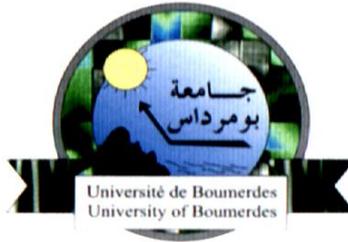


**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



Faculté de technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

**Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Génie des Matériaux**

THEME

**Conception, Modélisation et Réalisation d'un Collecteur
d'Echappement pour Citroën C3 en Fonte Graphite
Sphéroïdal**

Présenté par :

Promotrice : Dr. Fadila GUERRACHE

 **Hicham BOUDIAF**

Encadreur : Mr. Lounis OUGERGOUZ

 **Hichem LEGRINI**

Promotion 2023- 2024

Remerciement

Aucun travail de recherche ne se réalise entièrement par une seule personne. A ce titre, nous exprimons d'abord notre gratitude envers Dieu tout puissant pour nous avoir donné la volonté, le courage et la force nécessaires à l'achèvement de ce travail.

Nous adressons nos remerciements particuliers à notre promotrice, **Dr. Fadila GUERRACHE**, enseignante à l'université M'Hamed BOUGARA de Boumerdes, FT-Umbb, pour son encadrement, ses orientations, son aide et ses conseils. Nous remercions également tous nos enseignants, en particulier ceux de la spécialité Génie des Matériaux, ainsi que tous les responsables et les personnels du département de Génie Mécanique.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce mémoire. Nous exprimons notre reconnaissance au personnel du SARL GRALQUOM pour les informations essentielles qu'ils nous ont fournies pour mener à bien notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier vivement **Mr. Lounis OUGERGOUZ**, **Mr. Ramzi BOURAHAL** et **Mme. Fatima BEN ELHADJ** pour leur encadrement pendant notre stage, ainsi que toute l'équipe du service d'étude pour leur aide, leur sympathie, leur bienveillance, leur dynamisme, leur accueil chaleureux et toutes les informations qu'ils nous ont transmises.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents ;

A ceux qui m'ont toujours encouragé pour que je réussisse dans mes études ;

A ceux qui ont veillé pour mon bien être ;

A ceux qui m'ont soutenu dans les moments les plus difficiles de ma vie ;

A ceux que j'aime et je respecte infiniment Le jour est venu pour leur dire Merci...

Ainsi qu'à mes chers frères : Mourad, Hamza ;

A toute la famille BOUDIAF ;

A tous mes amis qui ont toujours été présents ;

A mon binôme LEGRINI Hichem ;

A tous mes amis de l'université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES et surtout le groupe MGM 2024.

 **Hicham BOUDIAF**

Dédicace

Je dédie ce projet de fin d'études à ma merveilleuse famille et à mes amis chers ;

Vos encouragements infaillibles, votre soutien indéfectible et votre amour constant ont été mes sources d'inspiration tout au long de ce parcours ;

Maman et Papa, merci pour vos sacrifices et votre sagesse qui m'ont guidé jusqu'ici ;

A mes amis, vos moments de réconfort et de joie ont rendu ce voyage inoubliable. Sans vous tous, cette réalisation n'aurait pas été possible ;

A mon binôme Hicham BOUDIAF ;

Papa, je vous exprime ma plus profonde gratitude et vous félicite chaleureusement pour votre impact indéniable sur ma réussite.

 *Hichem LEGRINI*

ملخص: تتناول هذه الأطروحة إنشاء أنظمة العادم في صناعة السيارات، مع التركيز على تصميم وتصنيع مجمع العادم من الحديد الزهر الكروي (GS). إن الخصائص الاستثنائية لحديد الزهر GS، مثل مقاومته الحرارية والميكانيكية، تجعله خيارًا مثاليًا لهذا التطبيق. يتم تنظيم العمل في أربعة فصول: تقنيات المسبك، والتصميم والتصنيع، والمحاكاة بواسطة PROCAST، وتحليل النتائج. قامت شركة GRALCOME، المتخصصة في أعمال السبك والأجزاء الميكانيكية، بتوفير الموارد اللازمة. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها تحسنا كبيرا في أداء مشعب العادم، وبالتالي التحقق من صحة الطرق المستخدمة.

كلمات مفتاحية: مجمع العادم، هندسة المواد، حديد الزهر الجرافيت الكروي، المسبك، عملية التصنيع، المحاكاة

.Citroën C3، PROCAST، SOLIDWORKS،

Résumé : Ce mémoire traite la réalisation des systèmes d'échappement dans l'industrie automobile, avec un focus sur la conception et la fabrication d'un collecteur d'échappement en fonte à graphite sphéroïdal (GS). Les propriétés exceptionnelles de la fonte GS, comme sa résistance thermique et mécanique, en font un choix idéal pour cette application. Le travail est structuré en quatre chapitres : technologies de fonderie, conception et fabrication, simulation par PROCAST, et analyse des résultats. La société GRALCOME, spécialisée dans la fonderie et les pièces mécaniques, a fourni les ressources nécessaires. Les résultats obtenus montrent une amélioration significative des performances du collecteur d'échappement, validant ainsi les méthodes employées.

Mots clé : *Collecteur d'échappement, Génie des matériaux, Fonte à graphite sphéroïdal, Fonderie, Procédé de fabrication, Simulation, SOLIDWORKS, PROCAST, Citroën C3.*

Abstract: This thesis deals with the creation of exhaust systems in the automotive industry, with a focus on the design and manufacture of an exhaust manifold in spheroidal graphite cast iron (GS). The exceptional properties of GS cast iron, such as its thermal and mechanical resistance, make it an ideal choice for this application. The work is structured in four chapters: foundry technologies, design and manufacturing, simulation by PROCAST, and analysis of the results. The GRALCOME company, specialized in foundry and mechanical parts, provided the necessary resources. The results obtained show a significant improvement in the performance of the exhaust manifold, thus validating the methods used.

Key words: Exhaust manifold, Materials engineering, Spheroidal graphite cast iron, Foundry, Manufacturing process, Simulation, SOLIDWORKS, PROCAST, Citroën C3.

NOMENCLATURE

Liste des abréviations

CAO	: Conception Assistée par Ordinateur
d	: Densité
D	: Diamètre supérieur de la descente [cm]
DDPF	: Dessin de Définition de Produit Fini
De	: Diamètre de l'entonnoir [cm]
E	: Module de young[GPa]
EN	: Nuance appartenant à la norme européenne
EN-GJL	: Fonte a graphite lamellaire
EN-JM	: Fonte malléable
EN-GJS	: Fonte a graphite sphéroïdal
FB	: Fonte blanche, ou fonte à cémentite, de matrice martensitique
FGL	: Fonte à graphite lamellaire, ou fonte grise à graphite lamellaire
FGS	: Fonte à graphite sphéroïdal, ou fonte grise à graphite sphéroïdal
Ft	: Fonte grise non alliée
G	: Module de Coulomb
Gpc	: Masse de la pièce coulée [kg]
IGS	: Format Initial Graphics Exchange Spécification
Ks	: Vitesse spécifique de coulée [kg/cm ²]
MB	: Fonte malléable à cœur blanc,
Mn	: Manganèse
MN	: Fonte malléable à cœur noir
Mo	: Molybdène
Ni	: Nickel
p	: Masse volumique [kg/m ³]
Qm	: Quantité de masse à remplir par unité de temps [kg/s]
Sc	: Section de chenal [cm ²]
Sd	: Section de la descends de coulé [cm ²]
Si	: Silicium
v	: Module de Poisson
V	: Vanadium
W	: Tungstène
(w/m/k)	: Conductibility thermique
(1/k)	: Coefficient de dilatation linéaire
τ	: Temps de coulée [s]

Sommaire

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
1. Présentation de sujet.....	2
2. Importance de sujet	2
3. Présentation de l'entreprise	4

Chapitre I : Fonderie : procédés et produits

I.1 Introduction	8
I.2 Technologies de fonderie.....	8
I.2.1 Définition.....	8
I.2.2 Historique de la fonderie	8
I.2.3 Différents types de fonderies.....	9
I.2.4 Différentes techniques utilisées en fonderie.....	12
I.2.5 Processus de fabrication de fonderie	14
I.2.6 Organigramme de processus de fabrication de fonderie	16
I.2.7 Service méthodes d'outillage	17

I.2.8	Etude de la pièce.....	17
I.2.9	Modelage.....	18
I.2.10	Moulage en sable.....	18
I.2.11	Noir minéral.....	20
I.2.12	Opérations principales de la préparation de sable.....	20
I.2.13	Matières nécessaires pour la préparation de sable.....	20
I.2.14	Moulage en sable manuel.....	22
I.2.15	Conception du système d'alimentation et du remplissage.....	25
I.2.16	Fusion dans un four à induction.....	27
I.2.17	Coulée.....	32
I.2.18	Démoulage.....	34
I.2.19	Contrôle Qualité.....	35
I.3	Matériau étudié (Fonte GS).....	35
I.3.1	Introduction.....	35
I.3.2	Définition.....	35
I.3.3	Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	36
I.3.4	Avantage des fontes.....	37
I.3.5	Inconvénient des fontes.....	37
I.3.6	Constituants de base des fontes.....	38
I.3.7	Classification des fontes.....	39

I.3.8	Différents types de fontes	39
I.3.9	Caractéristiques physiques et mécaniques	40
I.3.10	Désignation de fonte	41
I.3.11	Types de fonte GS	41
I.3.12	Caractéristiques mécaniques de la fonte à graphite sphéroïdale	42
I.3.13	Relation entre résistance à la rupture par traction et dureté	44
I.3.14	Avantages et inconvénients des fontes à graphite sphéroïdale.....	45
I.3.15	Transformation intervenant lors du refroidissement des fontes GS	46
I.3.16	Domaines d'application.....	47
I.4	Conclusion	48

Chapitre II : Etude, conception d'un collecteur d'échappement en fonte GS

II.1	Introduction	49
II.2	C'est quoi un collecteur d'échappement ?.....	49
II.3	Où est-il situé ?.....	49
II.4	Son fonctionnement.....	50
II.5	Carte technique de la pièce	51
II.6	Etapas de fabrication d'une pièce	51
II.7	Acquisition de la pièce d'origine	52
II.8	Prise de cotes par pied à coulisse.....	52
II.9	Conception de collecteur d'échappement.....	53
II.9.1	Présentation du logiciel SOLIDWORKS	53
II.9.2	Modélisation 3D	53

II.9.3	Fonctionnement	54
II.9.4	Conception des pièces	54
II.9.5	Assemblage	55
II.9.6	Mise en plan	56
II.10	Conception du collecteur d'échappement avec SOLIDWORKS	57
II.10.1	Esquisse initiale	57
II.11	Conception de la pièce.....	60
II.12	Modelage	60
II.13	Conception de boite à noyau	61
II.14	Noyautage	62
II.14.1	Choix du procédé de moulage	63
II.14.2	Système de coulée et d'alimentation	64
II.15	Réalisation d'étude de moulage	65
II.16	Calcul des systèmes de coulée.....	65
II.16.1	Application numérique	66
II.16.2	Résultat	68
II.17	Détermination du plan de joint	68
II.18	Dépouilles	69
II.19	Retrait	69
II.19.1	Surépaisseur d'usinage	70
II.20	Dessiner le système de coulée	70
II.20.1	Choix des châssis.....	71
II.21	Position de la pièce dans le moule	72
II.22	Conclusion	72

Chapitre III : Modélisation, simulation sous logiciel PROCAST

III.1	Modélisation de la phase de moulage sous PROCAST.....	73
III.1.1	Présentation du logiciel PROCAST	73
III.2	Etapes à suivre pour l'utilisation du logiciel	74
III.2.1	Maillage.....	75
III.2.2	Simulation de remplissage de moule sous PROCAST.....	77
III.2.3	Résultat de simulation de la coulée	79
III.3	Simulation 1.....	79
III.3.1	Analyse des images de coulée	79
III.3.2	Simulation des vitesses de coulée.....	80
III.3.3	Simulation de la solidification.....	81
III.3.4	Simulations des défauts volumique	83
III.4	Simulation 2.....	85
III.4.1	Simulation de la coulée (avec masselottes).....	85
III.4.2	Simulation de la solidification (avec masselottes)	86
III.5	Conclusion.....	89

Chapitre IV Réalisation, résultats et discussions

IV.1	Introduction	90
IV.2	Modélisation le système de remplissage	90
IV.2.1	Préparation du sable de moulage.....	91
IV.3	Essais mécaniques	91
IV.3.1	Matériels utilisés.....	91
IV.3.2	Détermination du taux d'humidité	92
IV.3.3	Détermination de la perméabilité au gaz.....	93

IV.3.4 Détermination de la résistance à la compression et au cisaillement.....	93
IV.4 Moulage et noyautage.....	94
IV.5 Fusion et élaboration	97
IV.5.1 Equipements	97
IV.5.2 Poche de traitement	98
IV.5.3 Spectromètre (ml 300 à étincelle)	98
IV.5.4 Elaboration	99
IV.5.5 Fusion	102
IV.6 Opération de coulage	103
IV.7 Opération de parachèvement	104
IV.8 Analyse et caractérisation.....	105
IV.8.1 Matériel utilisé.....	105
IV.8.2 Observation au microscope optique	106
IV.8.3 Microstructure	106
IV.8.4 Essai dureté.....	108
IV.9 Etude comparative	109
IV.9.1 Composition chimique	109
IV.9.2 Microstructure	110
IV.9.3 Dureté	110
IV.9.4 Poids et dimension.....	111
IV.10 Conclusion	111
Conclusion générale	112
Références bibliographiques	114
Annexes.....	117

Liste des Figures

Liste des figures

Figure 1: Collecteur d'échappement Gt5.	2
Figure I-1 : Fonderie de métaux ferreux	10
Figure I-2 : Fontes à graphite sphéroïdal.	11
Figure I-3 : Moulage en sable 12	12
Figure I-4 : Moulage en coquille par gravité 13	13
Figure I-5 : Moulage en coquille sous pression 13	13
Figure I-6 : Moulage à la cire perdue 14	14
Figure I-7 : Processus de fabrication de fonderie..... 15	15
Figure I-8: Organigramme de processus de fabrication de fonderie..... 16	16
Figure I-9 : Préparation de sable 20	20
Figure I-10 : Echantillons de mesure. 21	21
Figure I-11: Equipement nécessaire pour le moulage en sable manuel. 23	23
Figure I-12 : Enchaînement des étapes du moulage..... 23	23
Figure I-13 : Moulage en sable. 24	24
Figure I-14 : Type de chenal. 25	25
Figure I-15 : Système d'alimentation..... 26	26
Figure I-16 : Type de masselottes. 27	27
Figure I-17 : Four à induction 29	29
Figure I-18 : Préparation liquide par four à induction. 30	30

Figure I-19 : Poches de coulée.	32
Figure I-20 : Positionnement des moules.	33
Figure I-21 : Coulée du métal liquide.	33
Figure I-23 : Courbe de refroidissement	34
Figure I-22 : Solidification.	34
Figure I-24 : Machine de démoulage.	34
Figure I-25 : Diagramme Fer-Carbone	37
Figure I-26 : Structures ferrite.	38
Figure I-27 : Structures perlite.	38
Figure I-28 : Fonte à graphite sphéroïdal observée au microscope optique.	40
Figure I-29 : Forme du graphite de différents types de fontes.	42
Figure I-30 : Description schématique de la solidification d'une fonte GS.	46
Figure II-1 : Schématisation d'un système d'échappement	50
Figure II-2 : Graphique de fabrication d'une pièce moulé.	51
Figure II-3 : 1 et 2 Collecteur d'échappement de la Citroën C3.	52
Figure II-4 : Pied à coulisse	52
Figure II-5 : Logiciel SOLIDWORKS.	53
Figure II-6 : Modélisation 3D de collecteur d'échappement.	54
Figure II-7 : Types de fichiers de SOLIDWORKS.	54
Figure II-8 : Barre d'outils d'esquisse	55

Figure II-9 : Barre des fonctions.	55
Figure II-10 : Assemblage (Modèle avec le Noyau).	56
Figure II-11 : Mise en plan de collecteur d'échappement.	57
Figure II-12 : Esquisse de base.	58
Figure II-13 : Fonction base/bossage.	58
Figure II-14 : Fonction crier plan.	59
Figure II-15 : Esquisses balayage.	59
Figure II-16 : Dessin de définition de collecteur d'échappement sur SOLIDWORS.....	60
Figure II-17 : Modèle du collecteur d'échappement en bois.	61
Figure II-18 : Boite à noyau d'un collecteur d'échappement.	62
Figure II-19 : Noyau.	63
Figure II-20 : Système de coulée et d'alimentation.	64
Figure II-21 : Courbe de Ks en fonction de la densité relative de la pièce coulée Kv.....	66
Figure II-22 : Plan de joint.	68
Figure II-23 : Analyse de la dépouille.	69
Figure II-24 : Attaques de coulée.....	71
Figure II-25 : Chenal.....	71
Figure II-26 : Descends de coulé	71
Figure II-27 :Entonnoir	71
Figure II-28 : Châssis de moulage.....	71

Figure II-29 : Position de la pièce dans le moule.....	72
Figure III-1 : Présente logiciel PROCAST.....	73
Figure III-2 : Interface du logiciel PROCAST.....	74
Figure III-3 : Interface utilisateur PROCAST.....	74
Figure III-4 : Zones les plus sollicitées à la rupture.....	75
Figure III-5 : Observation des mailles.....	75
Figure III-6 : Types de maillage.....	76
Figure III-7 : Etapes de Simulation.....	78
Figure III-8 : Direction de gravité.....	78
Figure III-9 : Cartographie de remplissage de moule pièce.....	80
Figure III-10 : Cartographie de vitesse de coulée.....	80
Figure III-11 : Cartographie de l'intervalle de solidification de la pièce.....	81
Figure III-12 : Refroidissement de la pièce en fonction de la température.....	82
Figure III-13 : Points de mesure de refroidissement.....	82
Figure III-14 : Courbe de refroidissement en fonction de point de mesure.....	83
Figure III-15 : Représente les vides existents à l'intérieur du collecteur.....	84
Figure III-16 : Collecteur avec le système de masselotte sur SOLIDWORKS.....	84
Figure III-17 : Remplissage avec masselottes.....	85
Figure III-18 : Vue de coup de solidification image L.....	86
Figure III-19 : Cartographie de l'intervalle de solidification de la pièce.....	86

Figure III-20 : Refroidissement de la pièce en fonction de la température.	87
Figure III-21 : Points de mesure de refroidissement.....	88
Figure III-22 : Courbe de refroidissement en fonction de point de mesure.....	88
Figure III-23 : Représente les vides.....	89
Figure IV-1 : Modèle avec le système de remplissage.....	91
Figure IV-2 :(A) calibreur, (B) balance analytique.....	92
Figure IV-3 : Analyseur d'humidité type PWG, avec dispositif de séchage.	92
Figure IV-4 : Appareil de contrôle de perméabilité.	93
Figure IV-5 : Machine et échantillons des essais mécaniques.	93
Figure IV-6: (1) Modèle inférieur dans le châssis inférieur, (2) et (3) Remplissage le châssis inférieur.	95
Figure IV-7 : (1), (2) Modèle réservé au châssis supérieur, (3) et (4) Remplissage le châssis supérieur.	95
Figure IV-8 : Empreints de modèle.....	96
Figure IV-9 : (1) Assemblage de moule avec le noyau et (2) le moule est prêt.....	96
Figure IV-10 : Four à induction.	97
Figure IV-11 : (1) Poche de traitement et (2) intérieur de la poche.	98
Figure IV-12 : Spectromètre mL300.....	98
Figure IV-13 : Bilan de charge pour obtenir une fonte à graphite sphéroïdale de matrice ferritique.	100
Figure IV-14 : Bilan de charge selon la disponibilité.	101

Figure IV-15 : Charges.....	101
Figure IV-16 : Fusion de matière première.....	102
Figure IV-17 : (1) et (2) Coulage dans la poche.	103
Figure IV-18 : Coulage dans le moule.	103
Figure IV-19 : Séparation de collecteur.	104
Figure IV-20 : (1), (2) Grenailage et (3) Finition.....	104
Figure IV-21 : (1) Appareil de polissage, (2) microscope optique et (3) appareille de dureté.	105
Figure IV-22 : (1) Analyse par spectromètre et (2) analyse par microscope optique.	106
Figure IV-23 : Observation microstructurale du collecteur (X 100).....	107
Figure IV-24 : Agrandissement de la zone sélectionné.....	107
Figure IV-25 : Essai de dureté.....	108
Figure IV-26 : Résultat de l’essai de dureté.....	108
Figure IV-27 : Microstructure (MO) du collecteur référentiel.....	110
Figure IV-28 : Microstructure (MO) du collecteur élaboré.	110
Figure A : Dessin de définition de model de collecteur d’échappement.....	117
Figure B : Dessin de définition collecteur d’échappement.	118
Figure C : Dessin de définition de noyau.....	119

Liste des Tableau

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Caractéristiques physiques et mécaniques .	41
Tableau I-2 : Nuances usuelles.	41
Tableau I-3 : Caractéristiques de traction des fontes a` graphite sphéroïdale	43
Tableau I-4 : Dureté Brinell en fonction de l'épaisseur pour différentes fontes	44
Tableau II-1 :caractéristique de la pièce.	51
Tableau II-2 : Composition de sable de noyautage.	63
Tableau II-3 : Epaisseur de paroi en fonction de coefficient X.	66
Tableau II-4 : Résultat des calculs de système de coulée	68
Tableau IV-1 : Résultats des tests et les essais du mélange.	94
Tableau IV-2 : Caractéristique de sable du moulage (Norme)	94
Tableau IV-3 : Composition chimique du collecteur d'échappement.	99
Tableau IV-4 : Tableau de composition chimique par le spectromètre mL300.	102
Tableau IV-5 : Résultats de la composition chimique du collecteur d'échappement référentielle et le collecteur d'échappement élaboré.	109
Tableau IV-6 : Comparaison de dureté entre les deux collecteurs.	110
Tableau IV-7 : Comparaison de poids et dimensions entre les deux collecteurs.	111

Introduction Générale

Introduction générale

Dans l'industrie automobile, l'optimisation des systèmes d'échappement est essentielle non seulement pour améliorer la performance des véhicules mais également pour répondre aux normes environnementales de plus en plus strictes concernant les émissions polluantes. La conception et la réalisation de composants efficaces, résistants et économiquement viables sont au cœur des défis actuels de cette industrie.

Ce mémoire de fin d'études propose d'explorer ces aspects par la conception et la fabrication d'un collecteur d'échappement en fonte à graphite sphéroïdal (fonte GS). Ce matériau a été choisi pour ses excellentes propriétés mécaniques et sa résistance exceptionnelle à la corrosion et aux températures élevées, ce qui le rend idéal pour les applications soumises à de sévères contraintes thermiques et mécaniques. A travers quatre chapitres et des références bibliographiques, ce travail aborde de manière exhaustive le processus de conception, de simulation, d'analyse et de réalisation pratique, en intégrant des méthodes avancées de fonderie et de simulation pour aboutir à un produit final optimisé et performant.

Le premier chapitre, intitulé "Technologies de fonderie", pose les bases en détaillant les méthodes et les processus de fonderie utilisés pour travailler la fonte GS. Ce chapitre sert de fondation théorique pour comprendre les particularités du matériau choisi et les techniques de moulage appropriées.

Dans le deuxième chapitre, nous nous penchons sur la "Conception, fabrication et production d'un collecteur d'échappement en Fonte GS". Cette section décrit le processus de conception du collecteur, les choix de design influencés par les propriétés de la fonte GS, ainsi que les étapes de fabrication du prototype.

Le troisième chapitre explore la "Simulation par logiciel PROCAST", un outil de simulation avancé utilisé pour prédire le comportement du matériau et la qualité du produit final lors de la coulée. Cette analyse permet d'optimiser le processus de fonderie en identifiant à l'avance les potentiels défauts et en ajustant les paramètres de fabrication pour atteindre les meilleures performances.

Enfin, le quatrième chapitre, " Réalisation du collecteur d'échappement et analyse des résultats ", présente une évaluation détaillée des données recueillies lors des tests et simulations. Les résultats sont analysés pour valider la conception et les méthodes de fabrication. Ce chapitre conclut également sur la réalisation pratique du collecteur, en mettant en lumière les succès du projet ainsi que les défis rencontrés et les solutions adoptées. Finalement, se terminons ce mémoire par une conclusion générale qui illustre les principaux résultats obtenus à travers cette étude et une annexe.

1. Présentation de sujet

Un collecteur d'échappement constitue un élément essentiel du système d'échappement d'un moteur à combustion interne, que ce soit pour une voiture, une moto, un camion ou tout autre véhicule motorisé. Un collecteur d'échappement en fonte GS est un type spécifique utilisé dans les systèmes d'échappement de ces véhicules. Les collecteurs d'échappement des véhicules automobiles sont particulièrement soumis à des contraintes de fatigue thermique. Comme tous les collecteurs d'échappement, ceux en fonte GS sont conçus pour rassembler les gaz d'échappement émis par les différents cylindres du moteur et les acheminer vers le système d'échappement du véhicule. Leur conception varie en fonction du moteur spécifique et des exigences de performance.



Figure 1: Collecteur d'échappement Gt5.

2. Importance de sujet

Sa fonction principale consiste à recueillir les gaz d'échappement émis par les différents cylindres du moteur et à les acheminer vers le système d'échappement afin qu'ils soient évacués à l'extérieur du véhicule.

↳ **Résistance à la chaleur**

Les gaz d'échappement peuvent atteindre des températures extrêmement élevées. Grâce à ses propriétés thermiques exceptionnelles, la fonte GS peut résister à ces températures sans se déformer ni se fissurer. Cela assure que le collecteur d'échappement demeure structurellement intact et opérationnel, même dans des conditions de fonctionnement extrêmes.

