un faible taux de perlite est proposé. Il consiste à la réalisation d'un chauffage à 850°C pendant une heure suivie d'un refroidissement lent au four pendant 2 heures puis d'un refroidissement à l'air libre. Ce traitement aboutit à une structure non fragilisée à grains fins, ce qui améliore les propriétés mécaniques, notamment la ductilité, la résistance mécanique obtenue à partir d'une valeur de dureté optimale qui atteint 155 HV. Cette dernière est conforme aux exigences de la norme spécifiant une plage de dureté allant de 145 à 190 HV, et une micro-dureté atteignant une valeur de 175 HV, avec une résistance Rm de 495 MPa conforme aussi aux spécifications de la norme, qui exigent une valeur de Rm supérieure ou égale à 400 MPa.

Cela permet d'atteindre les mêmes propriétés mécaniques que ceux obtenus du cycle de traitement effectué à la SNVI qui consiste en un chauffage à 900°C pendant 2 heures de maintien suivi d'un refroidissement lent au four pendant 2 heures 30 min puis d'un refroidissement à l'air libre. En appliquant ce nouveau traitement de ferritisation nous économiserons de l'énergie, du temps et des coûts des traitements de ferritisation, ce qui a un impact réel sur le prix de revient des supports de couronne de frein ABS fabriquées à partir de la nuance FGS 38-15.

Conclusion générale

A l'issue de ce travail, notre projet de fin d'études qui a pour intitulé "Étude et conception du système de coulée d'un support de couronne ABS de frein en fonte GS 38-15 de l'entreprise SNVI – Rouiba et optimisation du taux de PML par simulation à l'aide du logiciel PROCAST" nous a permis à travers une étude théorique et expérimentale approfondie de retenir ce qui suit :

- ✓ Utilisation du logiciel SolidWorks pour reproduire la forme et les dimensions de la pièce,
- ✓ Détection des défauts de coulée de la pièce grâce au logiciel ProCAST,
- ✓ Calcul des paramètres de coulée tels que la température de coulée, la vitesse d'écoulement du métal, le temps et la température de solidification,
- ✓ Calcul et conception du système de coulée et d'alimentation,
- ✓ Optimisation du taux de PML par l'introduction d'un événement, en modifiant la forme du canal, en réduisant le nombre de masselottes et d'attaques afin d'éliminer les défauts de retassures.
- ✓ Optimisation du traitement de ferritisation afin de minimiser les coûts de l'opération de fabrication grâce à des essais de traction, de dureté et des analyses métallographiques.

L'application de toutes ces mesures donnera des résultats pratiques effectifs qui montrera l'efficacité des logiciels utilisés dans ce travail pour l'obtention d'une couronne de frein ABS exempte de défaut et économiquement viable.

Bibliographie

[1] : Cuenin, P. (1997). Outillages de fonderie. Techniques De L'Ingénieur. Récupéré de <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/fonderies-et-moulages-aspects-generaux-42352210/outillages-de-fonderie-m3535/>

[2] : Principaux secteurs et processus. (s.d.). Récupéré de <https://www.iloencyclopaedia.org/fr/part-x-96841/paper-and-pulp-industry/major-sectors-and-processes?start=570570>

[3] : Fours de fusion | RIFIMPRESS. (s.d.). Récupéré de <http://www.rifimpress.it/fr/production/fours-de-fusion/>

[4] : Cuénin, P. (1997). Contrôle. Qualité. Techniques De L'Ingénieur. Récupéré de <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/fonderies-et-moulages-aspects-generaux-42352210/controle-qualite-m3530/>

[5] : Yilanmu. (2022). Moulage en sable : tout ce que vous devez savoir. Dawang Casting Steel Castings. Récupéré de <https://dawangcasting.com/fr/blog/sand-mold-casting/>

[6] : Iamtheadmin. (2022). Qu'est-ce que le sable moulé ? Quel est l'avantage supplémentaire de l'impression 3D ? Beamler. Récupéré de <https://www.beamler.com/fr/quest-ce-que-le-sable-moule-quel-est-lavantage-supplementaire-de-limpression-3d/>

[7] : Chapitre 82 - La transformation et le travail des métaux. (n.d.). <https://www.ilocis.org/fr/documents/ilo082.htm>

[8] : Paprec. (n.d.). <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/ferrailles-et-metaux/la-classification-des-differents-types-de-metal/>

[9] : Les fontes grises. (n.d.). Techniques De L'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/les-fontes-tba1064/les-fontes-grises-sl10062123.html>

[10] : Misnikov, E. (2023). Guide de sélection des matériaux pour l'impression 3D. Xometry Europe. <https://xometry.eu/fr/guide-de-selection-des-materiaux-pour-limprimerie-3d/https://metalblog.ctif.com/2021/03/01/les-fontes-a-graphite-lamellaire-et-spheroidal/>

[11] : Carmel. (2019). SolidWorks : Logiciel de modélisation 3D par conception paramétrique. Sculpteo. <https://www.sculpteo.com/fr/glossaire/solidworks-definition-fr/>

[12] : Les fontes grises. (n.d.-b). Techniques De L'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/les-fontes-tba1064/les-fontes-grises-sl10062123.html>

[13] : Conceptek. (s.d.). Les fontes. Récupéré de <https://conceptek.net/fr/techniques-de-base/matériaux/metaux/les-fontes>

[14] : Regheere, G. (2022, November 10). La fonte GS et ses caractéristiques - MetalBlog. MetalBlog. <https://metalblog.ctif.com/2021/03/15/la-fonte-gs-et-ses-caracteristiques/>

[15] : Nicoli, C. (2019). Étude et optimisation de la solidification d'aciers faiblement alliés lors du process de fonderie par inoculation (Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers).