↳ **Durabilité**

Les collecteurs d'échappement en fonte GS sont reconnus pour leur robustesse et leur longévité. Ils sont capables de résister aux vibrations du moteur, aux chocs thermiques et aux autres contraintes mécaniques sans compromettre leurs performances. Cette durabilité garantit une utilisation fiable et prolongée du système d'échappement.

↳ **Performance motrice**

Un collecteur d'échappement bien conçu peut améliorer les performances globales du moteur. En réduisant la contre-pression dans le système d'échappement, il permet une évacuation plus efficace des gaz, ce qui peut entraîner une augmentation de la puissance, du couple et de la réactivité du moteur.

↳ **Compatibilité avec divers carburants**

La fonte GS est un matériau polyvalent pouvant être utilisé dans divers moteurs fonctionnant avec différents types de carburants, tels que l'essence, le diesel, ou même des carburants alternatifs comme le GPL (gaz de pétrole liquéfié) et le GNV (gaz naturel véhicule). Cette polyvalence en fait un choix attrayant pour les constructeurs automobiles.

↳ **Réduction des émissions**

En contribuant à une meilleure évacuation des gaz d'échappement, les collecteurs en fonte GS peuvent également jouer un rôle dans la réduction des émissions polluantes. En permettant une combustion plus complète du carburant et en facilitant le travail des dispositifs de traitement des gaz d'échappement, ils aident à minimiser l'impact environnemental des véhicules.

En somme, les collecteurs d'échappement en fonte GS jouent un rôle crucial dans le bon fonctionnement des moteurs à combustion interne.

3. Présentation de l'entreprise

↳ Historique

L'entreprise **ATELIERS TOUAZI** a été fondée en 1992 pour répondre aux besoins de l'époque en pièces mécaniques de précision, situé a, OULED MOUSSA - BOUMERDES . Avec l'évolution de l'industrie des matériaux de construction vers la fin des années 90, le fondateur, fort d'une vaste et riche expérience dans la maintenance industrielle des produits rouges, a créé la **Sarl GRALCOME**. Il a décidé de mettre à profit son expertise pour la fabrication de pièces mécaniques et de revêtements anti-usure dans l'industrie minière.

La société **GRALCOME** intègre sa stratégie dans une logique de performance visant un positionnement durable dans le domaine de la maintenance industrielle. Elle développe des partenariats avec des entreprises de renommée mondiale spécialisées, guidant ainsi ses actions.

Dans un souci d'amélioration continue, en 2015, la **SARL GRALCOME** a installé une fonderie de fonte et d'acier. Cette initiative visait à élargir ses secteurs d'activité, à compléter sa gamme de produits et à fabriquer des pièces complexes [1].

Produits et domaine de fabrication

Pièces mécaniques

La SARL GRALCOME s'est spécialisée depuis de nombreuses années dans la fabrication des équipements, pièces mécaniques de précision et des pièces de production soumise à tous types d'usure dans les activités des produits rouge, ciment, granulats, mine...

GRALCOME fabrique et elle répare tous types des pièces d'usure en appliquant des produits de rechargement de haute résistance à l'usure par abrasion, par érosion, par le choc, par température etc...

→ Pièces d'usure

→ Différentes pièces mécaniques

La fonderie est équipée de la première machine en Algérie CNC Router pour la fabrication des modèles de fonderie en numérique 3D dont la table fait : 3800 x 2800 x 1600 mm.

CNC Router

- Fabrique des modèles personnalisables de haute précision avec des délais de livraisons très courts.
- Fabrique des modèles en bois, résine ou aluminium pour les grandes séries.
- Vous offre la possibilité d'avoir des prototypes en 3 axes pour répondre aux divers besoins.



Figure 2 : CNC Router

Afin d'assurer une bonne qualité de pièces de fonderie avec une nuance précise, La SARL GRALCOME installe un laboratoire d'analyse métallurgique équipé d'un spectromètre à étincelle de 18 éléments et d'autre appareils d'analyse.

Briqueterie

Leader Algérien de pièces d'usure de briqueterie, la SARL GRALCOME met à la disposition de ses clients son savoir-faire pour la fabrication, la réparation, la rénovation et le rechargement des composants d'usure des machines de brique.



Figure 3 : Briqueterie.

- Hélice pour mouleuse et malaxeur
- Pales et porte pale pour malaxeur et mouilleur
- Grille de chambre à vide et grille de broyeur à meules.
- Dévidoirs, piocheurs, déchiqueteurs, et peignes de chambre à vide
- Chemise de protection pour les mouleuses, les malaxeurs, les mouilleurs, et les broyeurs
- Gueulards et buses pour les mouleuses.
- Disques et lames brise mottes
- Marteaux de broyeurs
- Tôles de protection et blindage de broyeurs.
- Arbre pour mouleuse, malaxeur et diverses machines.
- Pignon et arbre pignon.

Carrière, mine, travaux publics

L'industrie minière, carrière et travaux public sont certainement l'épine dorsale de nombreuses économies dans le monde. Extraire et affiner les minéraux et les métaux des profondeurs de la terre se fait dans des conditions difficiles et dans les endroits les plus reculés du monde.

Ces conditions extrêmes exigent des produits et des solutions plus extrêmes ! Et c'est pour cette raison SARL GRALCOME est le partenaire idéal pour résoudre les problèmes d'usure dans ces industries.

→ Des produits adaptés pour la protection des broyeurs et leurs composants contre l'abrasion et l'impact.

- Plaques d'usure pour la construction d'un boîtier de concassage pour protéger les surfaces contre les conditions sévères.
- Nouveaux écrans qui peuvent être fabriqués pour une utilisation dans la manutention où l'impact et l'abrasions se produisent.
- Des plaques conçus spécialement pour réparer, protéger, ou renforcer vos outils de travail dans le secteur de Travaux Publics.

Cimenterie

Rares sont les secteurs de la construction à ne pas avoir recours au ciment d'une manière ou d'une autre. Ayant la volonté de proposer à ses clients des solutions d'optimisation, Sarl GRALCOME fournis des produits et des solutions adaptées à l'usure présenté dans l'industrie du ciment [1].

- **Concassage** : blindages et pièces des concasseurs, tous les composant des tabliers métalliques, rechargement et réparation des rotors.
- **Cru et ciment** : Fabrication et montage des blindage, fabrication des pièces d'usure, revente des tôles rechargée e des tôles anti-usure, rechargement anti-usure
- **Four** : Toutes les pièces en INOX réfractaire.
- **Expédition** : Becs d'écoulement, glissières sac ciment et leur revêtements, chaise et dossier sac ciment, tambour, collecteur,

Pièces de fonderie

Dans le souci de toujours mieux faire, nous avons lancer fin 2015 une fonderie de fonte et acier afin d'élargir nos secteurs d'activité, compléter la gamme de produits, et réaliser des pièces d'une forme complexe.



Figure 4 : Pièces de fonderie

Chapitre I

Fonderie : procédés et produits

I.1 Introduction

La fonderie, un artisanat aussi ancien que la civilisation elle-même, reste un pilier fondamental de la fabrication industrielle moderne. Ce chapitre, consacré à la "Technologie de Fonderie", explore en détail les principes, l'évolution et les diverses méthodes de ce processus industriel vital. Il commence par définir clairement la fonderie, puis offre un bref aperçu historique de son développement à travers les siècles. Ensuite, il examine les différentes formes de fonderie, le processus de moulage, ainsi que la technique particulière de la sablerie, avant de conclure par une analyse des divers types de fonte utilisés. Cette présentation offre une vision concise mais exhaustive de la fonderie, mettant en lumière son rôle crucial dans le progrès technologique contemporain.

I.2 Technologies de fonderie

I.2.1 Définition

La fonderie est un procédé industriel qui consiste à fabriquer des pièces métallique en coulant du métal fondu dans un moule. Elle est utilisée pour produire diverses pièces métalliques, allant de petites pièces moulées à des pièces plus grandes et complexes. Les métaux les plus fréquemment employés dans les fonderies sont le fer, l'aluminium, le cuivre, le zinc et différents alliages [39].

I.2.2 Historique de la fonderie

La pratique de la fonderie, qui implique de fondre des métaux et le couler dans des moules pour former des pièces solides, trouve ses origines dans l'Antiquité, remontant aux premiers travaux de métallurgie vers 7000 av. J.-C. en Anatolie et en Mésopotamie. Les civilisations égyptiennes, sumériennes et chinoises ont toutes contribué au développement de techniques telles que la fonte du cuivre, la production de bronze et la fonte du fer.

Durant le Moyen Âge, la fonderie était principalement utilisée pour fabriquer des armes, des outils et des pièces artistiques, avec un transfert de savoir-faire entre maîtres et apprentis. Des progrès notables comprennent l'introduction de la fonte au coke en Chine et l'adoption de la fonte de bronze à la cire perdue en Europe.

La période de 1500 à 1800 a été marquée par des avancées significatives, telles que l'invention du haut-fourneau allemand en 1500, facilitant une production de fonte brute à grande échelle. Au 18^{ème} siècle, des innovations telles que le procédé de fonte au coke d'Abraham Darby et la forge à puddler de Henry Cort ont révolutionné l'industrie sidérurgique.

Le 19^{ème} siècle a vu des avancées majeures, avec la découverte de métaux tels que le zinc, le titane et le magnésium, ainsi que des méthodes novatrices comme le procédé Bessemer pour la production d'acier, transformant ainsi l'industrie métallurgique.

Le 20^{ème} siècle a été marqué par l'introduction de nouvelles méthodes telles que la fonderie en coquille, la fonderie sous vide et la fonderie en mousse de polyuréthane. En 1965, la production d'aluminium par électrolyse à basse température a été mise au point, révolutionnant l'industrie de l'aluminium.

Au cours des années 2000, des technologies plus avancées comme la fonderie en lit de poudre, la fonderie en phase solide et la fonderie par injection de gaz ont émergé, offrant des options de production métallique plus précises et flexibles.

En 2013, une équipe de chercheurs de l'Université de Leicester a annoncé le développement d'un nouveau procédé de fonderie par ultrasons, utilisant des ondes ultrasonores pour améliorer la qualité des pièces métalliques.

Ainsi, l'histoire de la fonderie témoigne d'une évolution constante des techniques et des technologies, de l'Antiquité à nos jours, avec des innovations continues visant à améliorer la qualité, l'efficacité et la diversité des produits métalliques [2].

I.2.3 Différents types de fonderies

Les différents métaux et alliages utilisés possèdent chacun des propriétés particulières qui confèrent aux pièces réalisées des capacités de résistance mécanique, des degrés de légèreté, de conductivités... différentes. Ils sont donc choisis en fonction de la destination de chaque application selon un cahier des charges précises établies avec le client. Il existe deux types de fonderie

I.2.3.1 Fonderie de métaux ferreux

a) Aciers : alliages de fer et de carbone (0,6 à 2,14%)

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont le taux est en général inférieur à 0,6% présentant d'excellentes caractéristiques mécaniques. L'augmentation du pourcentage de carbone améliore la dureté, la résistance à la rupture, la limite élastique, la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure et la trempabilité, mais elle diminue la malléabilité, la résilience et la soudabilité.

Les aciers représentent environ 95% des métaux utilisés dans le secteur de la forge, contre 12% de ceux utilisés dans le secteur de la fonderie, et sont classés en 3 grandes familles principales [30].

L'ajout d'éléments influence les caractéristiques mécaniques des pièces produites, par exemple :

- Le Manganèse (**Mn**) : augmente la limite élastique, la trempabilité et la résistance à l'abrasion
- Le Nickel (**Ni**) : augmente la résistance aux chocs et à la corrosion
- Le Silicium (**Si**) : augmente la limite élastique
- Le Tungstène (**W**) : augmente la résistance à l'usure et à la chaleur
- Le Molybdène (**Mo**) : augmente la résistance à l'usure et à la chaleur
- Le Vanadium (**V**) : augmente la résistance à l'usure et aux déformations
- Des gammes de caractéristiques mécaniques étendues sont obtenues après traitement thermique.



Figure I-1 : Fonderie de métaux ferreux [30].

b) Fontes : des alliages de fer et de carbone (2,6 à 6,67%)

Il s'agit d'un matériau présentant de très bonnes propriétés d'utilisation mais peu d'élasticité à la traction. Cela tient à la présence du carbone sous forme de lamelles de graphite libre qui cristallise dans la matrice métallique, celles-ci créent des amorces de rupture entraînant une certaine fragilité : ces fontes sont dénommées fontes à graphite lamellaire.

Pour améliorer leurs propriétés, on a recours à des éléments d'addition (nickel, chrome ...). Il s'agit alors de fontes dites alliées dont la teneur en carbone est généralement inférieure à 3%.

Les fontes à graphite sphéroïdal possèdent des caractéristiques qui dépassent celles de certains aciers, notamment en ce qui concerne leur résistance à la fatigue : cela tient au fait que dans ces fontes le graphite cristallise sous forme de petites sphères et non de lamelles.

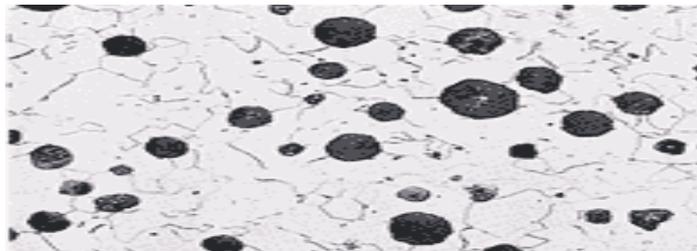


Figure I-2 : Fontes à graphite sphéroïdal.

I.2.3.2 Fonderie de métaux non ferreux

Alliages ne comprenant pas de fer, ou dans des proportions très faibles

a) Cuivres et alliages cuivreux

Le cuivre est le premier métal travaillé par l'homme avec l'or. Il est facile à travailler, ses alliages sont utilisés en forge comme en fonderie, et ses usages très diversifiés. On peut citer en principales caractéristiques une excellente résistance à la corrosion et très bonne conductibilité électrique.

b) Alliages légers et ultralégers

Les alliages légers sont élaborés à partir d'aluminium et l'alliage ultra léger à partir de magnésium. Les principales propriétés de l'aluminium sont sa légèreté, sa bonne résistance à l'oxydation et son excellente conductivité électrique et thermique [28].

I.2.4 Différentes techniques utilisées en fonderie

Il existe plusieurs procédés de moulage des pièces en fonderie. Nous allons en voir quelques-unes ici, les plus répandues, en mettant en avant leurs avantages mais aussi leurs inconvénients [26].

I.2.4.1 Moulage en sable

Dans le cadre de cette méthode de fabrication, appelée moulage en sable, le processus est caractérisé par l'utilisation d'un moule non permanent, ce qui signifie que le moule est détruit après la production de la pièce. La procédure consiste à verser du métal fondu dans l'empreinte d'un moule en sable qui a été conçu en fonction d'un modèle représentant la forme finale de pièce désirée. Ce moule est constitué de deux parties distinctes, et le métal est acheminé vers l'empreinte à remplir via un système de coulée dédié [26].

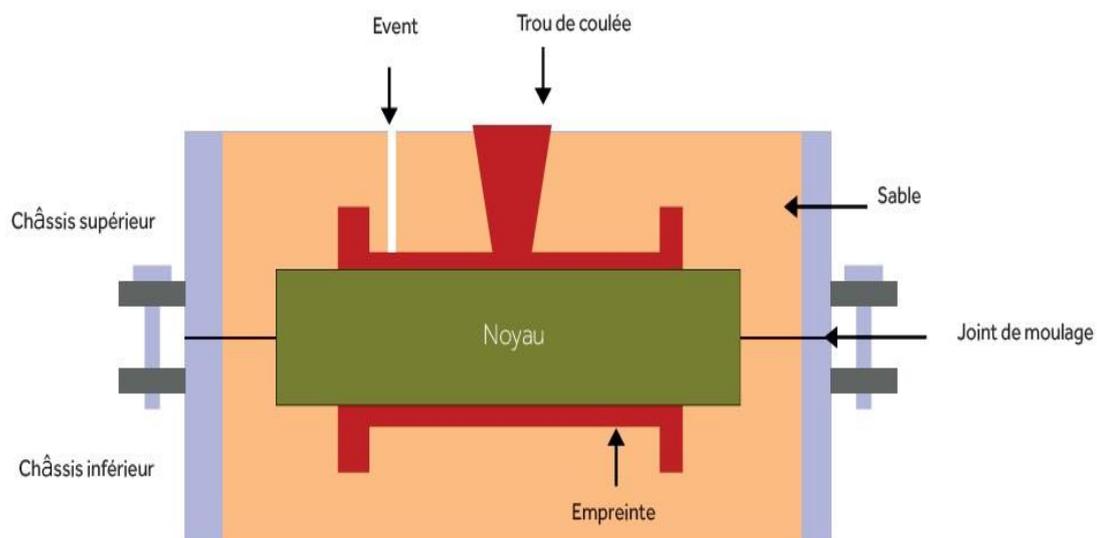


Figure I-3 : Moulage en sable [32].

- *Avantages* : ce procédé permet de fabriquer des pièces de très grande taille ainsi que des matériaux avec des points de fusion très élevés, tels que l'acier ou la fonte. Il est également rentable pour les productions en petites et moyennes séries.
- *Inconvénients* : les surfaces obtenues manquent de précision et le processus devient non rentable pour les grandes séries.

I.2.4.2 Moulage en coquille par gravité

Le procédé ici est similaire au moulage en sable : l'alliage est versé dans le moule métallique, appelé coquille. La différence principale réside dans le fait que le moule peut être réutilisé pour produire toutes les pièces, contrairement au moule en sable qui n'est utilisé qu'une seule fois [26].

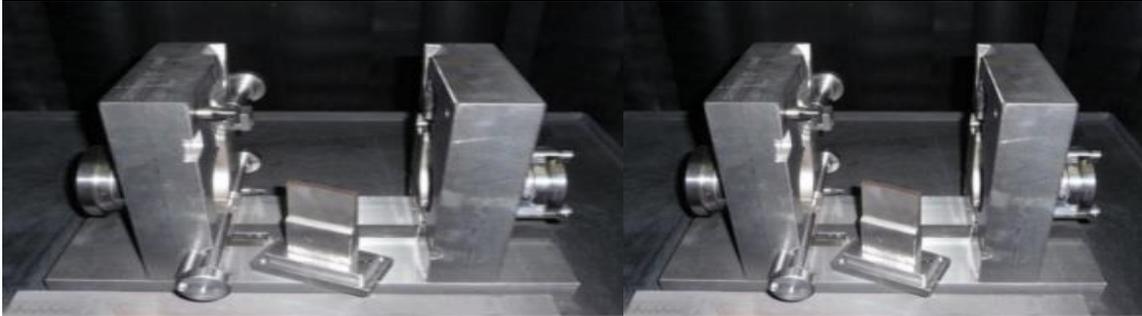


Figure I-4 : Moulage en coquille par gravité [26].

- *Avantages* : apporte une meilleure précision que le moulage en sable et une meilleure rentabilité pour les moyennes et grandes séries à produire.
- *Inconvénients* : réservé au matériau dont le point de fusion est inférieur à 900°C, tel que l'alliage de cuivre et d'aluminium.

I.2.4.3 Moulage en coquille sous pression

Le matériau est d'abord fondu dans un cylindre, puis injecté à haute vitesse et sous pression dans le moule à l'aide d'un piston. [26]

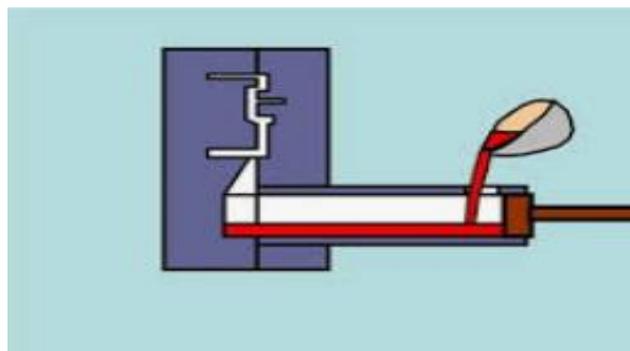


Figure I-5 : Moulage en coquille sous pression [27].

- *Avantages* : précision élevée des surfaces, adaptation au moulage de matériaux peu fluides et des pièces de faible épaisseur.

- *Inconvénients* : coût élevé du moule, impossibilité d'utiliser des noyaux en sable pour les formes intérieures, et risque de formation de tourbillons pendant la coulée du métal, entraînant une infiltration d'air.

I.2.4.4 Moulage à la cire perdue

Il s'agit d'une méthode ancienne, principalement employée pour la réalisation de pièces aux formes complexes et comportant plusieurs fonctions. Un moule en céramique est fabriqué couche par couche à partir d'un modèle en cire.

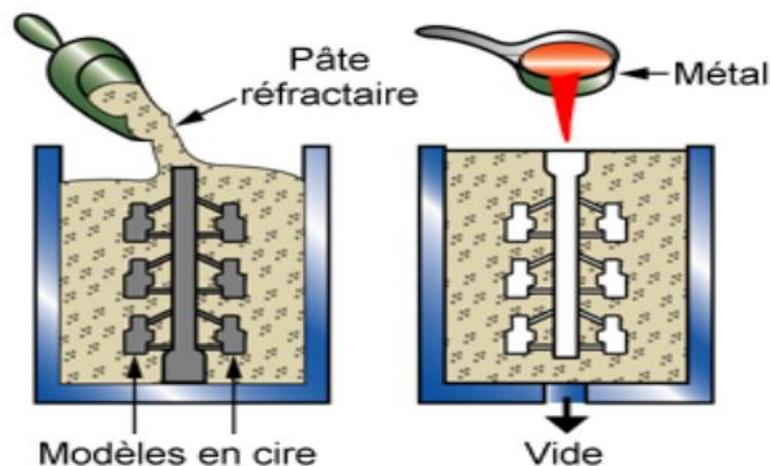


Figure I-6 : Moulage à la cire perdue [28].

- *Avantages* : liberté presque totale quant aux géométries et formes, précision exceptionnelle, possibilité de couler une grande variété d'alliages, y compris ceux ayant un point de fusion très élevé.

- *Inconvénients* : incapacité à produire des pièces massives.

I.2.5 Processus de fabrication de fonderie

La fabrication d'une pièce brute au niveau de l'unité de fonderie revêt une importance capitale dans le processus global de création de pièces en fonderie. Chaque étape technologique doit être scrutée minutieusement pour prévenir les défauts et réduire le taux de rebuts. L'objectif premier de l'élaboration du processus technologique est de faire des choix raisonnables qui assurent des performances technico-économiques favorables, comme produire une pièce finie avec le moins de défauts possible à un coût raisonnable. Pour y parvenir, il est impératif de

minimiser les rebuts et de simplifier le travail des mouleurs par une analyse approfondie et une rationalisation du processus technologique.

Cette section vise principalement à fabriquer une pièce intacte et conforme au processus de production. Cela englobe non seulement la création de pièces complexes, difficiles voire impossibles à réaliser par d'autres moyens, mais aussi la fabrication à un coût compétitif tout en exploitant les propriétés physiques et mécaniques spécifiques des différents métaux et alliages [3].

Pour cela, la fonderie se subdivise en unités qui se spécialisent en ces opérations :

- Le service méthodes
- L'UTS (unités de traitement de sable)
- Le laboratoire de contrôle
- Le service modelage
- Le service moulage & noyautage
- Le service fusion
- Le service parachèvement

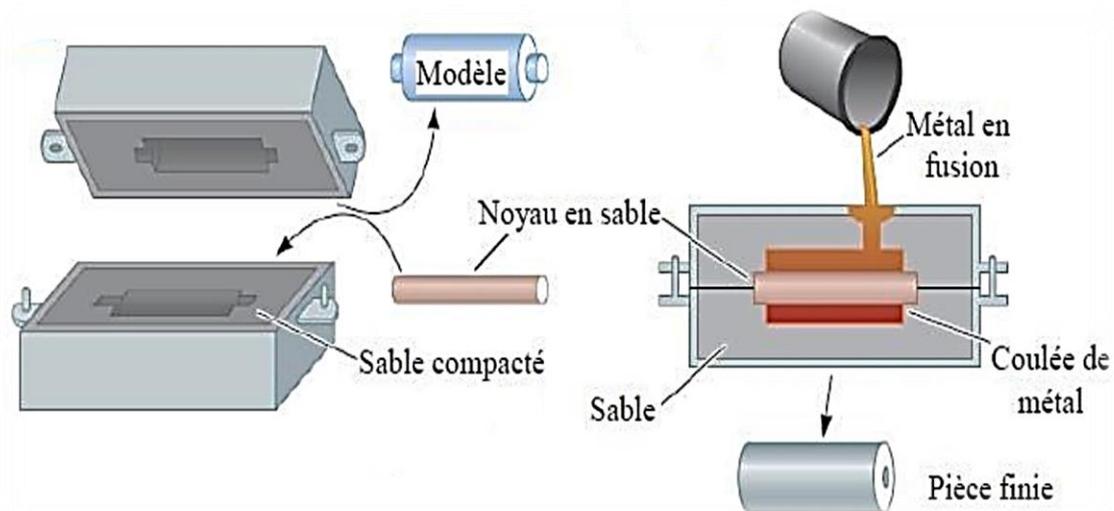


Figure I-7 : Processus de fabrication de fonderie.

I.2.6 Organigramme de processus de fabrication de fonderie

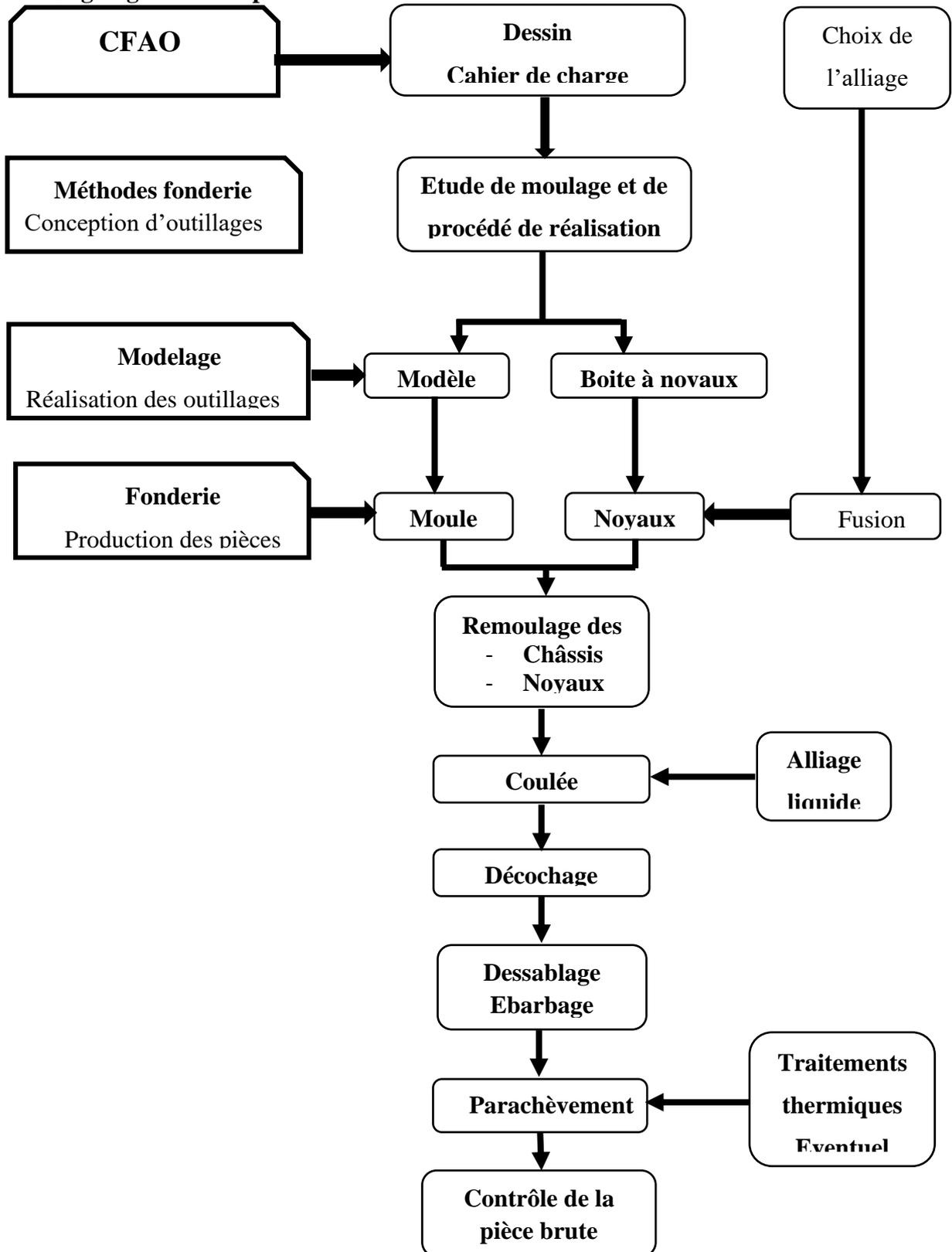


Figure I-8: Organigramme de processus de fabrication de fonderie.

I.2.7 Service méthodes d'outillage

La réalisation d'une pièce en fonderie implique initialement une phase d'analyse approfondie pour évaluer sa faisabilité selon les normes techniques et les capacités de l'entreprise. Une fois la commande confirmée, le service commercial établit un délai en accord avec le client pour produire les premières pièces, qui serviront de référence.

Le bureau des méthodes représente la première étape de la chaîne de fabrication. Cette opération consiste à examiner la conception des outillages nécessaires et à transmettre les plans à un modelleur chargé de les réaliser. De plus, il évalue l'ensemble du processus de fabrication pour déterminer le prix de revient de la pièce [3].

I.2.8 Etude de la pièce

Le schéma de la pièce, également connu sous le nom de Dessin de Définition de Produit Fini (**DDPF**), est élaboré par le bureau d'études spécialisé dans l'étude du mécanisme. Ce document détaille la pièce en incluant toutes les spécifications dimensionnelles et géométriques, englobant les surfaces brutes ainsi que les surfaces usinées.

Dans le prolongement du schéma initial, nous élaborons le plan de la pièce brute en tenant compte des surépaisseurs d'usinage et des facteurs de fonderie ajoutés par les methodistes. Ces ajustements au schéma initial fourni par le client visent à obtenir une pièce brute adaptée à la fonderie. Une analyse minutieuse du schéma est essentielle pour appréhender les formes et les détails de la pièce dans l'espace, facilitant ainsi la décomposition nécessaire à la réalisation du modèle. Toute étude de moulage doit être réalisée en garantissant que les pièces issues de la coulée du métal dans le moule soient de qualité optimale et produites de manière économique. Cela englobe la considération des aspects sanitaires des pièces ainsi que l'optimisation des coûts liés au processus de fabrication.

La réalisation d'une pièce de fonderie nécessite diverses opérations qui doivent se suivre et ces opérations sont citées comme suite :

- **Modelage** : conception des modèles.
- **Moulage** : conception des empreintes.
- **Fusion** : obtention du métal liquide à partir de minerais et de lingots dans des Fours.

- **Coulée** : remplissage des moules à l'aide du métal liquide recueilli dans des poches de coulée.

I.2.9 Modelage

Le processus de modélisation englobe l'ensemble des méthodes utilisées pour produire des modèles, tels que des plaques-modèles, des boîtes à noyaux et divers accessoires d'outillage [4].

- Le processus de création d'une pièce débute par le traitement des informations, comprenant les plans de la pièce brute et l'étude de moulage.
- Il est crucial de disposer du matériau nécessaire.

Tous les paramètres doivent être précisément spécifiés et ensuite transmis aux modeleurs, qui sont responsables de créer la pièce en trois dimensions (3D) conformément aux exigences de la commande. La qualité du travail du modelleur détermine la qualité de la pièce finale, notamment en termes de précision dimensionnelle et géométrique. Une fidélité maximale au plan initial réduit la nécessité d'interventions ultérieures.

a) Principales étapes au modelage

Le service de modélisation reçoit l'intégralité du dossier provenant du bureau d'études des outillages de fonderie, comprenant les éléments suivants :

- Le dessin de la pièce brute de fonderie ;
- Le dessin de l'étude de moulage ;
- Les schémas des boîtes à noyaux pour les outillages métalliques ;
- Des plans de détails, le cas échéant.

Le modelleur se réfère à ces plans pour élaborer l'outil opérationnel conformément au processus de fabrication.

I.2.10 Moulage en sable

I.2.10.1 Définition de sable de moulage

Le sable de moulage est un matériau utilisé dans le processus de fabrication de pièces métalliques par moulage. Il est principalement composé de sable de silice, mais peut également

contenir d'autres matériaux tels que de l'argile, des additifs chimiques et de l'eau. Ce mélange est compacté autour d'un modèle de la pièce à fabriquer, puis chauffé pour durcir le moule. Une fois durci, le moule est ouvert et le modèle retiré, laissant ainsi une cavité exacte de la pièce à couler. Le métal en fusion est ensuite versé dans cette cavité pour former la pièce finale.

Le sable de moulage doit posséder des propriétés spécifiques telles que la résistance à la chaleur, la plasticité et la perméabilité pour assurer la qualité du moulage.

I.2.10.2 Caractéristique de sable de moulage

Le sable utilisé dans les processus de fonderie est formulé de manière à obtenir une cohésion adéquate après une légère humidification préalable à son utilisation. Ainsi, les critères essentiels d'un sable de fonderie incluent les éléments suivants :

- *Infusibilité* : Une résistance aux températures élevées est essentielle, obtenue par l'utilisation d'une forte proportion de silice, généralement entre 75 et 90 %.
- *Plasticité* : Cette caractéristique permet au sable de prendre les formes du modèle grâce à l'adjonction d'une faible proportion de résine.
- *Cohésion* : Pour maintenir les formes, une proportion d'argile entre 5 et 15 % et environ 8 % d'eau sont incorporées au sable.
- *Perméabilité* : La capacité du sable à permettre l'évacuation des gaz formés lors de la coulée dépend de la taille des grains et de la pression de compression. Pour améliorer la perméabilité, de la houille en poudre est ajoutée, brûlant lors de la coulée pour créer de petits vides permettant l'évacuation des gaz.
- *Recyclage* : Les matériaux peuvent être économisés par le recyclage des sables après régénération et contrôle des propriétés.

I.2.10.3 Classification des sables

Les sables de moulage sont classés en 4 catégories différentes :

- Sable naturel ;
- Sable synthétique ;
- Sable semi-synthétique ;
- Sable d'étuve (abandonné).

I.2.11 Noir minéral

Le noir minéral est un additif carboné utilisé dans le processus de moulage, se présentant sous forme de charbon pulvérisé avec des particules d'une taille de 80 μm . Son rôle principal est d'éviter l'abreuvement et la pénétration de l'alliage entre les grains de sable du moule. Cet additif est spécifiquement destiné au moulage à vert. Ses principaux avantages résident dans son éclat carboné élevé par rapport aux noirs minéraux traditionnels, ce qui entraîne une économie significative en termes de régénération du sable et une réduction drastique de la consommation d'eau. Le semi-coke présente des qualités exceptionnelles, assurant une protection optimale des grains de sable et un meilleur état de surface des pièces moulées. De plus, sa faible teneur en oxygène limite le dégagement d'oxyde de carbone lors de la coulée.

I.2.12 Opérations principales de la préparation de sable

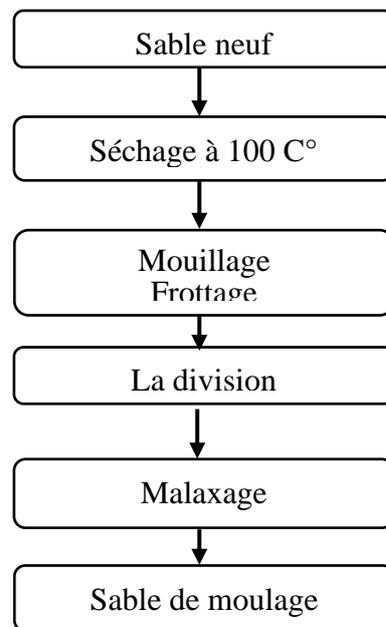


Figure I-9 : Préparation de sable.

I.2.13 Matières nécessaires pour la préparation de sable

I.2.13.1 Pour le sable de remplissage

- Bentonite : 0 - 1 % ;
- Vieux sable : 99 - 100 % ;
- Température à l'addition du mélangeur 50 C° max ;

- Régler de l'humidité 3 à 3.5 %.

I.2.13.2 Pour le sable de contact

- Sable quartzeux (SiO_2) 90 – 92% ;
- Grosseur de grain moyenne 0.25 - 0.32 mm ;
- Degré de l'homogénéité : 55 – 65 ;
- Humidité : pourcentage 0.5 % max ;
- Température à l'addition du mélangeur 30 C° max ;
- Bentonite 5 – 6 %.

I.2.13.3 Pour le sable spécial (sable de noyaux) :

- Corindon précieux (À basse de Al_2O_3) 91 – 95 % ;
- Granulation 0.1 – 0.2 mm ;
- Silicate de soude : 5 – 8 %. La densité 43 – 56 ° ;
- Régler de l'humidité 3 – 3.5 % ;

I.2.13.4 Contrôle de sable

Utilisation d'échantillons cylindriques 50x50 mm (figure I-8), pour les essais mécaniques de compression et de cisaillement.



Figure I-10 : Echantillons de mesure.

a) Sable de remplissage

- Résistance à la pression 700kgf/cm² ;
- Perméabilité aux gaz 120 unités ;
- Humidité 3 – 4 % de masse.

b) Sable de contact

- Résistance à la pression 700kgf/cm^2 ;
- Résistance au cisaillement 200kgf/cm^2 ;
- Perméabilité é aux gaz 120 unités ;
- Humidité 3 – 5 % de masse.

c) Sable spécial (sable de noyaux)

- Résistance à la pression (après le durcissement avec CO_2 ; 20s temps) 6kgf/cm^2 ;
- Perméabilité aux gaz 120 unités ;
- Humidité 2.5 – 3.5 % de masse.

I.2.14 Moulage en sable manuel

Le moulage en sable manuel est principalement utilisé pour produire des pièces uniques et de grandes dimensions qui ne peuvent pas être réalisées par des machines de moulage [5].

La (Figure I-11) présente l'équipement nécessaire pour le moulage en sable manuel, comprenant :

- Un modèle et un noyau ;
- Un châssis, du sable de moulage ;
- Métal liquide ;
- Une aiguille (pour la création de trous d'air), ;
- Une truelle (pour lisser la surface de joint du moule);
- Une palette et un fouloir (pour compacter le sable) ;
- Une spatule (pour lisser les différentes surfaces du moule après démoulage) ;
- Un mandrin de coulée (pour créer le trou de coulée) ;
- Un marbre (utilisé pour préparer le moule).

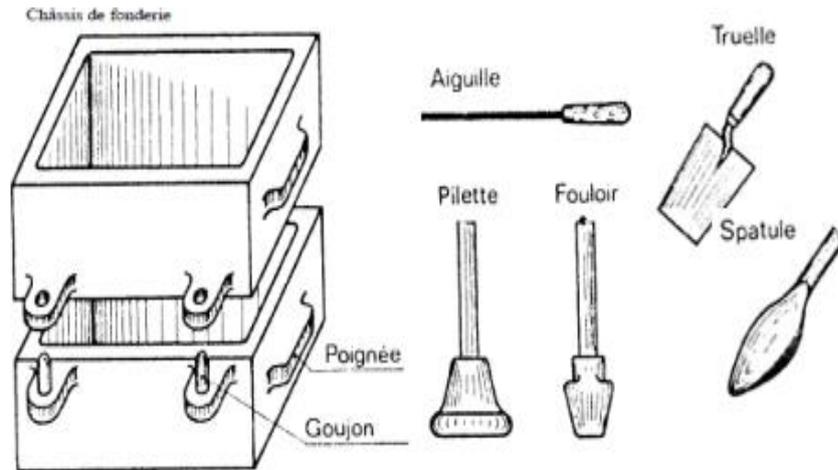


Figure I-11: Equipement nécessaire pour le moulage en sable manuel.

I.2.14.1 Préparation du sable

La préparation et la régénération des sables récupérés après décochage se font dans des installations appelées sableries où les sables sont tamisés, d'émottés, concassés, déferrés, dépoussiérés et refroidis. Les mélanges sont malaxés et incorporés dans les broyeurs avec les apports d'eau et d'adjuvants, de bentonite, de noire minéral, ... pour être ensuite envoyés aux machines à mouler [4].

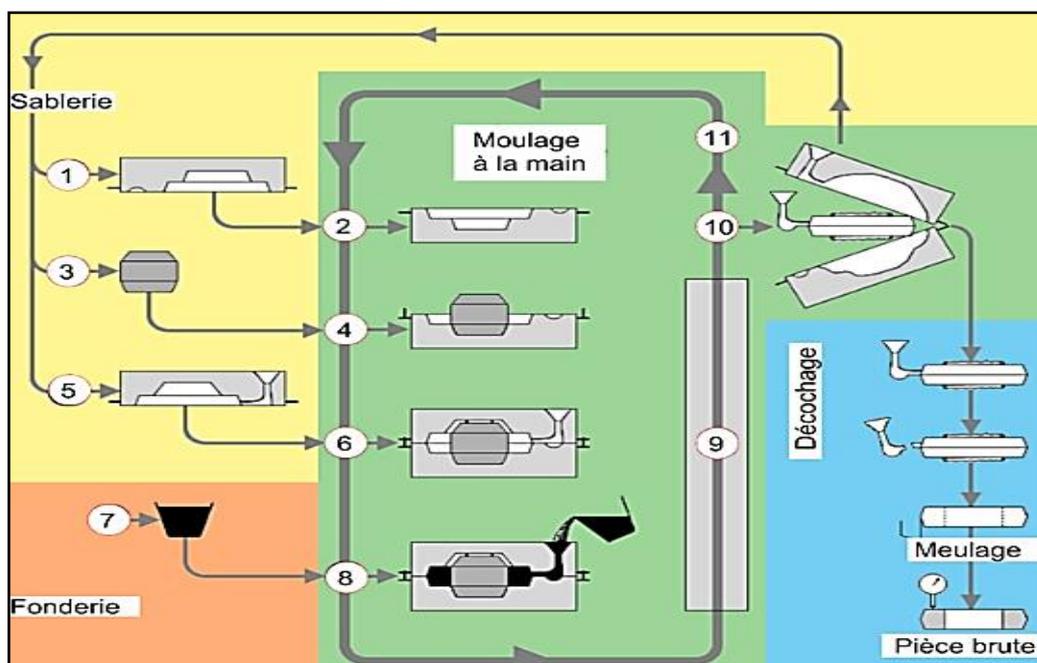


Figure I-12 : Enchaînement des étapes du moulage.

1. Serrage châssis inférieur
2. Retournement
3. Noyautage
4. Remoulage noyau
5. Serrage châssis supérieur
6. Fermeture du moule
7. Élaboration du métal
8. Coulée
9. Tunnel de refroidissement
10. Déchargement puis décochage
11. Retour châssis

La chronologie illustrée dans la figure précédente est la suivante : Il est crucial de considérer

- La simplicité de préparation et d'application des sables et des liants.
- La longévité des sables préparés.
- La capacité adéquate de stockage.
- La perméabilité des sables moulés [5].

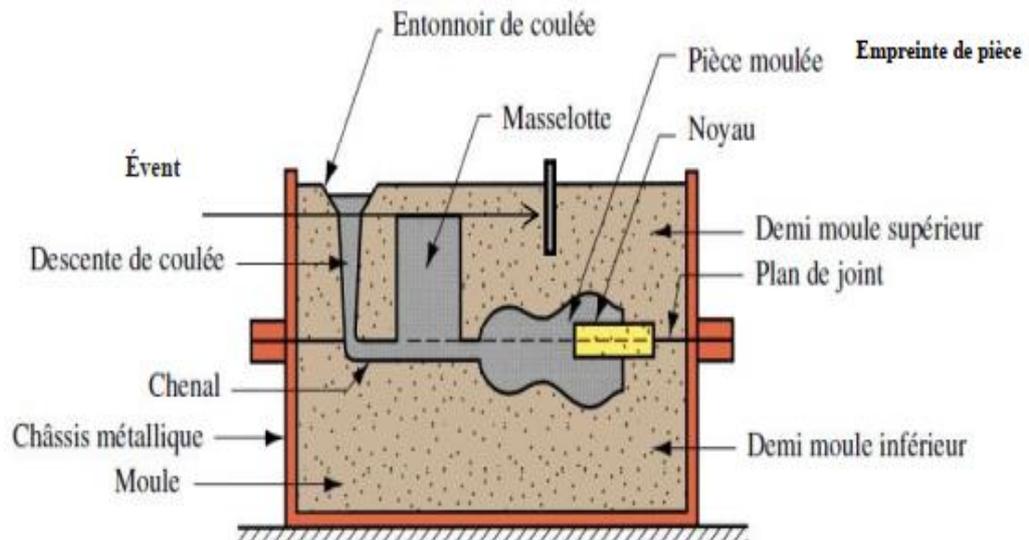


Figure I-13 : Moulage en sable.

- **Châssis** : une caisse remplie de sable dans lequel on réalise l'empreinte.
- **Modèle** : permet de façonner l'empreinte dans le châssis. Ce modèle doit être démoulé.
- **Plan de joint** : sépare les 2 (ou plus) parties du modèle ou du châssis.
- **Noyau** : pièce ajoutée dans le moule pour obtenir une cavité.

- **Masselotte** : bloc de matière ajouté localement pour éviter les problèmes de solidification.
- **Event** : Canal destiné à faciliter l'échappement des gaz formés au moment où le métal.
- **Entonnoir de coulée (trou de colée)** : a été ébauché par la plaque modèle, il s'agit maintenant de le rendre débouchant [6].

Après solidification, la pièce est extraite en détruisant le moule en sable. Elle est ensuite achevée par tronçonnage des amenées de métal e des masselottes.

I.2.15 Conception du système d'alimentation et du remplissage

Le remplissage de l'empreinte est effectué par un réseau de canalisations en sable, qui achemine la quantité nécessaire d'alliage dans l'empreinte pour couvrir l'ensemble de la pièce. Ce système doit permettre une descente directe vers le fond de l'empreinte avec un débit constant. Il se compose de :

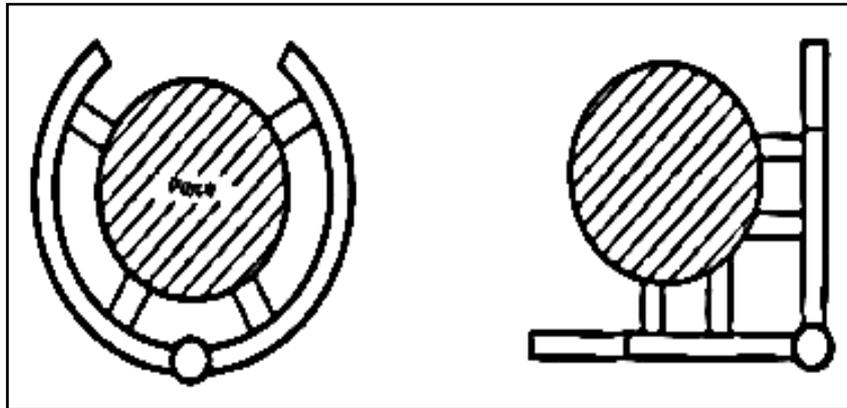


Figure I-14 : Type de chenal.

a) **Descente de coulée** : Conduite verticale qui dirige l'alliage vers les canaux, généralement de section circulaire.

b) **Chenal** : Conduit horizontal (ou légèrement incliné) qui dirige l'alliage vers les attaques.

c) **Attaques** : Conduits courts, généralement de section réduite et de forme plate, reliant les chenaux à l'empreinte de la pièce. Leur positionnement dépend de la forme de la pièce, de l'emplacement des masselottes et de la nature de l'alliage.

d) Évents : Conduits d'aération permettant l'évacuation des gaz de l'empreinte et des noyaux. Ils sont placés soit :

- Sur les parties hautes de la pièce.
- Aux parties les plus éloignées de la coulée.
- Aux endroits où une poche de gaz comprimé est susceptible de se former.

e) Masselotte : Réserve de métal liquide destinée à alimenter la pièce ou une partie de la pièce pendant la phase de retrait jusqu'à sa solidification [14].

Pour un volume donné, la meilleure forme de masselotte est celle qui possède le module de refroidissement le plus élevé. Théoriquement, c'est la forme sphérique.

Deux types de masselottes sont utilisés :

- La masselotte ouverte débouchant à l'air libre.
- La masselotte borgne peut alimenter plusieurs pièces à la fois.

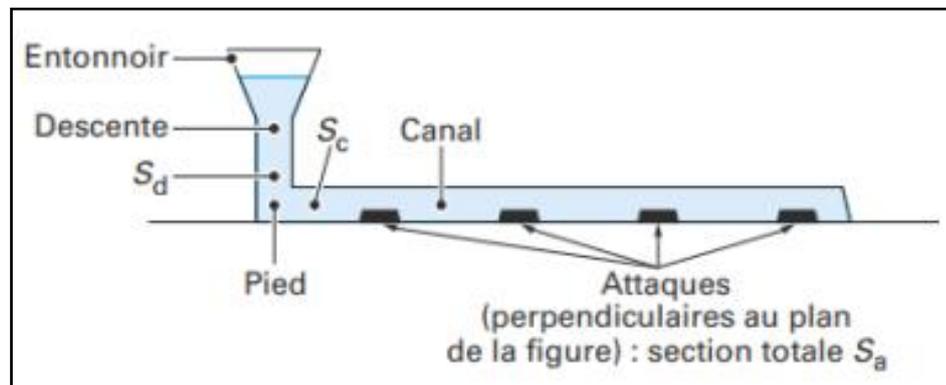


Figure I-15 : Système d'alimentation.

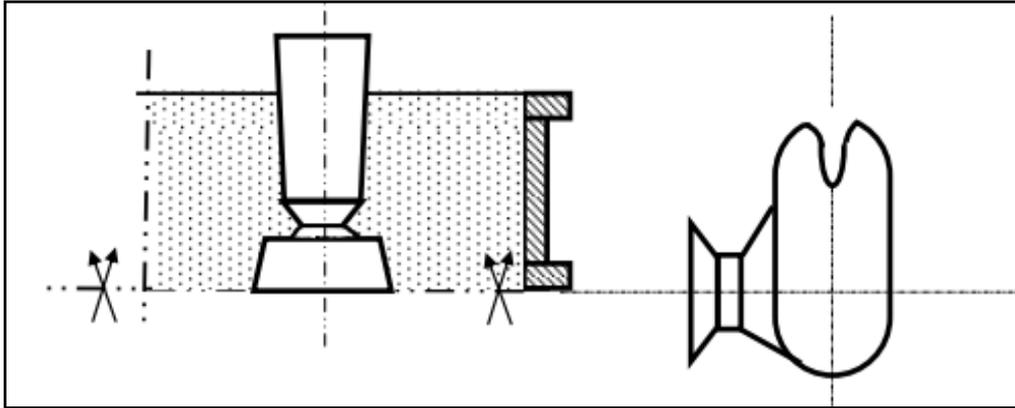


Figure I-16 : Type de masselottes.

a. Conditions des masselottes

- Être placées au-dessus ou à côté de la partie à alimenter.
- Donner suffisamment de métal liquide pour compenser la contraction totale du métal de la pièce ou partie de la pièce à alimenter.
- Ne pas être solidifiées avant les parties ou elles sont attachées.
- Permettre l'écoulement du métal liquide entre la masselotte et la pièce.
- Être facile à séparer à l'ébarbage.

b. Principe des masselottes

- Rechercher les zones qu'il faut placer les masselottes.
- Calculer les dimensions et le nombre des masselottes [13].