[16] : Landolsi, M. W. (n.d.). Diagramme Fer-Cémentite (Fe-Fe₃C) - ConcepTEK.net. <https://conceptek.net/fr/techniques-de-base/matériaux/metaux/diagramme-fer-cementite-fe-fe3c?showall=1>

[17]: Jones, L. (2019). 29136873-Effects-of-Minor-and-Trace-Elements-in-Cast-Iron - Copy. studylib.net. <https://studylib.net/doc/25248124/29136873-effects-of-minor-and-trace-elements-in-cast-iron>.

[18] : Le Breton, H. (1966). Manuel pratique du fondeur de fonte. Manuels pratiques Dunod.

[19] : Vaucheret, A. (2012). Étude du vieillissement des fontes à graphite lamellaire en vue de l'amélioration de leur usinabilité [Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers].

[20] : Hammami, S. (2014). Traitements thermiques des aciers F. TRAITEMENTS THERMIQUES ET TREMPABILITÉ DES ACIERS. academia.edu. https://academia.edu/7080976/Traitements_thermiques_des_aciers_F_TRAITEMENTS_THERMIQUES_ET_TREMPABILIT%C3%89_DES_ACIERS?fbclid=IwAR34InDIb9hZWjSZVreECpnNZ9s_X7Baom5NEvujdh2nAA2I3bsuIrBcdhc

[21]: Bougheraf, Y., & Soualhi, M. E. A. (2014). Comparaison entre deux fontes grises sphéroïdales GSC (FGS 38-15) et GSA (FGS 56-5) de point de vue : composition chimique, structure, et caractéristiques mécaniques (Mémoire de fin d'étude). Université Dr. Yahia Fares de Medea.

[22] : Dierickx, P. (1996). Étude de la microstructure et des mécanismes d'endommagement de fontes GS ductiles. Influence des traitements thermiques de ferritisation (Thèse de doctorat, Génie des matériaux). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

[23] : D'ingénierie, D. (2023, February 20). Fillet Vs Chamfer: What's The Difference? - LEADRP - Rapid Prototyping And Manufacturing Service. LEADRP - Rapid Prototyping and Manufacturing Service. <https://leadrp.net/fr/blog/fillet-vs-chamfer-whats-the-difference/>

[24] : Valmous, T. (2023). Les différents logiciels de modélisation 3D. My3D. <https://my3d.fr/les-differents-logiciels-de-modelisation-3d/>

[25] : Volet de définition - 2021 - Aide de SOLIDWORKS. (n.d.). https://help.solidworks.com/2021/french/SolidWorks/sldworks/c_management_panel.htm

[26] : Les procédés de moulage. (n.d.). http://k.dejoye.free.fr/les_procedes.html

[27] : Processus de fonderie | Fonderie Loiselet. (n.d.). <https://www.loiselet.com/fr/activites-industrielles/processus-de-fonderie>

[28] : Clal, J.-. C. (n.d.). Fusion et Solidification des alliages de bijouterie – L'atelier – Le blog des créateurs de bijoux Cookson CLAL. <https://www.cookson-clal.com/le-blog/fusion-et-solidification-du-metal/>

[29] : Fumbarri. (2013, May 21). ÉVITER L'APPARITION DE RETASSURES SUR FONTE À GRAPHITE SPHÉROÏDAL. Fumbarri Durango. <https://fumbarri.wordpress.com/2013/01/15/manuel-de-recommandations-pour-eviter-lapparition-de-retassures-sur-les-pieces-en-fonte-a-graphite-spheroidal/>

[30] : <http://souspression.canalblog.com/archives/2009/05/18/13741461.html>

[31] : ALUWELD: Techniques de soudage des alliages d'aluminium – Soudage hybride arc/laser et Soudage par friction malaxage | Institut Belge de la Soudure asbl. (n.d.). <https://bil-ibs.be/fr/project/aluweld-techniques-de-soudage-des-alliages-daluminium-soudage-hybride-arclaser-et-soudage>

- [32] : Rédaction. (2022, December 1). La fonte. Bricoleur Du Dimanche. <https://www.bricoleurdudimanche.com/fonte>
- [33] : Contrôle qualité fonte | PRESI Metallographie. (2023, June 28). Presi. <https://www.presi.com/controle-qualite-fonte/>
- [34] : Regheere, G. (2020b, March 22). Les fontes dans le diagramme fer carbone - MetalBlog. MetalBlog. <https://metalblog.ctif.com/2020/02/17/les-mecanismes-de-solidification-des-fontes/>
- [35] : Les fontes blanches. (n.d.-b). Techniques De L'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/les-fontes-tba1064/les-fontes-blanches-sl10062114.html>
- [36] : Rocardier. (2020). Les alliages binaires et diagramme fer carbone. Rocard@Cier. <https://www.rockdacier.com/les-alliages-binaires-et-diagramme-fer-carbone/>
- [37] : ConcepTEK.net. (n.d.). Les fontes : métal ferreux de coulée pour objets moulés - ConcepTEK.net. <https://conceptek.net/fr/techniques-de-base/matériaux/metaux/les-fontes>
- [38] : <https://www.codital.com/informations-techniques/fonte-malleable-a-coeur-blanc>