I.2.16 Fusion dans un four à induction

I.2.16.1 Introduction

Le four est composé de matériaux réfractaires permettant de l'isoler du Milieu ambiant, et contient un creuset en graphite. Ce creuset est rempli de lingots et de jets, puis porté à une température supérieure à la température de fusion de l'alliage qu'il contient. La régulation de température est effectuée à l'aide de thermocouples placés dans la chambre de chauffe entre les résistances (cas d'un four Électrique) et le creuset. La température de cette chambre est légèrement supérieure à celle du Métal contenu dans le creuset. Les fours sont classées suivants

le procédé de chauffage, la manutention des produits traités le niveau de températures et combustible utilisé.

I.2.16.2 Historique

Les premiers fours à induction apparaissent au début du XXe siècle, développés principalement à partir des travaux de KJELLIN, RODENHAUSER, Wyatt et Russ. Cependant, en raison de leur manque de fiabilité, ces technologies restent majoritairement confinées aux laboratoires. Le four à canal est le premier modèle à trouver une application industrielle.

1920 : À partir de 1920, les avancées dans les condensateurs statiques et les convertisseurs permettent l'essor industriel des fours à induction. Néanmoins, il faut attendre encore une décennie pour voir des fours capables de fondre jusqu'à 4 tonnes de métal entrer en fonderie. Les nouvelles applications industrielles continuent d'apporter des améliorations constantes.

1955 : En 1955, les fonderies commencent notamment à produire des alliages cuivreux en utilisant des fours à induction. La fréquence réseau de 50 Hz demeure pratiquement la seule utilisée jusqu'aux années 1970, période durant laquelle la recherche se concentre sur l'augmentation de la capacité, visant à atteindre une centaine de tonnes.

1973 : La crise pétrolière de 1973 met en évidence l'inefficacité énergétique des fours à creuset à basse fréquence et de grande capacité, entraînant une réduction significative de leur utilisation en fonderie.

I.2.16.3 Définition d'un four à induction

Un four à induction est un dispositif électrique où la chaleur est générée par induction magnétique dans un matériau conducteur (généralement un métal) placé dans un creuset, autour duquel un enroulement magnétique est refroidi par eau. Ce procédé utilise l'induction pour chauffer le métal jusqu'à son point de fusion. Une fois fondu, le champ magnétique haute fréquence permet de remuer le métal en fusion, assurant ainsi un mélange homogène des additions d'alliage. La plupart des fours à induction se composent d'un tube d'anneaux de cuivre refroidis à l'eau, entourant un récipient en matériau réfractaire. Les fours à induction sont couramment utilisés dans les fonderies modernes comme méthode plus propre de fusion des métaux comparée aux fours réverbératoires ou à coupole. Leurs capacités varient d'un kilogramme à cent tonnes. Lorsqu'ils fonctionnent, ils émettent souvent un gémissement ou un

bourdonnement aigu, en fonction de leur fréquence de fonctionnement. Les métaux fondus incluent le fer et l'acier, le cuivre, l'aluminium et les métaux précieux (Figure I.17). Comme il s'agit d'un procédé propre et sans contact, il peut être utilisé dans un vide ou une atmosphère inerte. Les fours à vide exploitent le chauffage par induction pour produire des aciers de spécialité et d'autres alliages qui s'oxyderaient s'ils étaient chauffés en présence d'air [34].

Un four préchauffé d'une capacité d'une tonne de fer peut fondre et traiter une charge froide en une heure. La puissance requise varie de 10 kW à 42 MW, pour des volumes de fusion allant de 20 kg à 65 t de métal. En fonctionnement, un four à induction émet généralement un bourdonnement ou un sifflement dû aux forces magnétiques fluctuantes et à la magnétostriction, avec une tonalité indiquant le niveau de puissance et le bon fonctionnement du système [8].



Figure I-17 : Four à induction [9].

I.2.16.4 Principe de fonctionnement d'un four à induction

Ce type de four utilise le principe de l'induction électromagnétique, selon ce principe physique, un champ magnétique produit dans le métal un courant électrique et chauffe proportionnellement à la puissance du champ. Les fours à induction utilisent des bobines dans lesquelles passe un courant électrique pour générer un champ magnétique intense, il est orienté et concentré sur les charges métalliques, présentes dans le creuset réfractaire. La bobine inductrice placée autour du creuset est refroidie à l'eau afin d'éviter toute surchauffe et dégradation de cette dernière. Des écrans magnétiques sont disposés tout autour pour refermer le champ sur la zone de fusion. Un effet intéressant pour la métallurgie est le brassage dû aux courants induits, il permet d'homogénéiser le bain ce qui rend très intéressant ce type de moyen

de fusion pour l'élaboration d'alliage complexes. Il existe une variante du four à induction plutôt réservée au maintien du métal en fusion dans un four à canal. Ce dernier est destiné au stockage du métal liquide, souvent directement sur le chantier de moulage. La température est maintenue par le passage au métal dans un canal où l'on applique un courant induit. Cela produit un courant dans le bain qui homogénéise l'ensemble. Les fours à induction sont utilisés pour la fusion et le maintien de tous les types d'alliages (acier, fonte, non ferreux) [10].

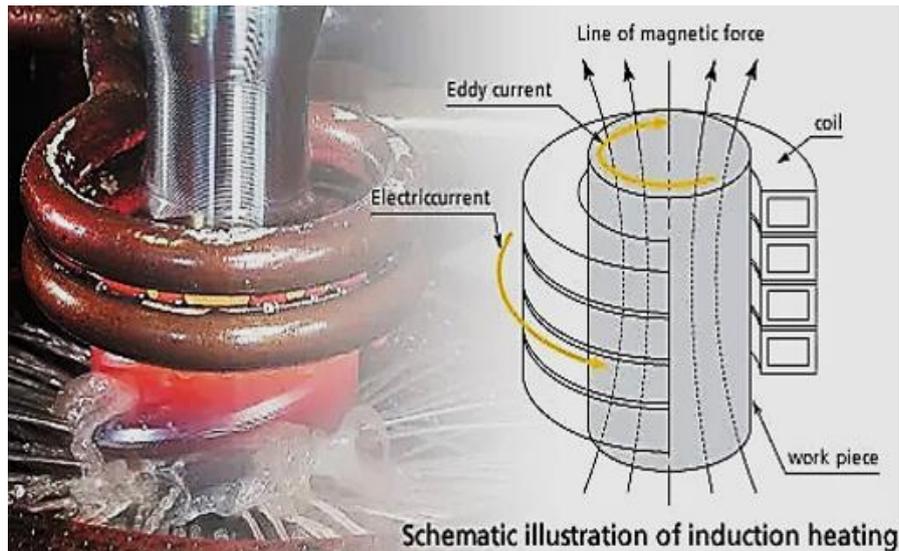


Figure I-18 : Réparation liquide par four à induction.

I.2.16.5 Applications industrielles des fours à induction

Le chauffage par induction ne s'applique qu'aux matériaux de résistivité électrique comprise entre $10^{-8} \Omega\text{m}$ (cuivre) et $10^{-1} \Omega\text{m}$ (verre fondu). La profondeur de pénétration thermique est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence et varie de quelques micromètres à plusieurs centimètres. Les puissances mises en œuvre peuvent varier de quelques centaines de watts (petits fours à induction de laboratoire ou de prothésiste dentaire) à plusieurs mégawatts pour les grosses installations de fusion. On trouve principalement des installations de chauffage par induction dans les domaines de la métallurgie et de la mécanique : 45 % pour la fusion, 45 % pour le chauffage avant formage, 10 % pour le traitement thermique et les applications diverses. Cependant, grâce à l'évolution des technologies de l'électronique et à l'apparition de composants de commutation plus rapides, des applications innovantes sont apparues dans d'autres domaines : chimie (fusion directe de verres et d'oxydes...), grand public (plaque chauffante de cuisine) [10].

I.2.16.6 Autres applications de l'induction

- Le brassage électromagnétique d'alliages métalliques ;
- Le confinement électromagnétique de plasma ;
- Le décapage de peinture ;
- Les plaques de cuisson ;
- La recharge d'accumulateurs [7].

I.2.16.7 Avantages et les inconvénients d'un four à induction

Ce four possède des qualités et des défauts, le tableau suivant montre ces avantages et ces inconvénients :

a) Avantages

- La propreté de ce procédé, l'économie en énergie et la possibilité de mieux contrôler la fusion des métaux.
- Les fonderies modernes utilisent ce type de four qui supplante les hauts fourneaux pour produire la fonte, car ces derniers émettent beaucoup de poussières et polluent beaucoup.
- Les capacités des fours à induction varient de moins d'un kilogramme à cent tonnes, Comme aucun arc ou combustion n'est utilisé, la température de la matière n'est pas supérieure à celle requise pour le faire fondre, ce qui peut prévenir la perte des éléments d'alliage précieux.

b) Inconvénients

- L'absence de raffinage dans le phénomène des matériaux de charge doivent être propres de produits d'oxydation et d'une composition connue. Certains éléments d'alliage peuvent être perdus en raison de l'oxydation (et doivent être rajoutés après-coup à la fonte).
- Le volume des matériaux à fondre est faible, plus la fréquence du four est élevée [7].

I.2.17 Coulée

Le remplissage des moules avec du métal liquide recueilli dans des poches de coulée est une étape cruciale dans le processus de fonderie. Voici comment cela peut être réalisé, avec des références générales au processus de coulée métallique :

I.2.17.1 Préparation des poches de coulée

Avant le processus de coulée, le métal liquide est recueilli dans des poches de coulée. Ces poches peuvent être des creusets, des cuves, ou d'autres récipients adaptés au métal à couler [20].



Figure I-19 : Poches de coulée.

I.2.17.2 Préchauffage des moules

Avant la coulée, les moules sont souvent préchauffés pour éviter des chocs thermiques brusques qui pourraient entraîner des défauts dans les pièces moulées [21].

I.2.17.3 Positionnement des moules

Les moules, généralement fabriqués en sable ou en matériaux réfractaires, sont positionnés de manière adéquate pour recevoir le métal liquide [22].



Figure I-20 : Positionnement des moules.

I.2.17.4 Coulée du métal liquide

Le métal liquide est versé des poches de coulée dans les moules. L'angle, la hauteur de chute, et le débit de coulée sont des paramètres critiques pour éviter des problèmes tels que la formation de criques et d'inclusions [23].



Figure I-21 : Coulée du métal liquide.

I.1.8 Solidification et refroidissement

- Après avoir été versé dans le moule, le métal commence à se refroidir et à se solidifier. La solidification commence généralement à la surface du moule et progresse vers l'intérieur. Pendant cette phase, les atomes du métal perdent leur énergie thermique, passant de l'état liquide à l'état solide.

- Le processus de refroidissement suit immédiatement la solidification. Pendant cette étape, la température de la pièce continue de diminuer jusqu'à ce qu'elle atteigne la température ambiante. Le taux de refroidissement peut influencer les propriétés finales de la pièce, notamment sa structure cristalline et ses propriétés mécaniques [36].



Figure I-22 : Solidification.

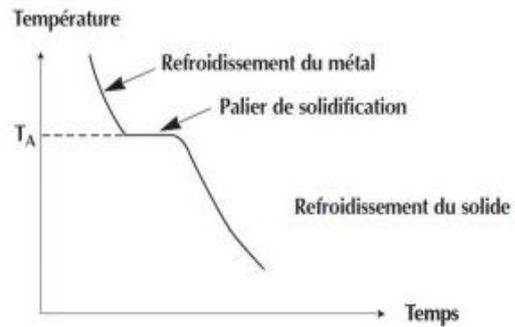


Figure I-23 : Courbe de refroidissement

I.2.18 Démoulage

Une fois que le métal s'est solidifié, les pièces moulées peuvent être démoulées. La technique de démoulage dépend du matériau et de la complexité de la pièce[24].



Figure I-24 : Machine de démoulage.

I.2.19 Contrôle Qualité

Les pièces moulées sont souvent soumises à des contrôles de qualité pour s'assurer qu'elles répondent aux spécifications requises [23].

I.3 Matériau étudié (Fonte GS)

La fonderie utilise très rarement des métaux à l'état pur mais presque toujours des alliages qui présentent les avantages suivants :

- Plus faciles à obtenir ;
- Plus basse température de fusion ;
- Meilleure coulabilité ;
- Retassure et retrait souvent plus faible ;
- Plus grande facilité de réglage des caractéristiques mécaniques.

Les alliages de fer sont les plus employés dans l'industrie. L'acier et la fonte, dont le rôle est le plus grand, sont des alliages fer-carbone [11].

I.3.1 Introduction

Les fontes constituent une famille de métaux ferreux avec une large gamme de propriétés mécaniques. Elles sont coulées dans des moules. On utilise beaucoup la fonte pour son coût peu élevé et sa large gamme des propriétés physiques et mécaniques.

Les fontes sont utilisées pour la réalisation de pièces de formes complexes qui doivent être produites en fonderie en raison de leur remarquable aptitude à la coulabilité. Parmi cette famille de matériaux, la fonte à graphite sphéroïdal (fontes GS) nous intéresse plus particulièrement

I.3.2 Définition

La fonte est un alliage fer-carbone dont la teneur en carbone varie de 2,14 à 6,67 % C. Pratiquement, la teneur en carbone dans la fonte varie de 3 à 4 % C, 92 % de fer ainsi que d'autres éléments tels que le silicium, le manganèse, le soufre et le phosphore.

Elles ont une bonne aptitude au moulage. Ces alliages sont obtenus par solidification et ont des caractéristiques qui dépendent des différentes phases qui les constituent (phases semblables à celles des aciers dans lesquelles vient s'insérer le graphite).

L'apparition de ces phases s'explique à partir des phénomènes physiques liés à la solidification : la germination et la croissance [12].

Le diagramme d'équilibre des alliages fer-carbone (Figure I.23) permet de visualiser les conditions d'existence des fontes. Les fontes ont des propriétés relativement médiocres par rapport aux aciers, elles sont utilisées pour :

- Leur température de solidification relativement basse,
- Leur très faible retrait lors de la solidification,
- Leur faible prix de revient,

La fonte comprend entre 2,1 et 6,67 % de carbone (6,67 % correspondant au seuil de saturation), tandis que l'acier n'en comprend qu'entre 0,02 et 2 %.

En fonction de ce pourcentage, la fonte porte un nom différent :

- La fonte hypoeutectique inclut moins de 4,3 % de carbone ;
- La fonte eutectique présente exactement 4,3 % de carbone ;
- La fonte hypereutectique comprend plus de 4,3 % de carbone.

Plus la fonte est riche en carbone plus elle est dure, mais plus elle perd en souplesse [15].

I.3.3 Diagramme d'équilibre fer-carbone

Le diagramme de phase est une source de renseignements sur un métal ou un alliage. Le diagramme de phase Fe-Carbone est outil du métallurgiste. Il s'agit d'une représentation des lignes de transformation (température en fonction du pourcentage d'élément) qui permet de connaître les quantités et d'analyser les phases en présence et les températures de changement de phase. Cependant, le diagramme de phase n'est valable que pour des conditions proches de l'équilibre (refroidissement ou chauffage suffisamment lent).

Le diagramme d'équilibre Fer-carbone (figure : I-23), est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0.008%C et 2%C) et les fontes (de 2%C à 6.67%C).

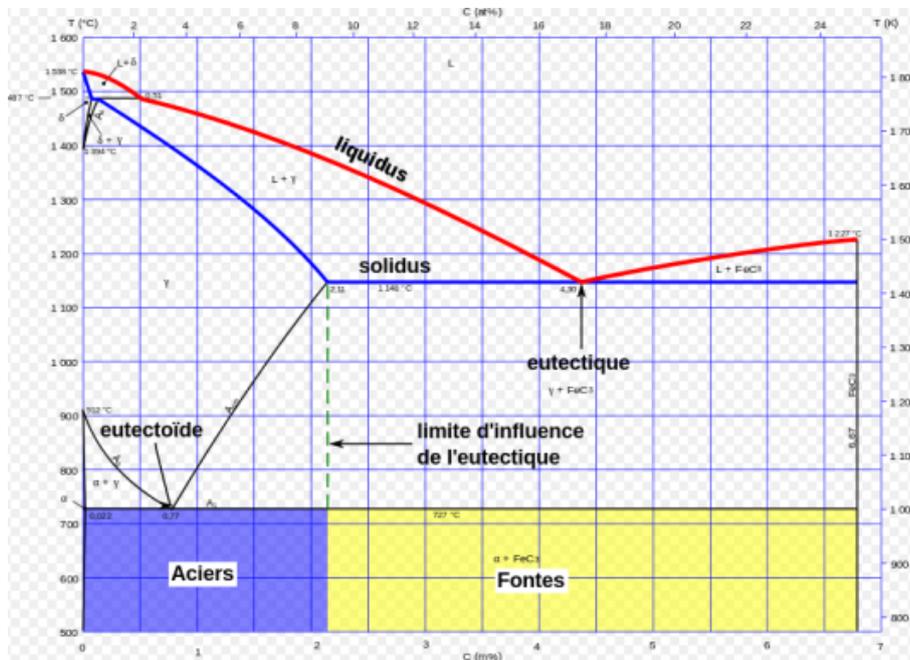


Figure I-25 : Diagramme Fer-Carbone [32].

I.3.4 Avantage des fontes

- Elles permettent la réalisation des pièces moulées complexes car elles possèdent une excellente coulabilité (aptitudes au moulage).
- Elles ont une excellente usinabilité, le graphite jouant le rôle de lubrifiant (mise à part les fontes blanches où le graphite n'est pas présent).

I.3.5 Inconvénient des fontes

- Les fontes grises lamellaires sont peu résistantes aux chocs, pour les autres fontes le problème de résilience est résolu par la forme non lamellaire du graphite.
- Les fontes FGS ne sont pas utilisées autant que les fontes FGL parce que son cout de fabrication est bien plus élevé.
- Les fontes blanches sont très peu utilisées sauf pour la réalisation de pièces spécifiques (rouleaux de broyeur).
- Elles sont dures mais très fragiles ceci est dû pièces à la présence de cémentite

I.3.6 Constituants de base des fontes

I.3.6.1 Ferrite

La ferrite est une phase solide du fer, caractérisée par une structure cristalline cubique centrée et une faible teneur en carbone.

La ferrite est constituée essentiellement de fer α qui ne peut contenir en solution solide d'insertion qu'au maximum 0,02 % de carbone, vers 725 °C, et encore bien moins à plus basses température [29].

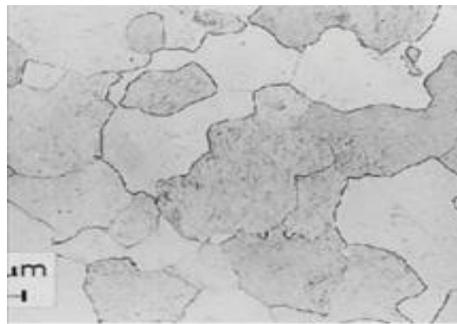


Figure I-26: Structures ferrite.

I.3.6.2 Perlite

C'est un agglomérat fin et serré des deux phases ci-dessous : ferrite –cémentite. Le mélange peut être lamellaire ou globulaire. La perlite est l'eutectoïde des alliages Fer-Fe₃C. Sa teneur en carbone est de 0,85%. Elle se forme au refroidissement lent à partir de l'austénite à la température de 723°C. Suivant sa structure sa dureté HB varie de 200 à 250.

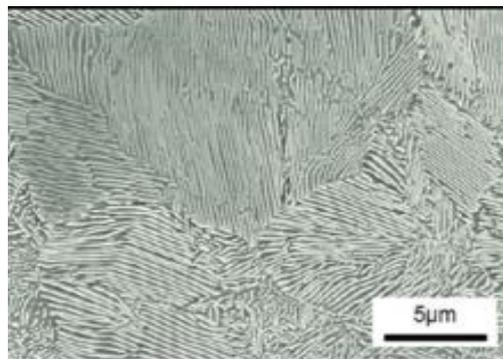


Figure I-27 : Structures perlite.

I.3.7 Classification des fontes

Il existe deux catégories de fontes

- Les fontes d'affinage qui sont un produit intermédiaire dans la transformation du minerai de fer en acier ;
- Les fontes de moulage, ou fonte mécanique, que l'on utilise à l'état brut pour la réalisation des pièces mécaniques.

I.3.8 Différents types de fontes

I.3.8.1 Fontes malléables

Il existe trois catégories de fontes malléables normalisées :

- Fonte malléable à cœur blanc.
- Fonte malléable à cœur noir.
- Fonte malléable perlitique.

L'intérêt des fontes malléables est que tout en gardant de bonnes propriétés de coulabilité des fontes, ces matériaux ont des caractéristiques mécaniques se rapprochant de l'acier.

I.3.8.2 Fontes blanches

Leur solidification se fait suivant le diagramme fer-cémentite. De ce fait, leur structure est formée d'un réseau important de carbures et d'une matrice perlitique. Leur cassure présente un aspect métallique blanc brillant. Ces fontes ont une bonne coulabilité, légèrement inférieures aux fontes grises.

I.3.8.3 Fontes grises

Dans ces fontes, la plupart du carbone se trouve sous forme de lamelles de graphite, formées par la solidification suivant le diagramme fer-graphite. Ce graphite donne aux fontes une cassure d'aspect gris d'où leur nom.

Il existe deux catégories de fontes grises normalisées :

a) Fonte grise à graphite lamellaire

Dans les fontes lamellaires, la majeure partie du carbone se trouve sous forme de graphite lamellaire. Sa morphologie joue un rôle essentiel sur la résistance à la traction. Le graphite est un constituant qui diminue la résistance mécanique et, sa présence, correspond à des vides (interstices) dans la matrice. Il favorise les fissures du fait de leur morphologie lamellaire [16].

b) Fonte grise à graphite sphéroïdale.

La fonte grise contient la majorité de son carbone sous forme de graphite. C’est ce dernier qui donne à la fonte une couleur grisâtre à sa cassure. Elle est constituée d’une matrice Ferri-tiqué, perlitique ou mixte. Elle contient un pourcentage élevé en silicium (1 à 2,8%) qui est un élément graphitisant et du phosphore (< 1,5%) afin de diminuer le point de fusion.

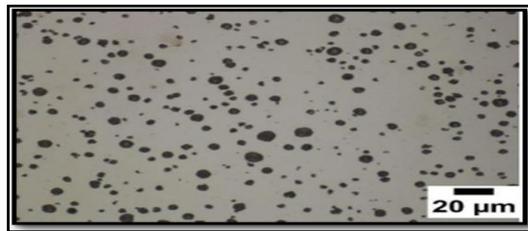


Figure I-28 : Fonte à graphite sphéroïdal observée au microscope optique.

- **Compositions chimiques des fontes GS**

La composition moyenne de cette catégorie de fonte est présentée dans le (Tableau I.I)

Tableau I-1 : Composition chimique d’une fonte grise sphéroïdale [19].

Eléments	C	Si	Mn	P
Composition (poids %)	3.2 - 3.6	1.8 - 3	0.3 - 0.4	0.05

- **Nature de la fonte**

- Ft : Fonte grise non alliée
- FB : fonte blanche, ou fonte à cémentite, de matrice martensitique,
- FGL : fonte à graphite lamellaire, ou fonte grise à graphite lamellaire,
- FGS : fonte à graphite sphéroïdal, ou fonte grise à graphite sphéroïdal,
- MB : fonte malléable à cœur blanc,
- MN : fonte malléable à cœur noir (structure Ferri-tique) [18].

I.3.9 Caractéristiques physiques et mécaniques

Tableau I-1 : Caractéristiques physiques et mécaniques [18].

Propriété	Fer pur	EN-GJL-...	EN-GJS-...
Masse volumique ρ (kg/m ³)	7870	7200	7200
Densité d	7,87	7,2	7,2
Module de young E (GPa)	207	115	168
Module de Poisson ν	0,27	0,26	0,28
Conductibilité thermique (w/m/k)	51,8	50	35
Coefficient de dilatation linéaire (1/k)	$11,7 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$

I.3.10 Désignation de fonte [18]

Tableau I-2 : Nuances usuelles.

Type de fonte	Désignation numérique	Désignation symbolique	Emplois
Fonte a graphite lamellaire	EN-JL 1010	EN-GJL-100	Bonne mouillabilité, bonne usinabilité Bonne résistance à l'usure par frottement Bon amortissement des vibrations
	EN-JL 1012	EN-GJL-150	
	EN-JL 1030	EN-GJL-200	
	EN-JL 1040	EN-GJL-250	Bonnes caractéristiques mécaniques et frottantes Bonne étanchéité
Fonte a graphite sphéroïdal	EN-JS 1010	EN-GJS-350-22	Bonne résilience Très bonne usinabilité (vannes, vérins...)
	EN-JS 1020	EN-GJS-400-18	
	EN-JS 1030	EN-GJS-400-15	
	EN-JS 1060	EN-GJS-600-3	
	EN-JS 1070	EN-GJS-700-2	Très bonne caractéristique mécanique Bonne résistance à l'usure Bonnes qualités frottant

I.3.11 Types de fonte GS

I.3.11.1 Fonte GS Ferri-tiqué

Dans une matrice de ferrite, les sphéroïdes de graphite donnent à la fonte de bonnes propriétés de ductilité, de résistance à l'impact et de résistance à la traction, ainsi qu'une limite d'élasticité équivalente à celle d'un acier à faible teneur en carbone. On peut couler directement les pièces en fonte GS Ferri-tique brute, mais on peut aussi les soumettre à un traitement thermique supplémentaire de recuit afin de maximiser leur ductilité et leur ténacité à basse température.

I.3.11.2 Fonte GS perlitique

Les sphéroïdes de graphite dans une matrice de perlite donnent une fonte à haute résistance dotée d'une bonne résistance à l'usure et à caractéristiques moyennes de ductilité et de résistance à l'impact. Son usinabilité est également meilleure que celle des aciers à propriétés physiques comparables.

I.3.11.3 Fonte GS Ferri-tique/perlitique

Ce type de fonte GS est le plus commun ; habituellement, on coule directement les pièces à l'état brut. Les sphéroïdes de graphite sont dans une matrice contenant de la ferrite et de la perlite, et on obtient des propriétés intermédiaires entre celles des fontes Ferri-tiques et perlitiques, avec de bonnes caractéristiques d'usinabilité et de faibles coûts de production [36].

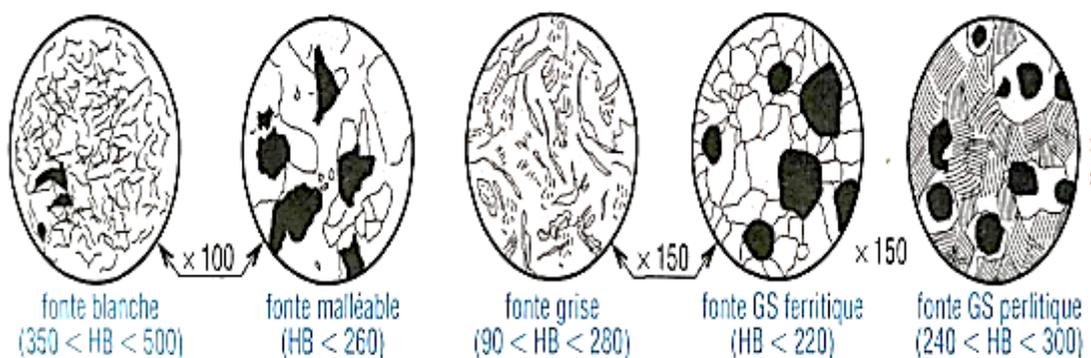


Figure I-29 : Forme du graphite de différents types de fontes.

I.3.12 Caractéristiques mécaniques de la fonte à graphite sphéroïdale

I.3.12.1 Normalisation et caractéristiques en traction

Les experts des différents pays européens ont mis au point une dénomination commune et rationnelle des fontes . Le préfixe **EN** signifie bien évidemment qu’il s’agit d’une nuance appartenant à la norme européenne. Les lettres **GJ** qui suivent indiquent qu’il s’agit d’une fonte. Vient ensuite une lettre de ´ signant la morphologie du graphite, soit **S** pour sphéroïdal puis deux nombres : le premier correspond à la charge à la rupture par traction en **MPa** et le second à l’allongement à la rupture en **%** [16].

Exemple 1 : **EN-GJS-500-7** de ´ signe une fonte à graphite sphéroïdal ayant **500 MPa** de charge à la rupture et **7%** d’allongement, ces caractéristiques mécaniques sont mesurées au moyen d’un essai de traction normalisé.

Exemple 2 : **EN-GJS-HB-230** de ´ signe une fonte à graphite sphéroïdale ayant **230** de dureté Brinell.

Tableau I-3 : Caractéristiques de traction des fontes à graphite sphéroïdale [36]

Désignation du matériau	Epaisseur de paroi déterminante (en mm)	Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % (mini) (en MPA)	Résistance à la traction (mini) (en MPa)	Allongement (mini) (en %)
EN-GJS-400-18	30 < t < 60	250	390	15
EN-GJS-400-15	t < 30	250	400	15
EN-GJS-500-7	60 < t < 200	290	420	5
EN-GJS-600-3	t < 30	370	600	3

I.3.13 Relation entre résistance à la rupture par traction et dureté

Puisque le graphite sous forme sphéroïdale n'altère que très peu les caractéristiques mécaniques du matériau, il existe une corrélation entre celles-ci et la dureté Brinell, sous réserve que la structure ne comporte pas de carbures primaires (tableau. I-4).

Tableau I-4 : Dureté Brinell en fonction de l'épaisseur pour différentes fontes [36].

Désignation du matériau		Domaine de dureté Brinell épaisseur de paroi déterminante t	
Symbolique	Constituants principaux	t < 60 mm	60 mm < t < 200 mm
EN-GJS-400-18	Ferrite	130 à 175	130 à 175
EN-GJS-700-2	Perlite	225 à 305	210 à 305
EN-GJS-500-14	Ferrite + perlite	185 à 215	170 à 200

La dureté et la résistance mécanique des fontes à graphite sphéroïdale Ferri-tiques dépendent des éléments dissous dans la ferrite comme le silicium, le manganèse et le nickel [16].

I.3.13.1 Limite d'élasticité

Les fontes à graphite sphéroïdal n'ayant pas une limite d'écoulement bien marquée, on mesure dans la pratique une limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % $R_p 0,2$ de déformation résiduelle soit par interprétation du diagramme de traction, soit, pour des mesures plus précises, par extenso métrie. Des mesures et des estimations statistiques ont montré que le rapport $R_p 0,2 / R_m$ décroît légèrement quand R_m augmente de 400 à 800 N/mm². Au-delà de 800, ce rapport tend à s'élever pour les fontes trempées et revenues [17].

I.3.13.2 Module d'élasticité

Le module d'élasticité, en traction comme en compression, qui est un critère de qualité et qui caractérise la rigidité du matériau, se situe ordinairement entre 160 000 et 180 000 N/mm² et varie en sens inverse de la proportion du graphite en volume. Il n'est que peu affecté par la nature de la matrice ou l'épaisseur des moulages [17].

I.3.13.3 Résistance à la compression

La résistance à la rupture en compression des métaux ductiles ne présente pas un grand intérêt pour le concepteur et n'est, en général, pas mesurée. La limite d'élasticité de ces métaux est légèrement plus élevée en compression qu'en traction, parce que le début de déformation plastique est retardé sous une charge de compression [16].

I.3.13.4 Résistance au cisaillement et à la torsion

La résistance à la rupture au cisaillement et à la torsion est approximativement égale à 90 % de la résistance à la rupture en traction. La limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % en torsion varie de 68 à 80 % de la limite conventionnelle d'élasticité en traction. Les valeurs les plus élevées de ce rapport correspondent aux fontes à matrice Ferri-tique [16].

I.3.13.5 Coefficient de Poisson et module de Coulomb

La valeur du coefficient de Poisson des fontes à graphite sphéroïdal est voisine de 0,275. Pour les fontes à graphite sphéroïdal, le module de Coulomb G vaut, approximativement, 0,40 fois le module d'élasticité longitudinale [17].

I.3.14 Avantages et inconvénients des fontes à graphite sphéroïdale

Les fontes à graphite sphéroïdale offrent plusieurs avantages, notamment une résistance mécanique élevée, une meilleure résilience, de bonnes caractéristiques d'usinabilité et une résistance à la corrosion. Cependant, elles sont également associées à des inconvénients tels qu'un coût initial plus élevé, une faible résistance à la traction à haute température, une sensibilité à la porosité et des limitations dans certaines applications spécifiques. Ces avantages et inconvénients doivent être pris en compte lors du choix des matériaux pour une application spécifique.

Avantages

- Résistance mécanique élevée ;
- Résilience améliorée ;
- Bonnes caractéristiques d'usinabilité ;
- Résistance à la corrosion.

Inconvénient

- Coût initial élevé ;
- Sensibilité à la porosité ;
- Limitations dans certaines applications spécifiques.

I.3.15 Transformation intervenant lors du refroidissement des fontes GS

I.3.15.1 Solidification des fontes GS

Les fontes GS sont majoritairement de composition eutectique ou hypereutectique. Lors de la solidification, c'est le graphite qui se forme en premier dans le bain liquide sur les sites de germination constitués lors de l'étape d'inoculation. Les sphéroïdes formés s'entourent ensuite d'une gaine austénitique, appelée cellule eutectique, à travers laquelle le carbone doit diffuser pour les faire croître. La (figure I-27) schématise les mécanismes de solidification :

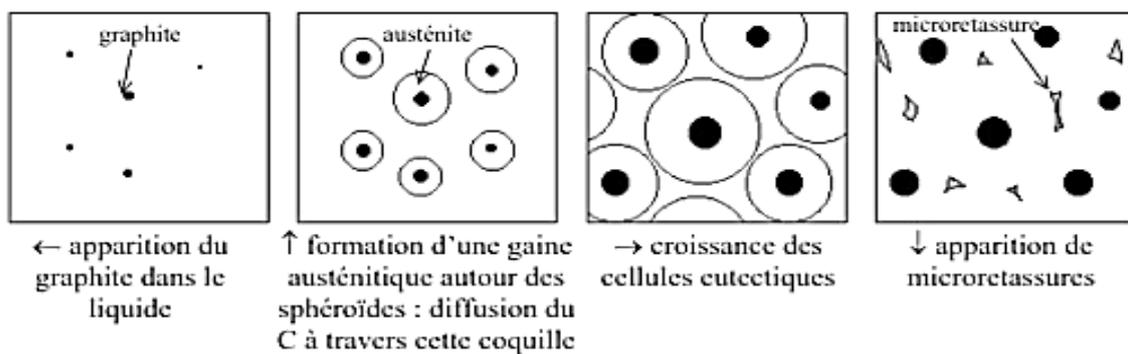


Figure I-30 : Description schématique de la solidification d'une fonte GS.

La solidification des fontes GS entraîne toujours la formation de porosités que l'on peut diviser en deux familles :

- Des micros retassures de petite taille (de l'ordre de quelques micromètres) qui sont dues aux espaces laissés libres en fin de solidification.
- Des porosités de tailles plus importantes (de quelques dizaines de micromètres jusqu'à parfois plus d'un millimètre) qui apparaissent dans les zones de la pièce se solidifiant en dernier. Elles sont dues à la différence de densité du métal l'état liquide et à l'état solide,

qui entraîne un retrait lors de la solidification et provoque la formation de cavités appelées retassures [17].

I.3.16 Domaines d'application

La fonte est utilisée pour tout type de pièces mécaniques. Pour leur majorité les pièces sont obtenues par coulée du métal liquide dans des moules en sable siliceux.

- La fonte FGS est particulièrement utilisée en éléments de voirie comme les grilles et regards d'assainissement (grilles d'égout).
- Les fontes FGS sont utilisées pour la réalisation de mobiliers urbains comme les bancs et les rambarde ouvragées (bouches de métro Guimard), et en ornementation de bâtiments comme les appuis de fenêtre, les rosaces de portail, les pics de grille. FGS est appréciée pour sa soudabilité
- Pièces mécaniques : carter, chape de liaison, bras de suspension, etc.
- Industrie automobile : pièces de liaison au sol (par exemple, bras de suspension. Collecteur d'échappement).
- Canalisations et adduction d'eau.



Figure I-31 : Freins à disque



Figure I-32 : Blocs moteurs



Figure I-33 : Tuyaux



Figure I-34 : Radiateurs



Figure I-35 : Regard d'égouts



Figure I-36 : Collecteur

I.4 Conclusion

En conclusion de ce chapitre sur la "Technologie de Fonderie", nous avons traversé l'évolution et les subtilités de cette technique cruciale, de ses origines historiques aux méthodes modernes comme le moulage et la sablerie. Chaque section a enrichi notre compréhension des différentes techniques de fonderie, mettant en évidence la diversité des approches et l'adaptabilité des matériaux utilisés, notamment les différents types de fontes. Cette exploration approfondie démontre que la fonderie, en combinant tradition et innovation, reste essentielle pour répondre aux besoins complexes de l'industrie moderne. Elle continue d'évoluer, prouvant sa capacité à intégrer de nouvelles technologies tout en restant fidèle à ses principes de base, pour forger des pièces qui sont à la fois robustes.

Chapitre II : Etude, conception d'un collecteur d'échappement en fonte GS

II.1 Introduction

Le but de cette étude est la réalisation d'une pièce mécanique par procédé de fonderie qui consiste à obtenir à partir d'un alliage liquide une pièce saine de forme souhaitée. Généralement, 80% des pièces coulées sont fabriquées par le procédé de moulage en sable vu les avantages qu'il offre dans les conditions d'une fonderie mécanique. En élaborant le processus technologique de fabrication d'une pièce coulée, on doit déterminer :

- La position de la pièce dans le moule pendant le moulage ;
- Le plan de joint ;
- Les dépouilles et contre dépouilles (dans le cas des modèles) ;
- Les retraits de la pièce ;
- La valeur de surépaisseur d'usinage ;
- Le nombre de noyaux et leurs frontières ;
- La construction et les dimensions de systèmes de coulée et d'alimentation ;
- Le nombre des pièces dans le moule et leur disposition ;
- Le choix des équipements technologiques ;
- La composition du sable de moulage et celle de noyautage ;
- Le choix du processus d'exécution du moule et du noyau ;
- La technologie de la coulée, du décochage et du nettoyage.

II.2 C'est quoi un collecteur d'échappement ?

Un collecteur d'échappement en fonte GS (graphite sphéroïdal) est un composant clé des moteurs à combustion, utilisé pour canaliser les gaz d'échappement du moteur vers le système d'échappement. La fonte GS est choisie pour cette application en raison de sa haute résistance à la traction, sa ductilité, et sa capacité à résister aux chocs thermiques.

II.3 Ou est-il situé ?

Le collecteur d'échappement est situé dans le compartiment moteur d'un véhicule. Plus précisément, il est attaché à la tête des cylindres du moteur. Sa position lui permet de collecter directement les gaz d'échappement issus de chaque cylindre, avant de les diriger vers le système

d'échappement principal du véhicule. En fonction du design du moteur, le collecteur peut être trouvé sur le côté, en haut ou à l'avant du bloc moteur..

II.4 Son fonctionnement

Le collecteur d'échappement joue un rôle essentiel dans les moteurs à combustion interne en collectant les gaz chauds et toxiques issus de la combustion dans chaque cylindre et en les acheminant vers le système d'échappement. Sa fonction principale est de faciliter l'évacuation efficace de ces gaz, ce qui contribue à réduire la contrepression dans le moteur, optimiser sa performance, et diminuer les émissions nocives. Conçu pour résister à de hautes températures et des conditions corrosives, le collecteur d'échappement assure également que les gaz passent par des traitements supplémentaires, comme la filtration via un catalyseur, avant leur rejet dans l'atmosphère, aidant ainsi à respecter les normes environnementales.

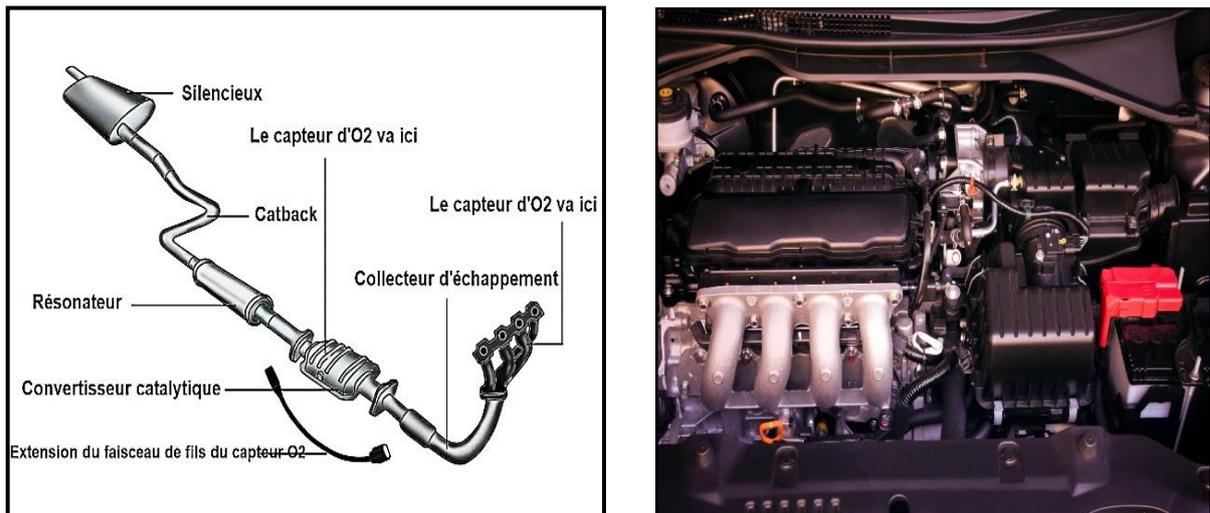


Figure II-1 : Schématisation d'un système d'échappement [31].

II.5 Carte technique de la pièce

Tableau II-1:caractéristique de la pièce.

Nuance	Nom de la pièce	Collecteur d'échappement
	Poids de la pièce	3.6Kg
	Dimension de châssis	410*325*120 mm
	Hauteur de la pièce	83,20 mm
	Nombre des pièces dans le moule	1
	Nombre des noyaux	1
	Temps de remplissage	10,17

II.6 Etapes de fabrication d'une pièce



Figure II-2 : Graphique de fabrication d'une pièce moulée.

II.7 Acquisition de la pièce d'origine

Nous avons obtenu un collecteur d'échappement authentique de la Citroën C3 pour servir de référence dans notre projet. Cette pièce nous permettra de réaliser une rétro conception précise en prenant les mesures nécessaires pour reproduire fidèlement sa géométrie. La figure (II-3) présente le collecteur d'échappement de la Citroën C3.

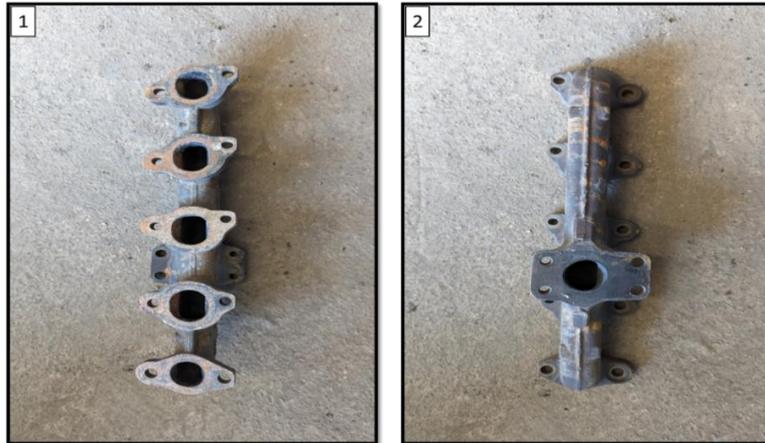


Figure II-3 : *Collecteur d'échappement de la Citroën C3.*

II.8 Prise de cotes par pied à coulisse

A l'aide d'un pied à coulisse de précision, nous avons effectué des mesures détaillées de toutes les dimensions pertinentes du collecteur d'échappement. Cela comprend les diamètres intérieurs et extérieurs des tubes, les épaisseurs de paroi, les angles de courbure et toutes les autres caractéristiques importantes.



Figure II-4 : *Pied à coulisse [35].*

II.9 Conception de collecteur d'échappement

II.9.1 Présentation du logiciel SOLIDWORKS

Le logiciel de CAO SolidWorks est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises [33].



Figure II-5 : Logiciel SOLIDWORKS.

II.9.2 Modélisation 3D

SOLIDWORKS adopte l'approche de modélisation 3D. Lorsque vous concevez une pièce, vous créez un modèle 3D, de l'esquisse initiale au résultat final. A partir de ce modèle, vous pouvez créer des mises en plan 2D ou contraindre des composants constitués de pièces ou de sous-assemblages afin de créer des assemblages 3D. Vous pouvez aussi créer des mises en plan 2D d'assemblages 3D [33].

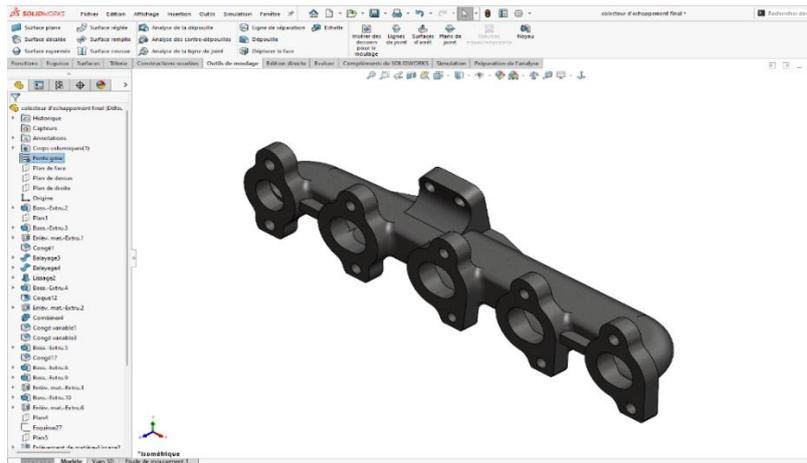


Figure II-6 : Modélisation 3D de collecteur d'échappement.

II.9.3 Fonctionnement

Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés. [33]

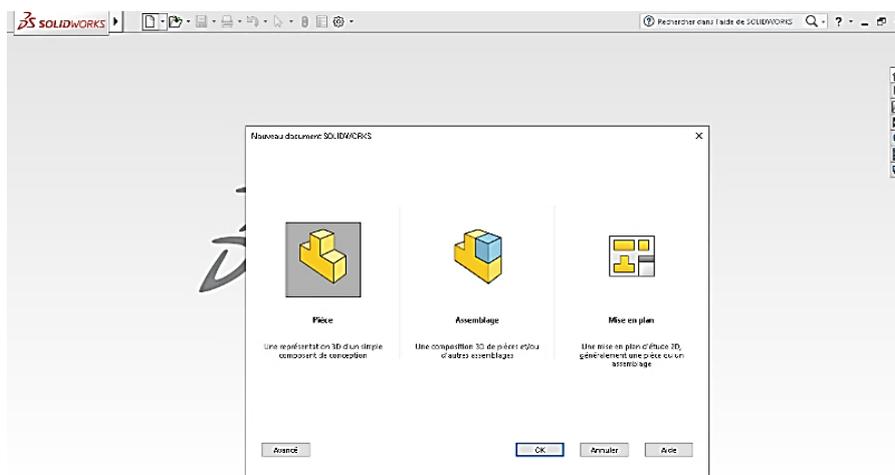


Figure II-7 : Types de fichiers de SOLIDWORKS.

II.9.4 Conception des pièces

Les pièces se conforment à partir d'une esquisse dessinée sur un plan. Cette esquisse 2D est obtenue par des formes géométriques simples comme lignes et cercles. Une fois l'esquisse prête, le logiciel offre plusieurs fonctions à exécuter. On peut la prolonger vers une direction (extrusion), la faire tourner autour d'un axe ou réaliser plusieurs autres opérations.

Le dessin est paramétré, c'est-à-dire qu'on peut modéliser la forme souhaitée sans se préoccuper des dimensions exactes. Les dimensions des différentes pièces peuvent être liées de façon que lorsqu'un change, les autres changent aussi [33].

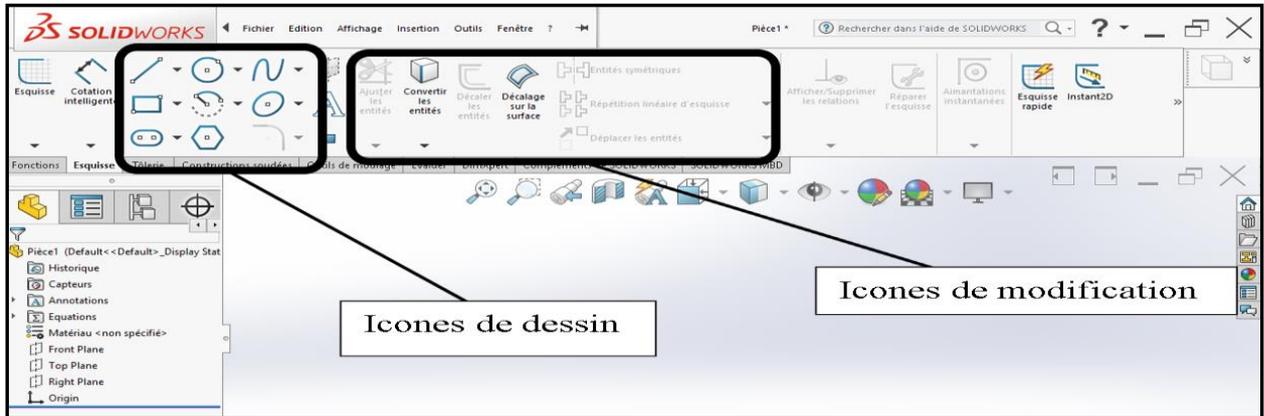


Figure II-8 : Barre d'outils d'esquisse

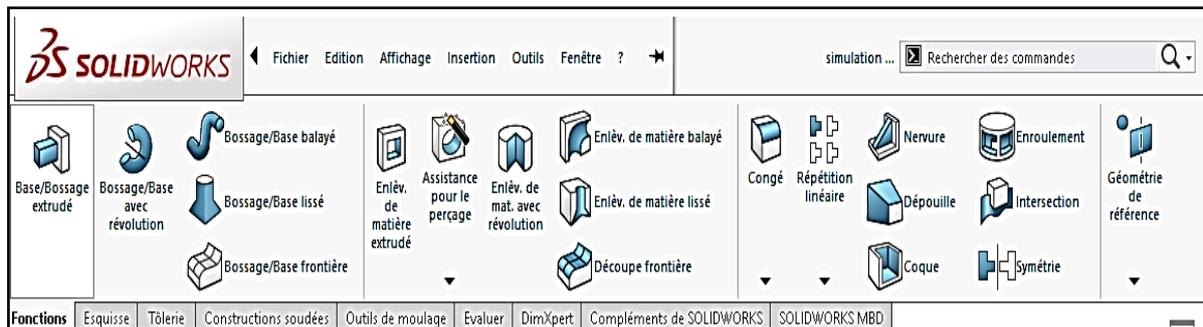


Figure II-9 : Barre des fonctions.

II.9.5 Assemblage

À mesure qu'on réalise les pièces, on peut les assembler dans un nouveau fichier qui contiendra seulement les contraintes et rapports qu'on a imposé aux pièces. Les contraintes définissent la position des pièces dans l'ensemble et les liaisons entre elles. On peut donc imposer que deux pièces soient concentriques, que deux surfaces soient coplanaires ou par exemple que la distance entre deux surfaces soit déterminée.

On peut créer un assemblage d'assemblages et comme cela construire des grands ensembles de façon structurée et ordonnée [33].

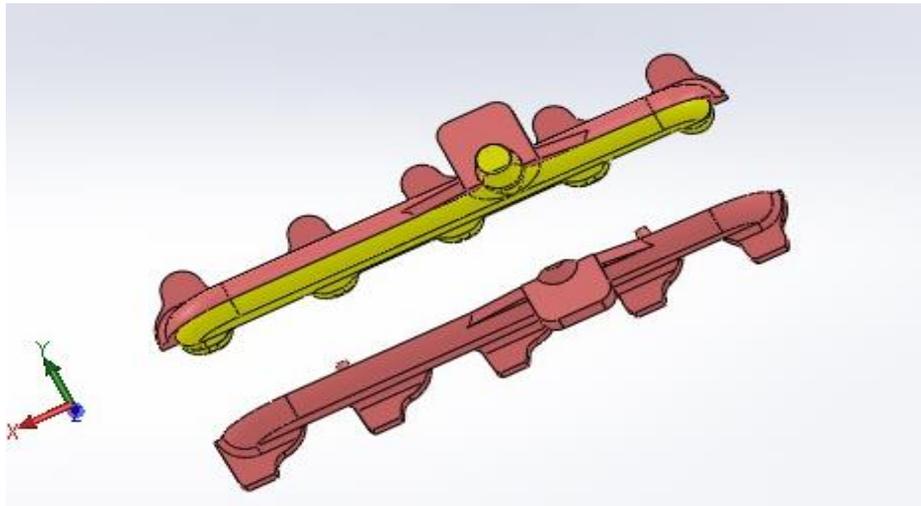


Figure II-10 : Assemblage (Modèle avec le Noyau).

II.9.6 Mise en plan

Pour que l'atelier puisse réaliser les pièces, il a besoin de plans en 2D plutôt que d'un dessin tridimensionnel dont la cotation serait assez confuse. SolidWorks possède un module capable de projeter des vues de pièces ou d'ensembles sur un plan. Ensuite on peut faire des coupes et d'autres opérations pour mieux représenter la pièce sur le plan.

La cotation est automatique même si elle n'est pas toujours optimisée pour l'usinage. Un changement sur une cote du plan entraîne la modification automatique de cette dimension sur la pièce d'origine et vice-versa [33].

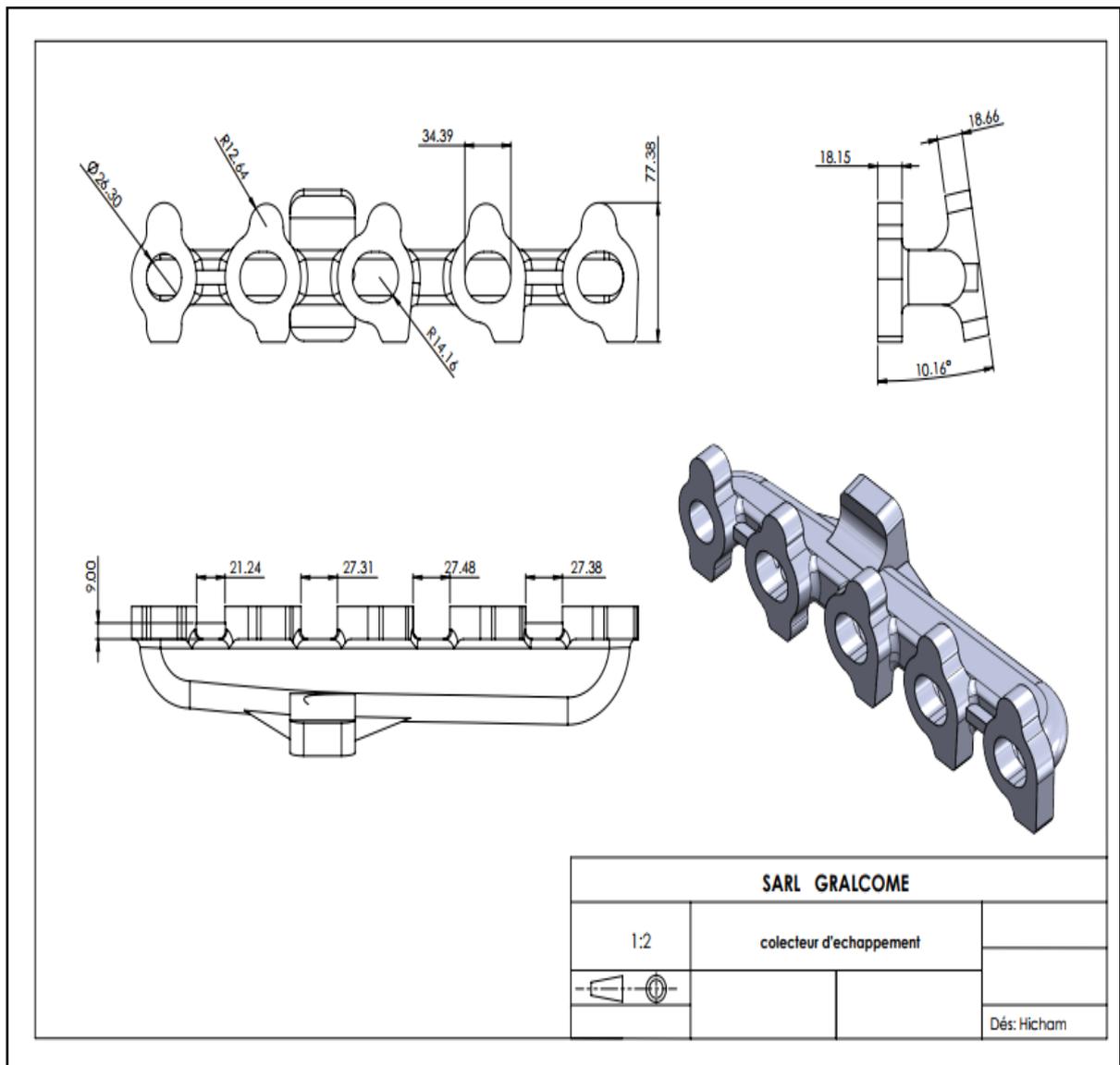


Figure II-11 : Mise en plan de collecteur d'échappement.

II.10 Conception du collecteur d'échappement avec SOLIDWORKS

II.10.1 Esquisse initiale

Utilisez SolidWorks pour créer une esquisse de base de la pièce. Comme tu vue dans la (Figure II-12)

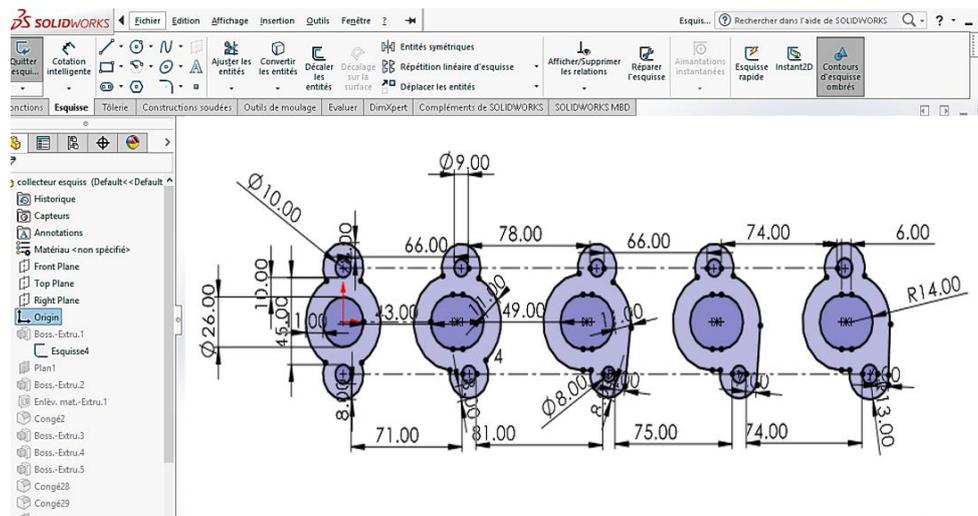


Figure II-12: Esquisse de base.

Utiliser la barre de fonction base/bossage extrude qui crée une fonction volumique en extrudant une esquisse ou les contours d'esquisse sélectionnés dans une ou deux directions.

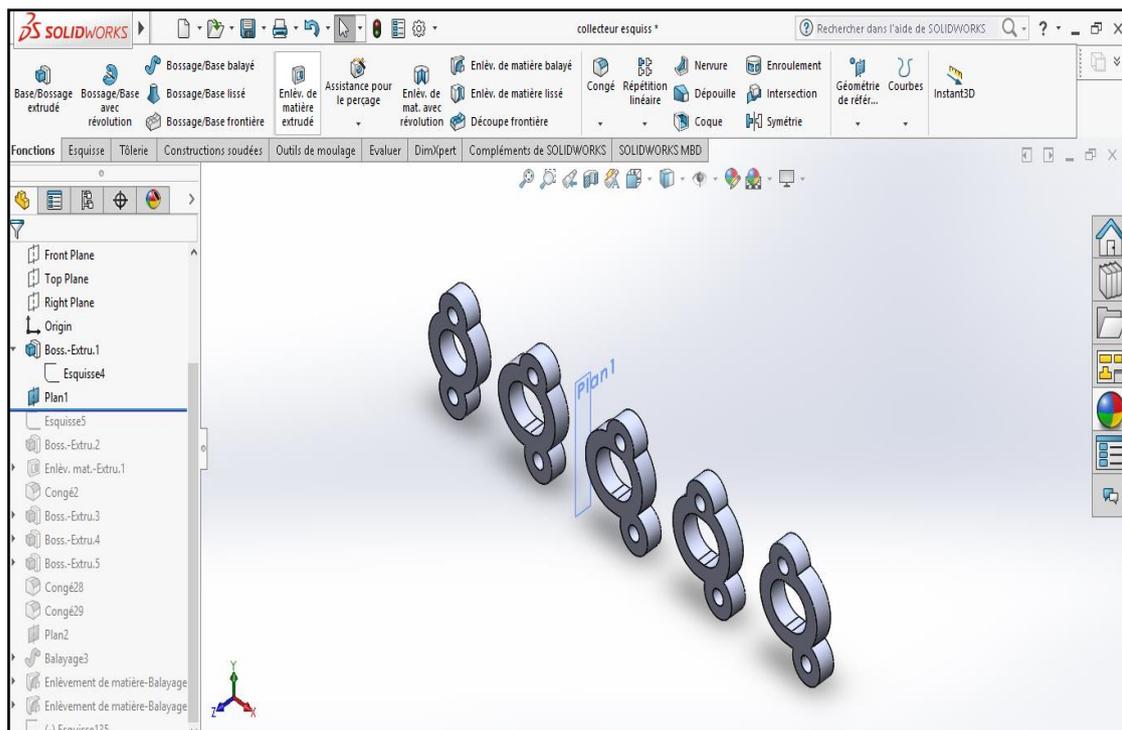


Figure II-13 : Fonction base/bossage.

On a utilisé la fonction de géométrie de référence pour créer un nouveau plan et dessiner la plaque à symétrie de ce plan.

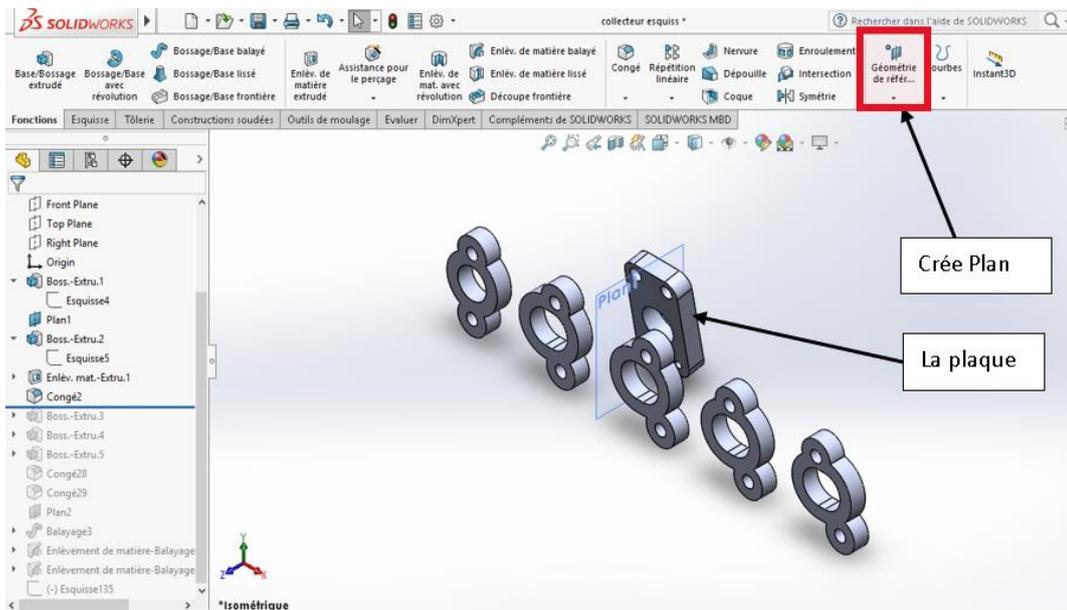


Figure II-14 : Fonction crier plan.

Avec les esquisses préparées, Utilisez les fonctionnalités de SolidWorks comme le "Balayer" (balayage) pour créer des tubes qui suivent les trajectoires esquissées.

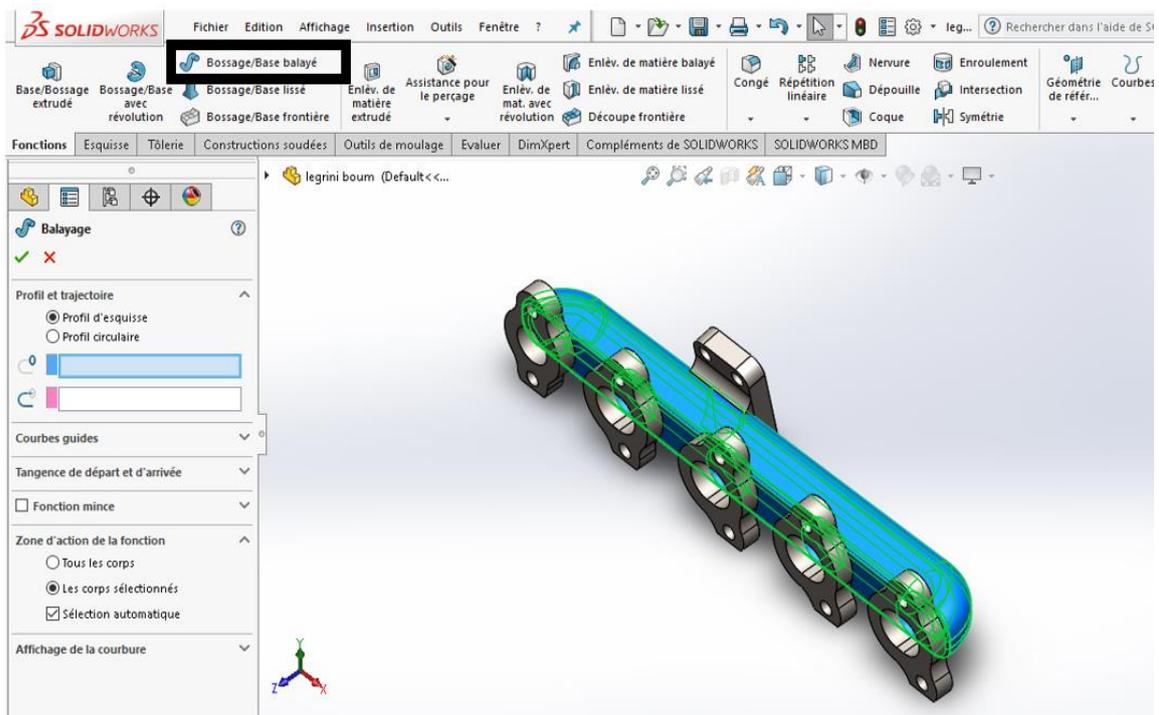


Figure II-15 : Esquisses balayage.

II.11 Conception de la pièce

À l'aide de SolidWorks, nous avons fait la conception d'un collecteur d'échappement à base de différents critères techniques et esthétiques. Le logiciel nous a permis de créer un modèle 3D détaillé, incluant les dimensions exactes et les propriétés matérielles., optimisant ainsi sa conception pour des conditions de fonctionnement réelles.

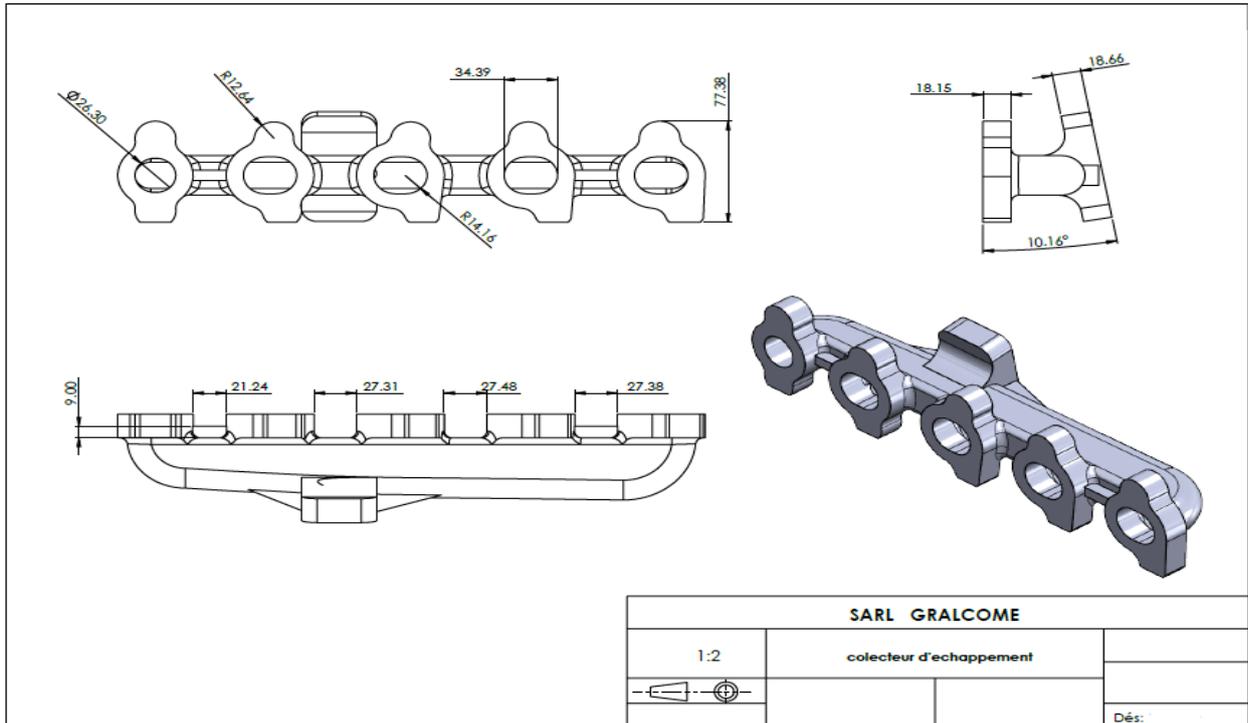


Figure II-16 : Dessin de définition de collecteur d'échappement sur SOLIDWORKS.

II.12 Modelage

Le modèle de moulage en bois reproduit fidèlement la pièce à couler, étant réalisé en bois dur et utilisé dans le processus de moulage en fonderie. Fabriqué selon des techniques de menuiserie telles que le sciage et le ponçage, il est assemblé en une seule pièce ou en plusieurs parties pour correspondre précisément aux contours de la pièce finale. Après assemblage, il est couramment revêtu de vernis ou de laque pour protéger le bois et améliorer son aspect.

Ce modèle en bois est ensuite disposé dans une boîte à mouler où du sable de fonderie est compacté. Une fois la conception de la pièce établie, nous avons procédé à sa modélisation détaillée sur SolidWorks. Ce processus a impliqué la création de toutes les caractéristiques et

détails spécifiques du collecteur, incluant les connexions pour les tubes d'échappement, les courbes optimisées pour le flux d'air, et les supports de fixation. En exploitant les fonctionnalités avancées de modélisation de SolidWorks, nous avons pu générer un modèle précis et fonctionnel du collecteur pour former le moule. Une fois durci, le moule en bois est retiré, laissant une cavité où le métal en fusion est versé pour former la pièce finale.

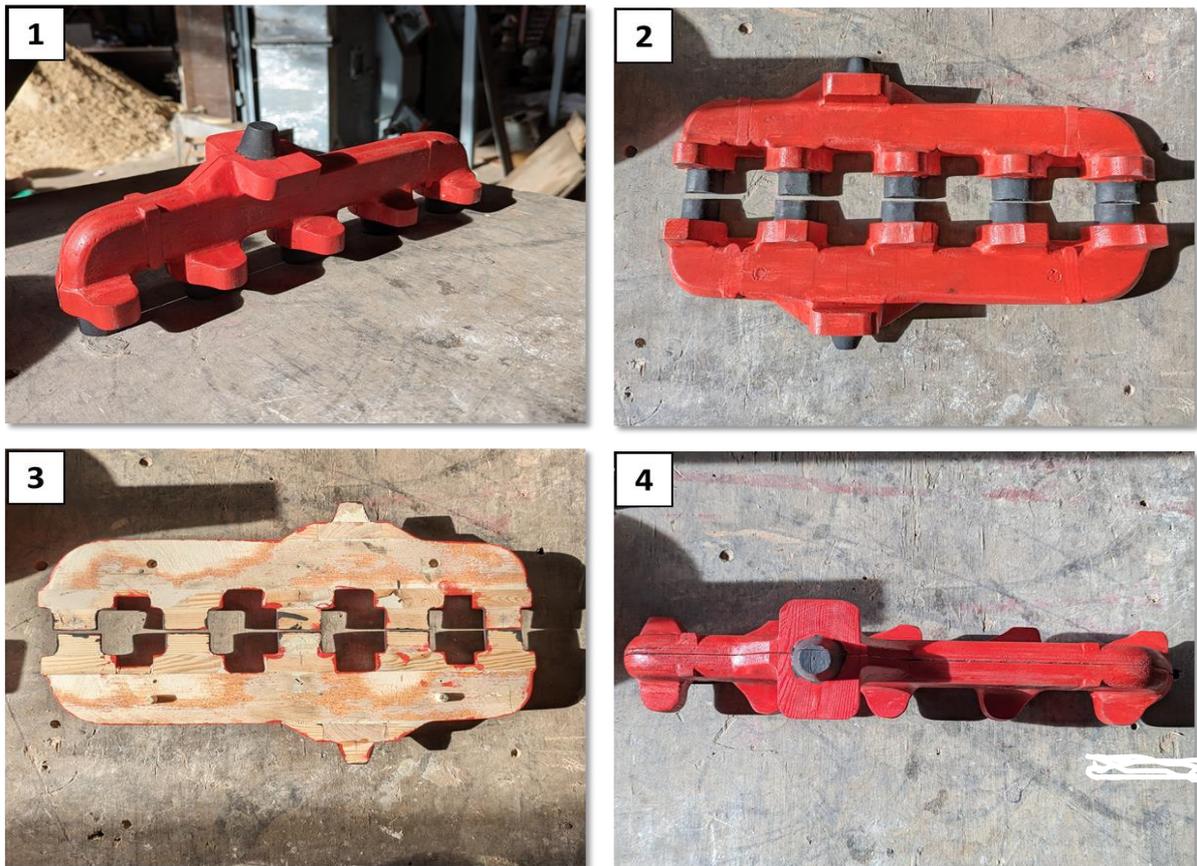


Figure II-17 : Modèle du collecteur d'échappement en bois.

II.13 Conception de boîte à noyau

La conception d'une boîte à noyau pour des noyaux en sable à l'aide de SolidWorks nécessite l'utilisation de cet outil de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) pour créer un modèle détaillé de la boîte à noyau, intégrant les spécificités de la pièce à mouler ainsi que les exigences précises du noyau en termes de forme et de dimensions. SolidWorks offre des fonctionnalités avancées de modélisation qui permettent d'incorporer des éléments tels que les canalisations

pour l'injection du matériau fondu, les évents pour l'évacuation des gaz et les supports nécessaires pour stabiliser le noyau pendant le processus de moulage.

Cette modélisation permet également d'optimiser la conception pour assurer un remplissage homogène du moule et une qualité optimale de la pièce moulée. En somme, l'utilisation de SOLIDWORKS pour concevoir des boîtes à noyau de noyaux en sable propose une approche précise et efficace pour répondre aux exigences spécifiques de la fonderie, tout en garantissant la qualité et la précision des pièces fabriquées.

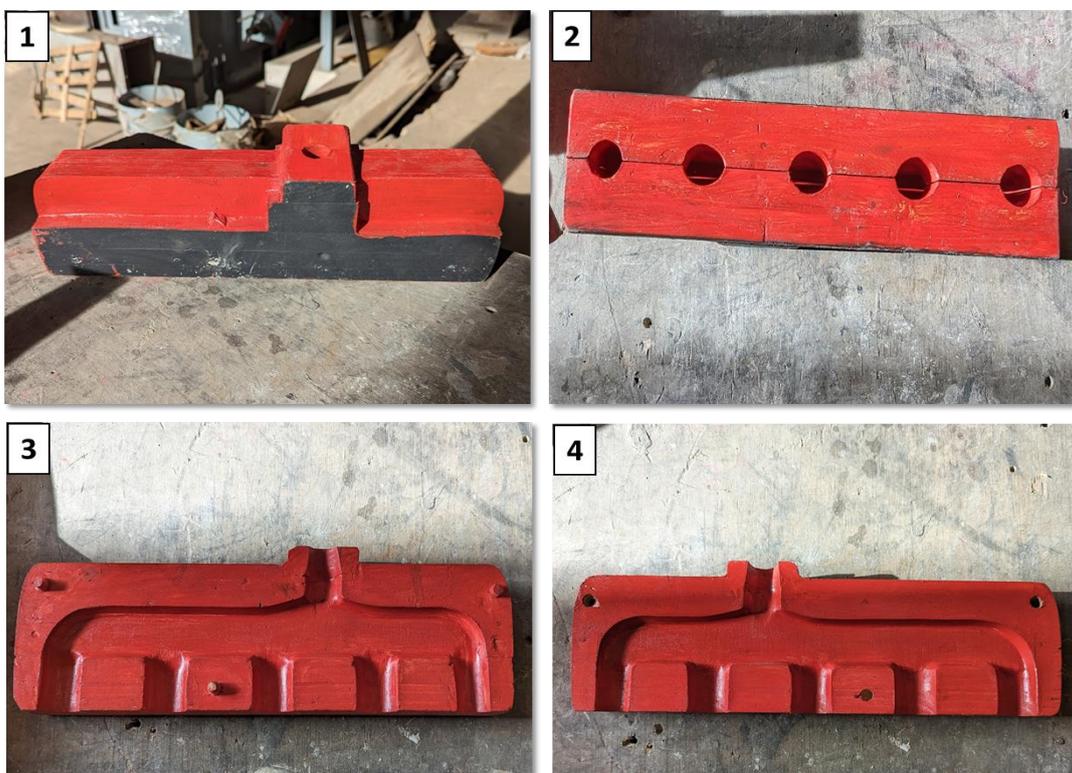


Figure II-18: Boîte à noyau d'un collecteur d'échappement.

II.14 Noyautage

En fonderie, un noyau est un composant d'un moule, fait en sable, et permettant de réaliser des évidements intérieurs de la pièce ou des zones en contre-dépouille. On le réalise en moulant dans une boîte à noyaux (en bois, plastique ou métal). Suivant la complexité de la pièce à réaliser, un ou plusieurs noyaux pourront être requis lors de la fabrication du moule.

Le sable utilisé pour la fabrication doit posséder de meilleures propriétés technologiques par rapport à celles du sable de moulage ; on utilise toujours du sable neuf, Ainsi le sable durcissant à chaud (procédé Corning) conviendra mieux.

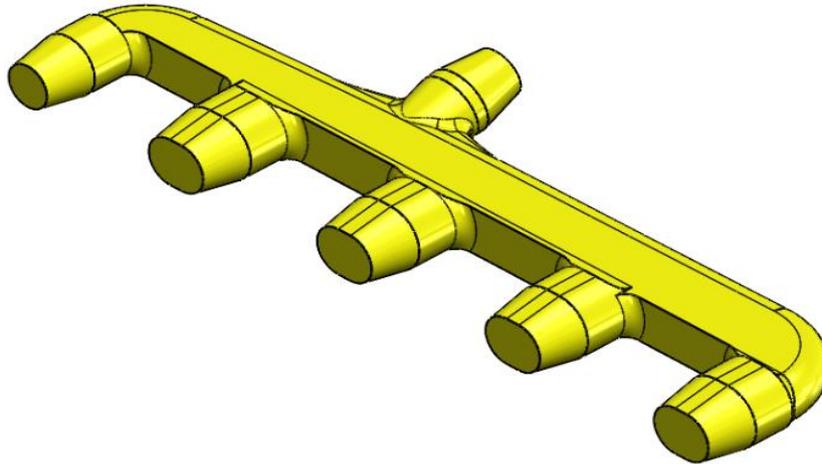


Figure II-19 : Noyau.

- **Sa composition est la suivante**

Tableau II-2 : Composition de sable de noyautage.

Sable neuf	Bentonite	Dextrine	Huile de lin	Eau
87%	4%	3%	3%	3%

II.14.1 Choix du procédé de moulage

Le moulage au sable est une technique couramment utilisée pour la production de pièces en fonte. Ce procédé est particulièrement adapté pour les pièces de grande taille et de géométrie complexe. Le moulage au sable pour la fonte est un procédé polyvalent et économique, adapté à la production de pièces de grande taille et de formes complexe

II.14.2 Système de coulée et d'alimentation

Le système de coulée latérale est le meilleur, car il nous assure une bonne alimentation avec une solidification dirigée et une amenée calme du métal ; il est composé de :

- Un entonnoir ; ■
- Une descente ; ■
- Un chenal ; ■
- Huit attaques ; ■
- Talon de coulée. ■

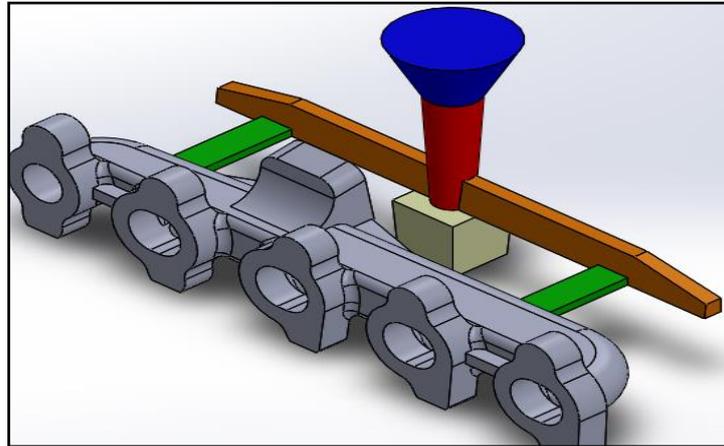


Figure II-20 : Système de coulée et d'alimentation.

II.14.2.1 Entonnoir

L'objectif de ce dispositif est de permettre une introduction fluide du métal dans la moule à un débit optimal, sans provoquer d'éclaboussures, tout en prévenant les entrées d'air indésirables. De plus, il vise à intercepter les impuretés telles que les résidus, la mousse et les écumes susceptibles de s'échapper de la poche, réduisant ainsi les effets néfastes du mouvement du métal à l'intérieur de la moule.

II.14.2.2 Descente de coulée

C'est un canal vertical qui relie l'entonnoir au talon de coulée. On choisit une descente de section transversale circulaire qui permet de réduire la chute de température, les pertes de charges aussi d'éviter l'érosion et les chocs dans le fond du moule.

II.14.2.3 Talon de coulée

Le talon de coulée est une partie spécifique du canal d'alimentation (ou système de coulée) utilisée dans les procédés de moulage en sable. Cette section est typiquement un élargissement ou une cavité située à la base du canal de coulée, conçue pour ralentir et rediriger le flux de métal en fusion avant son entrée dans la cavité de moulage principale. Ce dispositif permet de

réduire les turbulences et les inclusions d'air, garantissant ainsi un remplissage plus homogène et de meilleure qualité de la cavité de moulage.

II.14.2.4 Chenal

Le canal horizontal, un élément crucial dans le processus de coulée, assure la liaison entre la descente et les attaques. Son objectif premier consiste à capturer les scories ainsi que les inclusions non métalliques, contribuant ainsi à la qualité du matériau coulé.

II.14.2.5 Attaques de coulée

Ces conduites dirigent le métal liquide vers la cavité du moule, et leur fonction est de garantir les aspects suivants :

- Un remplissage exhaustif et précis ;
- Faciliter un ébarbage sans danger ;
- Introduire le métal dans le moule sans altérer la pièce elle-même.

II.15 Réalisation d'étude de moulage

Il faut faire la réalisation de l'étude de moulage avec :

- Les nécessités de fonderie tel que : Surépaisseur d'usinage, dépouilles, cassures des angles vifs ...etc.
- Le nombre des pièces dans un châssis.
- Le marquage (référence de la pièce).

II.16 Calcul des systèmes de coulée

On calcule la section globale des attaques pour des moyennes et grosses pièces coulée par la vitesse spécifique de coulée à l'aide de la formule suivante :

$$S_a = \frac{G_{pc}}{(\tau \times K_s)} \text{ en cm}^2$$

G_{pc} : la masse de la pièce coulée en **kg**.

τ : le temps de coulée en sec, on le détermine par la formule suivante :

$$\tau = 1.11 \times x \times \sqrt{Gpc} \text{ , en sec.}$$

Gpc : la masse de la pièce coulée en **kg**.

X : coefficient, que l'on choisit en fonction de l'épaisseur des parois de la pièce coulée

Tableau II-3: Epaisseur de paroi en fonction de coefficient X.

Epaisseur de paroi (mm)	2.5 – 3.5	3.5 – 8.0	8.0 – 15
X	5.8	4.9	4.3

Ks : la vitesse spécifique de coulée, en $\text{kg/cm}^2 \cdot \text{s}$.

Pour déterminer la vitesse spécifique de coulée on utilise cette courbe :

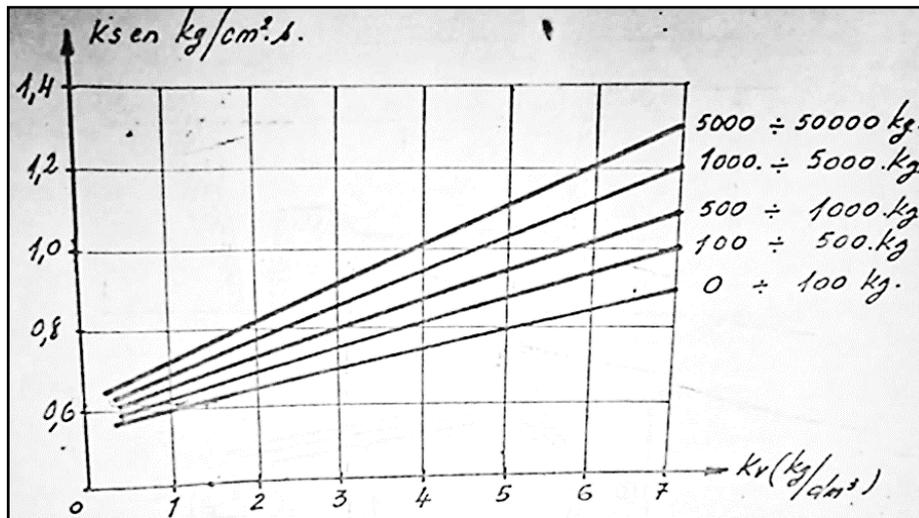


Figure II-21 : Courbe de K_s en fonction de la densité relative de la pièce coulée K_v .

II.16.1 Application numérique

- Calcule la section d'attaque :

$$S_a = \frac{G_{pc}}{(\tau \times K_s)} \dots\dots\dots (1)$$

$$G_{pc} = 3,5 \text{ kg}$$

$$\tau = 1.11 \times x \times \sqrt{G_{pc}} \dots\dots\dots (2)$$

Apart ire (2) $\tau = 1.11 \times 4,9 \times \sqrt{3,5} = 10,17 \text{ s.}$

K_s à partir de la courbe est égale **0.4 Kg.cm⁻².s⁻¹** (3)

- En remplacer (2) et (3) dans (1) on obtient :

$$S_a = \frac{3.5}{(10.17 \times 0.4)} = 0,86 \text{ cm}^2 \approx 1 \text{ cm}^2$$

Pour calculer les sections globales de système de coulée on applique le rapporte suivant :

$$\Sigma S_a : \Sigma S_c : \Sigma S_d = 1 : 1.2 : 1.4 \dots\dots\dots (4)$$

S_c : section de chenal

S_d : section de la descends de coulé

Comme nous choisissons deux attaques donc :

- Section globale des attaques

$$\Sigma S_a = 1 \times 2 = 2 \text{ cm}^2$$

- Section globale de chenal

$$\Sigma S_c = \Sigma S_a \times 1.2 = 2.4 \text{ cm}^2$$

- Section globale de descends

$$\Sigma S_d = \Sigma S_a \times 1.4 = 2.8 \text{ cm}^2$$

Entonnoir : La hauteur de l'entonnoir est égale le diamètre, et le diamètre de l'entonnoir (De) est égale 3.5 fois le diamètre supérieur de la descente (D).

$$\sum sd = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = 2.13 \text{ cm}$$

$$De = 3.5 \times 2.13 = 7.46 \text{ cm}$$

II.16.2 Résultat

Tableau II-4 : Résultat des calculs de système de coulée.

Sa (cm ²)	2Sa (cm ²)	Sc (cm ²)	Sd (cm ²)	D (cm)	De (cm)
1	2	2.4	2.8	2.13	7.46

II.17 Détermination du plan de joint

Le plan de joint du moule est choisi en fonction de la forme de la pièce. Il doit tenir compte :

- Du remplissage de l'empreinte (jet de coulée).
- Du démoulage de la pièce.
- La limite des opérations d'ébarbages.

Dans notre cas, il divise la pièce en deux parties.

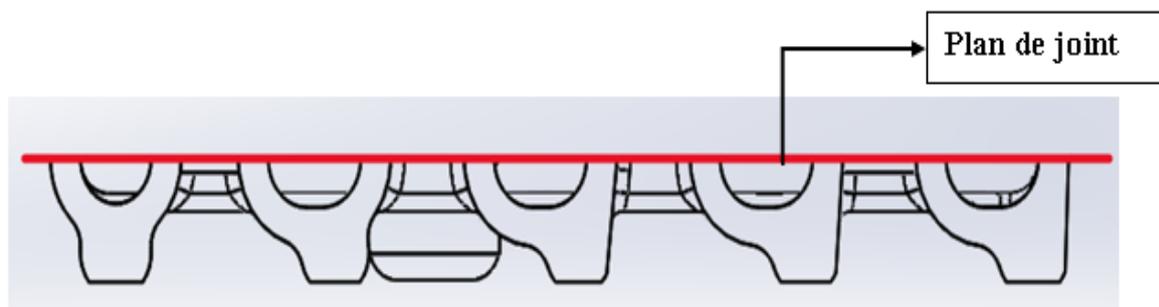


Figure II-22: Plan de joint.

II.18 Dépouilles

Les contours du modèle doivent être conçus de manière à permettre son retrait du sable sans altérer le moule. À cette fin, une inclinaison spécifique est appliquée aux parois du modèle, orientées dans la direction du démoulage lors de la position de moulage (cette inclinaison est désignée sous le terme de "dépouille"). Les surfaces et les formes qui entravent le démoulage et l'extraction sont qualifiées de "contre-dépouille ».

Pour notre cas la valeur de dépouille est égale 2.5° .

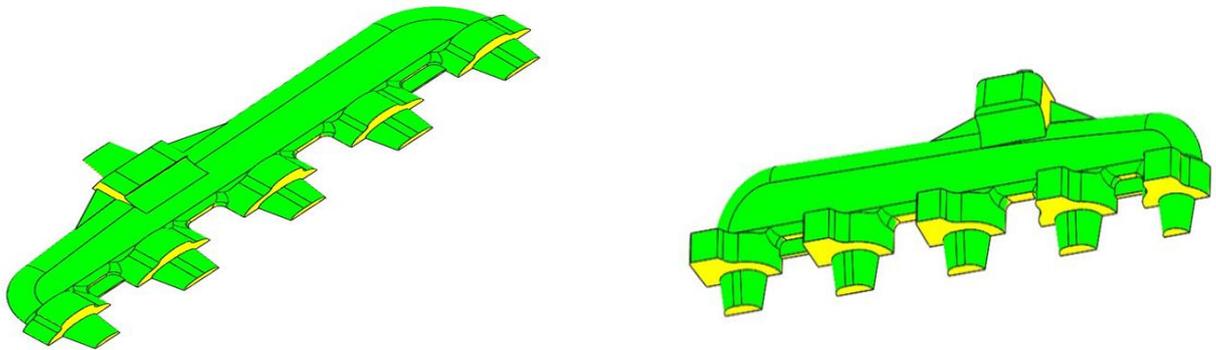


Figure II-23 : Analyse de la dépouille.

La Figure (II -23) montre le résultat d'analyse de la dépouille par rapport la détraction d'ouverture de moule (démoulage)

II.19 Retrait

Le retrait des pièces coulées est en fonction de :

- Nature de l'alliage ;
- Dimension de la pièce ;
- Compressibilité des moules et des noyaux.

II.19.1 Surépaisseur d'usinage

La surépaisseur d'usinage dépend de la méthode de moulage de l'alliage coulé, de la précision de la pièce, des dimensions de la pièce et de la position de la surface usinée. Dans notre cas, la surépaisseur d'usinage est 2 mm à 3mm.

II.20 Dessiner le système de coulée

Après avoir effectué les calculs pour les systèmes de coulée et réalisé l'analyse des contre-dépouilles, nous modélisons le système de coulée sur SolidWorks, comme illustré par les images.

Cette étape inclut la définition précise des dimensions et des angles des canaux de coulée pour optimiser le flux de métal liquide.

Des itérations successives permettent d'affiner la conception afin de garantir une performance optimale et une qualité homogène de la pièce moulée.

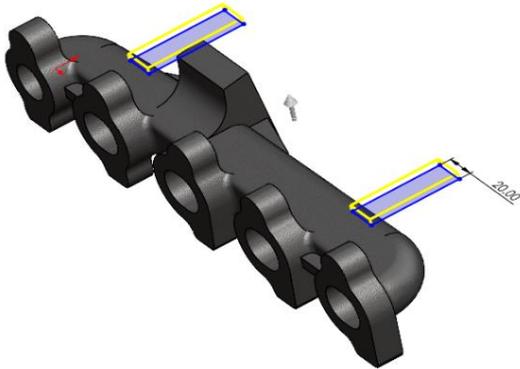


Figure II-24: Attaques de coulée.

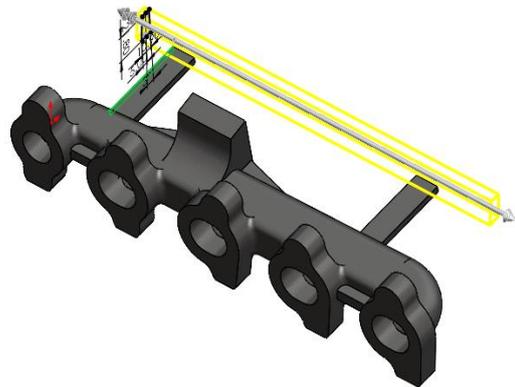


Figure II-25: Chenal.

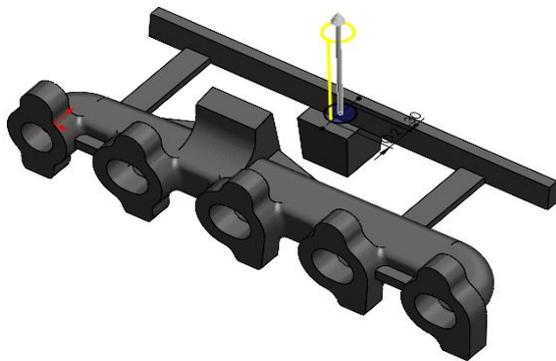


Figure II-26 : Descends de coulé.

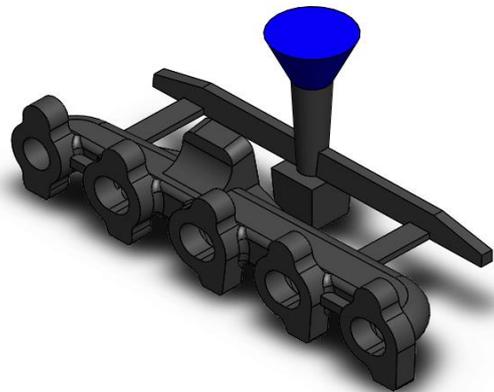


Figure II-27:Entonnoir.

II.20.1 Choix des châssis

C'est un cadre rigide fabriqué en acier, sans fond, destiné à contenir et à soutenir le sable constituant le moule. Un châssis complet comprend au moins deux parties

- Partie supérieure (châssis de dessus).
- Partie inférieure (châssis de dessous).

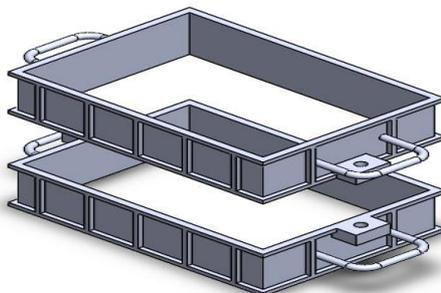


Figure II-28 : Châssis de moulage.

II.21 Position de la pièce dans le moule

En fonction de la forme et de la complexité de la pièce, la disposition de celle-ci doit assurer :

- La solidification dirigée ;
- Les parties importantes de la pièce doivent être disposées dans les parties inférieures du moule.

Pour notre cas, la seule et unique position acceptable est celle est représentée car elle assure la stabilité des noyaux pendant la coulée et répond aux exigences précédentes. On a choisi de disposer deux pièces par moule

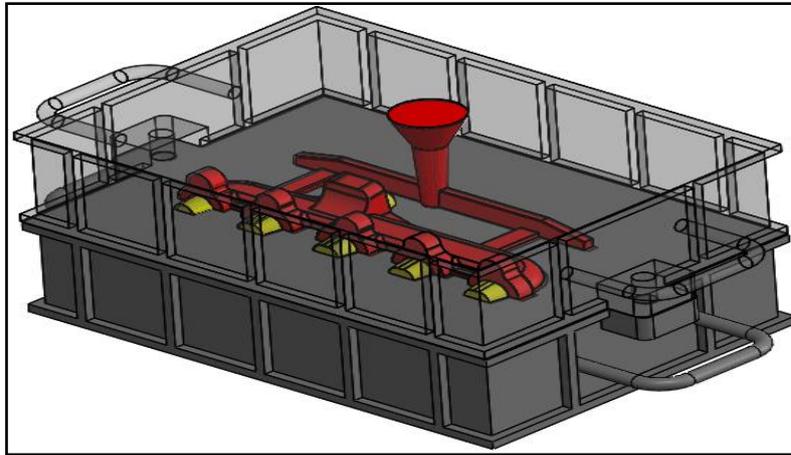


Figure II-29 : Position de la pièce dans le moule.

II.22 Conclusion

Le chapitre II a exploré la conception et l'étude des collecteurs d'échappement, en soulignant leur importance pour améliorer les performances des moteurs et réduire les émissions. La fabrication du collecteur en fonte GS par moulage en sable débute par la conception assistée par ordinateur (CAO) avec SOLIDWORKS, suivie de la création d'un modèle de moulage en sable. La fonte est ensuite coulée dans le moule pour former le collecteur. Le processus inclut le refroidissement, l'ébavurage et le traitement thermique. La position stratégique du collecteur dans le moule et un système de coulée bien conçu assurent une répartition uniforme du métal, minimisant les défauts et optimisant la qualité du produit final.

**Chapitre III : Modélisation, simulation sous logiciel
PROCAST**

III.1 Modélisation de la phase de moulage sous PROCAST

III.1.1 Présentation du logiciel PROCAST

Le logiciel PROCAST est une solution de simulation spécialisée dans le domaine de la fonderie, visant à modéliser le comportement du métal pendant la coulée en tenant compte de divers paramètres environnementaux tels que la compaction du sable, sa granulométrie, la pression, ainsi que les caractéristiques mécaniques, chimiques et la perméabilité, sans oublier la température. Cet outil permet aux ingénieurs de fonderie de résoudre rapidement les problèmes liés au retrait du métal, à la porosité et à d'autres défauts, les aidant ainsi à identifier et à corriger les sources de ces défauts.

Les résultats générés par ce logiciel fournissent des détails sur la trajectoire et le mouvement du métal dans le moule en sable, ainsi que sur la température de solidification. Cette analyse permet de localiser les derniers points chauds (zones contenant des retassures) et d'identifier les défauts de fonderie en général. En conséquence, les pièces produites sont exemptes de rebuts, ce qui réduit les coûts et les délais de production, tout en améliorant la qualité des pièces pour répondre aux exigences souhaitées.



Figure III-1 : Présente logiciel PROCAST.

Pour commencer à étudier et faire la simulation d'une pièce sous logiciel PROCAST, les procédures sont comme ce suit : Apres avoir ouvert la fenêtre de logiciel PROCAST.

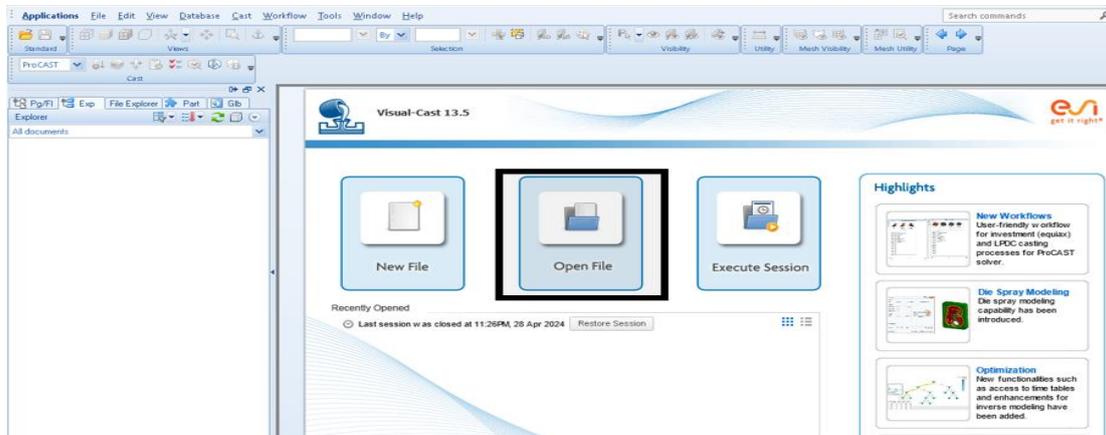


Figure III-2 : Interface du logiciel PROCAST.

III.2 Etapes à suivre pour l'utilisation du logiciel

On importe le fichier de la pièce à étudier sous format IGS (Initial Graphics Exchange Spécification)

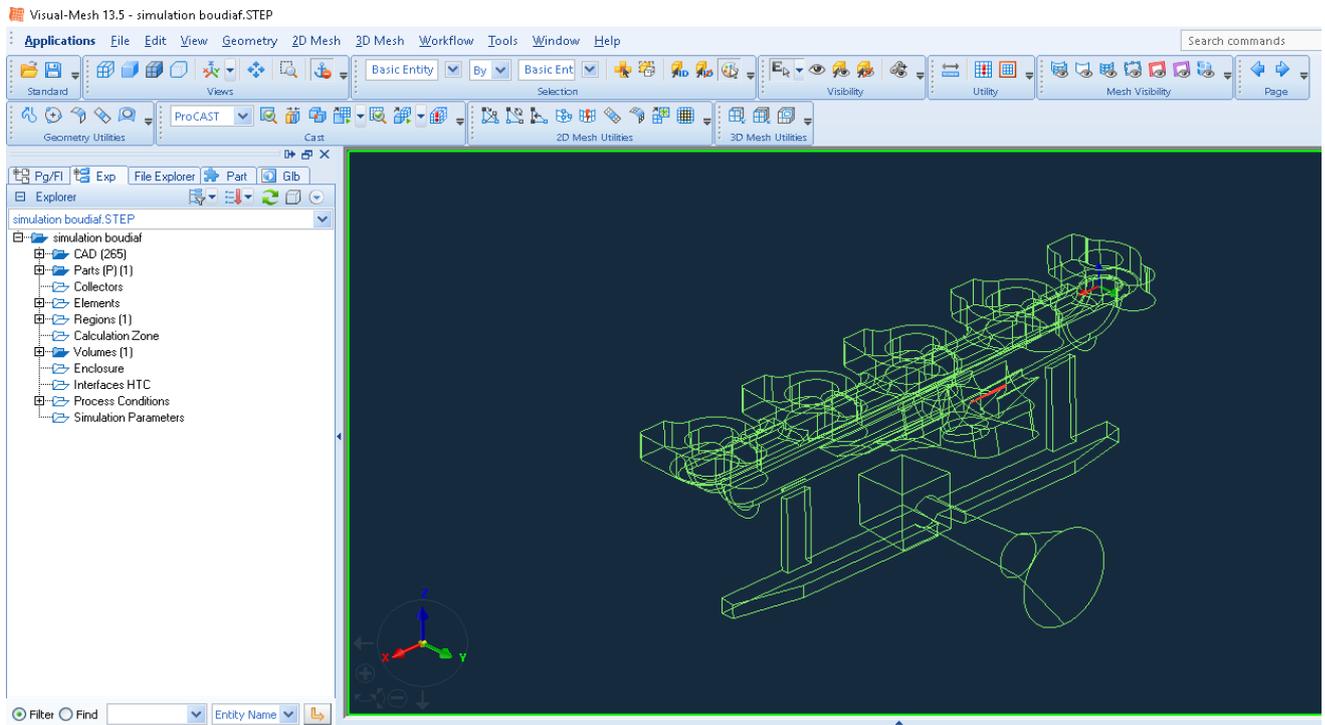


Figure III-3 : Interface utilisateur PROCAST.

III.2.1 Maillage

Un maillage consiste en la discrétisation spatiale d'un milieu continu ou en une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments finis. L'objectif d'un maillage est de simplifier un système en créant un modèle qui le représente, ainsi que son environnement (le milieu), dans le but de réaliser des simulations ou des représentations graphiques.

Cette méthode permet d'identifier les zones les plus sollicitées à l'apparition de retassures ou de bulles de gaz, qui pourraient provoquer des porosités sur la pièce. (Figure III :4).

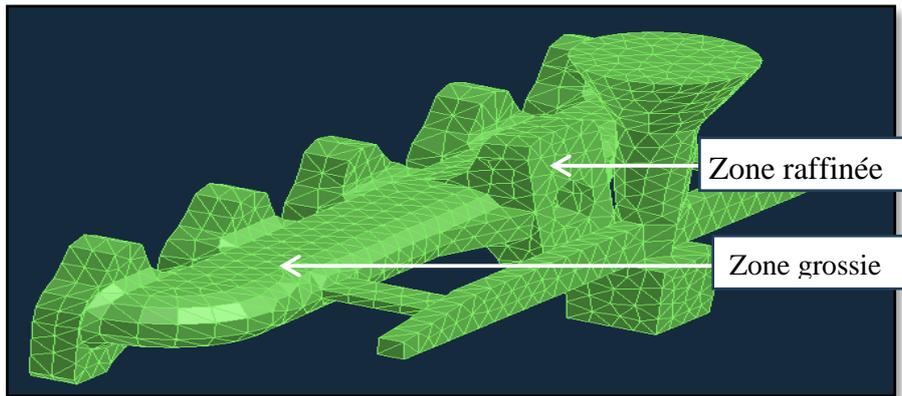


Figure III-4 : Zones les plus sollicitées à la rupture.

Dans une simulation par éléments finis, le produit est modélisé par un maillage, c'est à dire un ensemble de nœuds et des éléments. Le choix du maillage détermine notamment les fonctions de bases qui représentent les champs de déplacement, et a donc une influence considérable sur les résultats.

La figure représente les mailles de la pièce ce forme triangle avec le logiciel PROCAST.

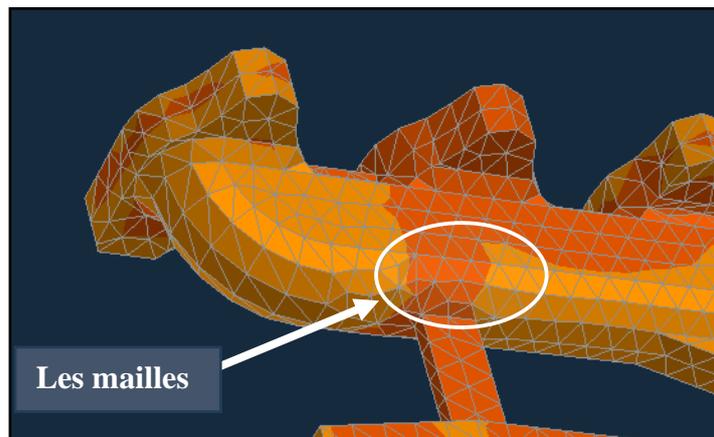


Figure III-5 : Observation des mailles.

Un maillage est défini par

- Son repère.
- Les points qui le constituent, définis par leurs coordonnées dans un espace donné.
- Les cellules, formées par des polygones reliant un nombre spécifique de ces points.
- Sa dimension, généralement 2D ou 3D, déterminant la nature de l'espace qu'il représente.
- Son volume, représentant l'étendue totale couverte par le maillage dans cet espace.
- Sa finesse, mesurée par la surface ou le volume moyen des cellules qui le composent, reflétant la précision du maillage.
- La géométrie des cellules, pouvant être surfacique (avec des formes comme des triangles, des quadrilatères, des parallélogrammes, des rectangles ou des carrés) ou volumique (avec des polygones, des tétraèdres, des prismes, des hexaèdres comme les parallélépipèdes ou les cubes, ou encore des polyèdres).
-

III.2.1.1 Types de maillage

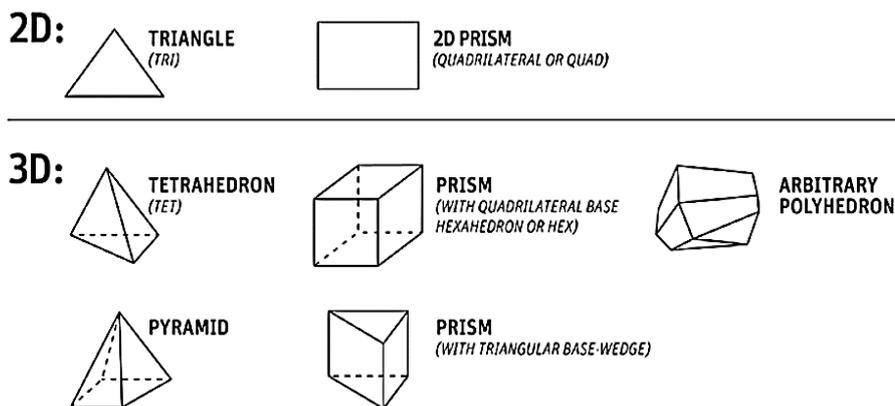


Figure III-6 : Types de maillage.

Le maillage est crucial dans la méthode des éléments finis, consistant en la discrétisation de la géométrie de la pièce en petits éléments, appelés éléments finis. La qualité de ce maillage a

un impact direct sur la précision et la rapidité des calculs. Des éléments bien conçus et bien agencés permettent une convergence plus rapide des résultats et diminuent les erreurs numériques pouvant compromettre la fiabilité des simulations. En respectant certains critères de maillage, tels que la taille des éléments, la régularité de leur forme et leur distribution, on garantit que le modèle numérique reflète fidèlement le comportement physique de la pièce étudiée. Cela permet d'obtenir des résultats plus précis et fiables pour les analyses et les simulations.

III.2.2 Simulation de remplissage de moule sous PROCAST

Le logiciel PROCAST permet de segmenter le processus de coulée pour suivre le cheminement du métal dans la pièce, en surveillant le remplissage initial et final ainsi que les différentes phases de solidification dans le moule. Un remplissage correct du moule est essentiel pour prévenir :

- a) Un débit insuffisant pour remplir l'empreinte,
- b) Les risques de défauts de moulage,
- c) Les risques de formation de soufflures,
- d) Les risques de fractures,
- e) La solidification prématurée,
- f) Une pression de coulée insuffisante,
- g) L'emprisonnement d'air,
- h) Les contraintes excessives sur les noyaux.

Après avoir entré les paramètres nécessaires, il est obtenu divers résultats, tels que :

- Les cartes de température,
- Les états de la matière : liquide, solide, intervalle de solidification (fraction de solide),
- Les points chauds,
- Le gradient de température,
- La vitesse de refroidissement,
- Les retraits,
- Les fonctions critères : porosité.



Figure III-7 : Etapes de Simulation.

Avant de commencer la coulée du métal, on doit sélectionner la direction du vecteur de gravité:

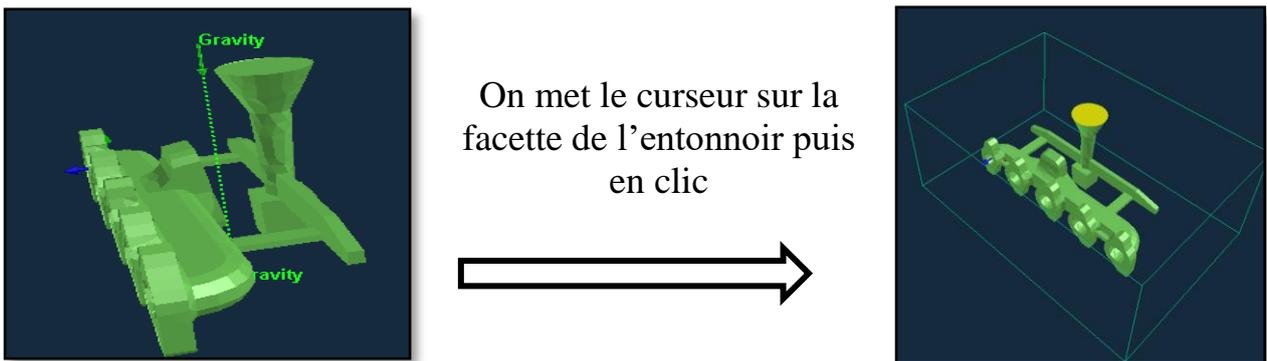


Figure III-8 : Direction de gravité.

Il est important de calculer le débit massique (**Qm**) qui est la quantité de masse à remplir par unité de temps est donné par : $Qm = \frac{m}{t}$

En moulage gravitaire au sable, les temps de remplissage sont généralement de **5s** à **12s** pour les pièces courantes.

Nous avons pris pour notre pièce un temps de remplissage de **10,17s** donc notre débit sera de

$$Qm = \frac{2 \times 3,4}{10,17} = 0,6 \text{ kg/s}$$

Il est essentiel de s'assurer que le temps de remplissage n'est pas trop court pour éviter l'érosion du moule. En général, la vitesse du métal ne doit pas dépasser 1 m/s. Une fois les paramètres de la pièce définis (type de matériaux, températures, fraction solide, gravité, etc.) et les conditions d'entrée du métal dans les moules déterminées, il est nécessaire de concevoir un volume d'entrée conique adapté à la taille et à l'emplacement de la coulée de métal.

III.2.3 Résultat de simulation de la coulée

Pour réussir cette opération, il est primordial que le métal liquide dispose de suffisamment de temps pour remplir entièrement l'empreinte avant de commencer à se solidifier.

III.3 Simulation 1

III.3.1 Analyse des images de coulée

Les images de 1. 2 et 3 montrent le début de remplissage de l'empreinte. L'image 4 montrent la fin du remplissage (figureIII-9).

L'habileté du fondeur réside dans prélever précisément la quantité nécessaire de métal à l'aide d'une louche pour le verser dans le moule fermé. La technique de coulée revêt une importance particulière et cette opération exige une grande dextérité pour garantir la continuité du remplissage et le débit adéquat du métal. Le contrôle de l'engorgement pendant la coulée est crucial pour éviter l'incorporation d'air, ce qui pourrait entraîner des piqûres et soufflures dans la pièce (défauts gazeux : des bulles plus ou moins grandes incluses dans le métal, souvent causées par l'entraînement d'air pendant la coulée), ou des discontinuités de matière dans la pièce moulée.

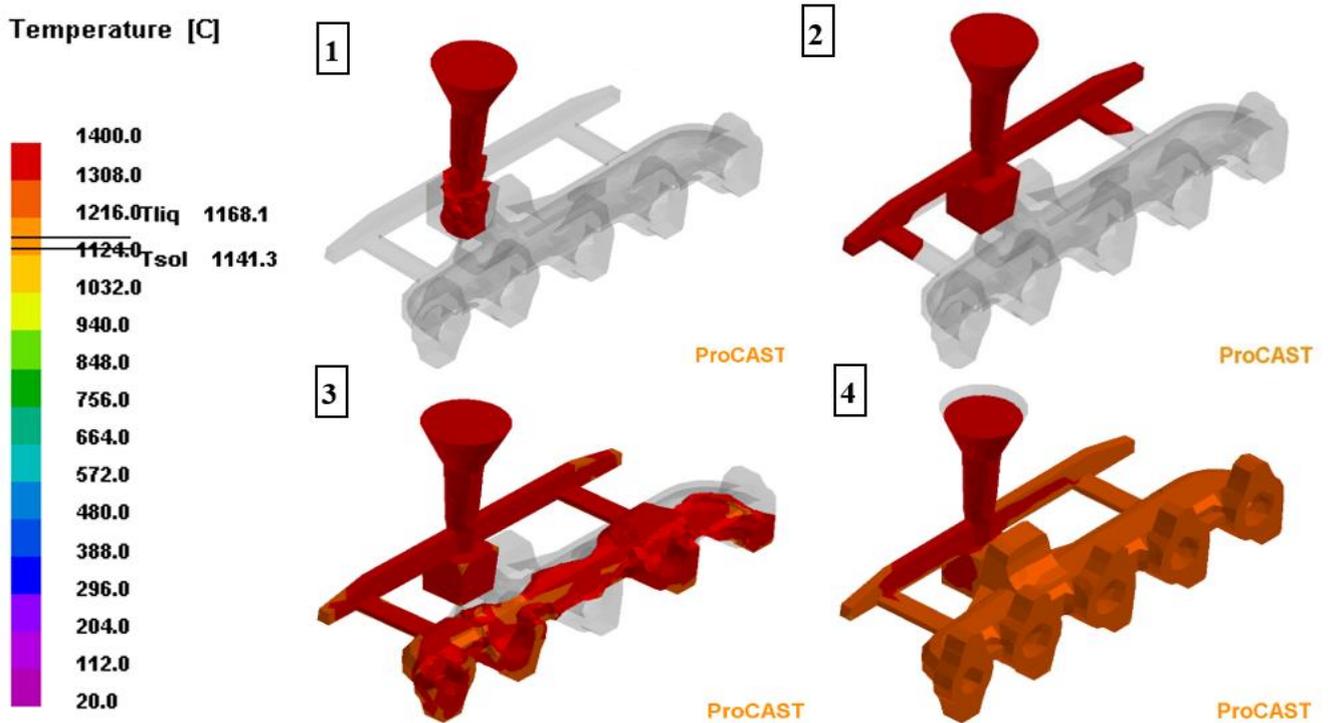


Figure III-9 : Cartographie de remplissage de moule pièce.

III.3.2 Simulation des vitesses de coulée

Pour que cette opération soit réussie, il est essentiel que le métal liquide ait suffisamment de temps pour remplir complètement l’empreinte avant de se solidifier. Cela garantit que toutes les parties de l’empreinte sont correctement remplies, minimisant ainsi les défauts potentiels. Une gestion précise de la température et du débit du métal liquide est également cruciale. Ces facteurs combinés assurent la qualité et l’intégrité de la pièce finale.

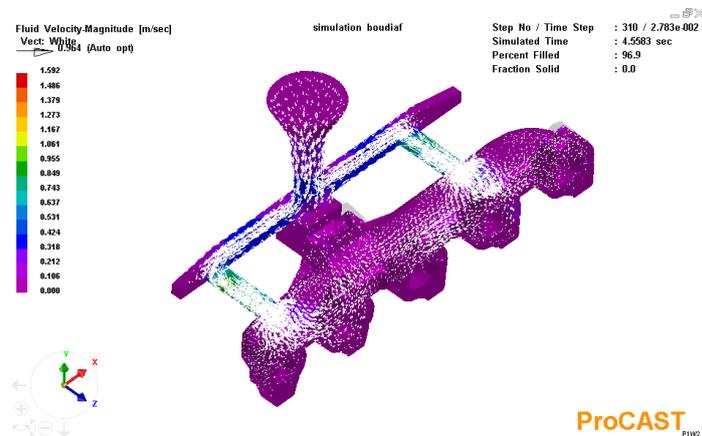


Figure III-10 : Cartographie de vitesse de coulée.

On observe que la vitesse de coulée est élevée au niveau des attaques en raison de leurs formes digressives, car il est crucial de remplir l’empreinte avant que le métal ne se solidifie. La rapidité du remplissage permet de commencer la solidification avec une température aussi homogène que possible dans l’empreinte

III.3.3 Simulation de la solidification

III.3.3.1 Simulation de refroidissement en fonction de la température

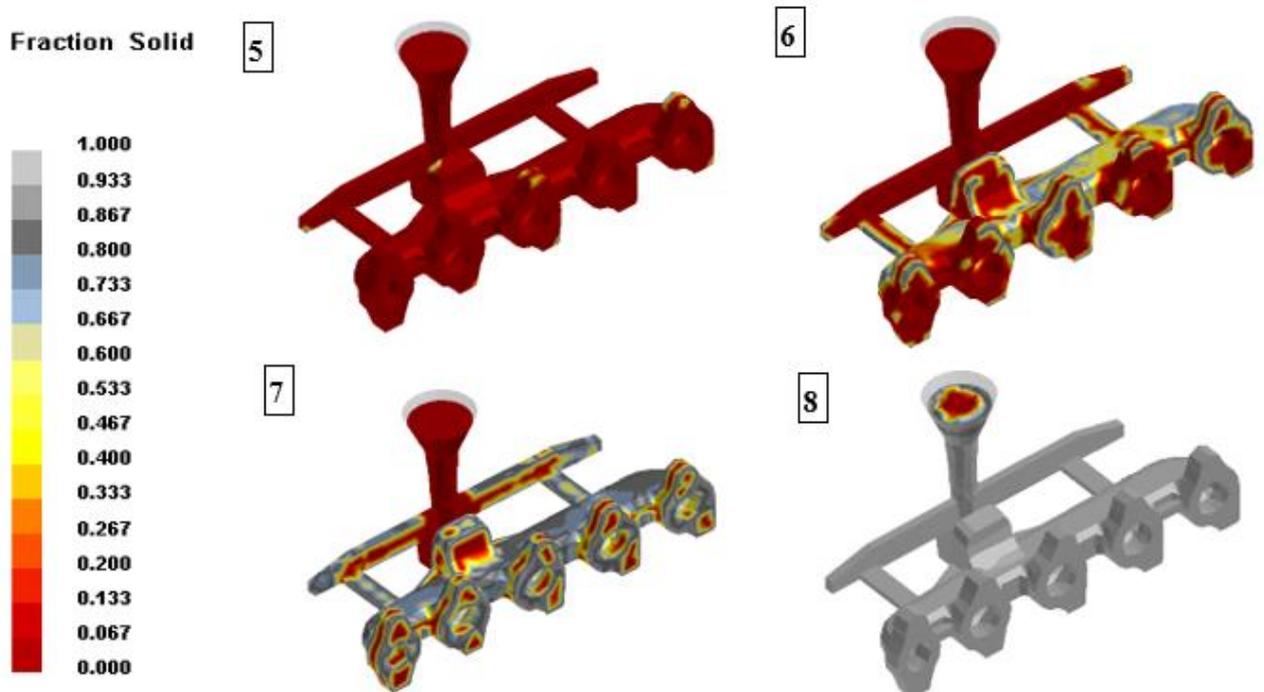


Figure III-11 : Cartographie de l’intervalle de solidification de la pièce.

III.3.3.2 Refroidissement de la pièce en fonction de la température

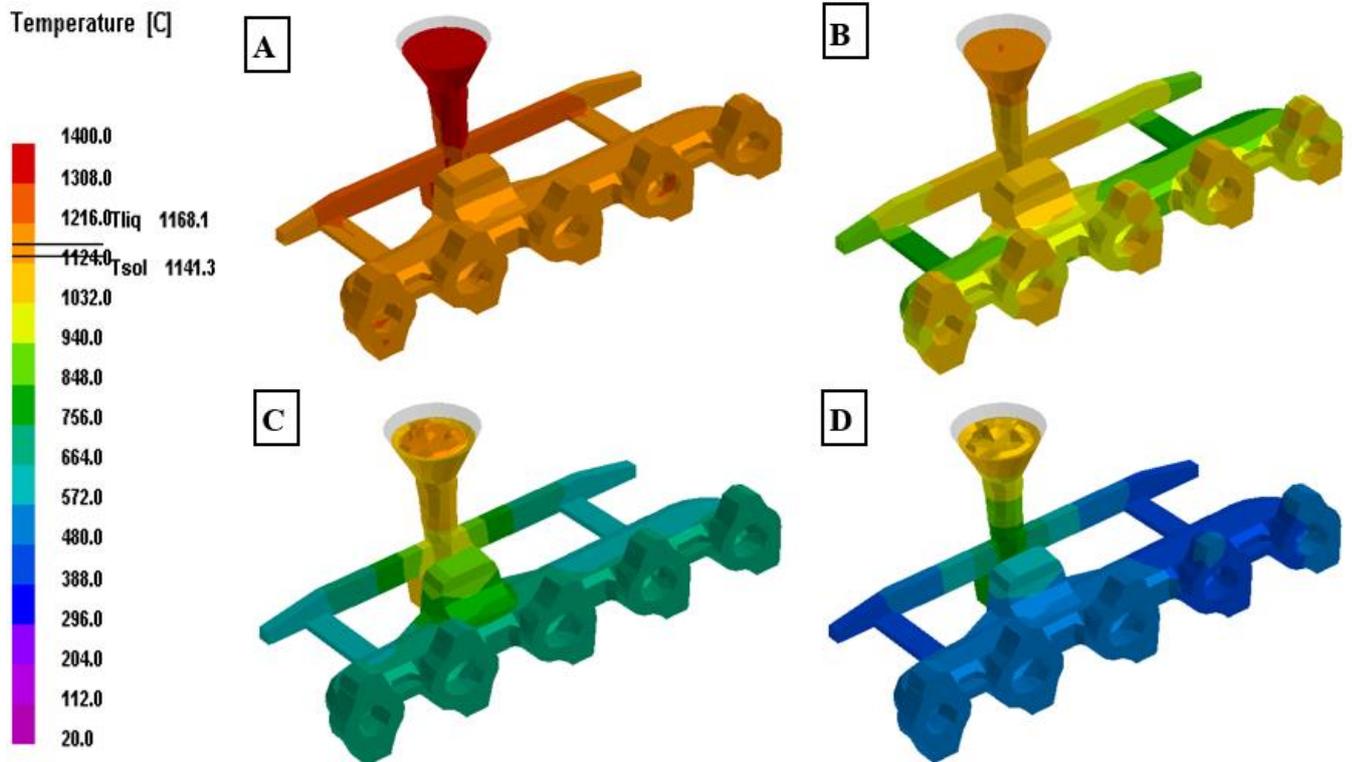


Figure III-12 : Refroidissement de la pièce en fonction de la température.

III.3.3.3 Points de mesure de refroidissement

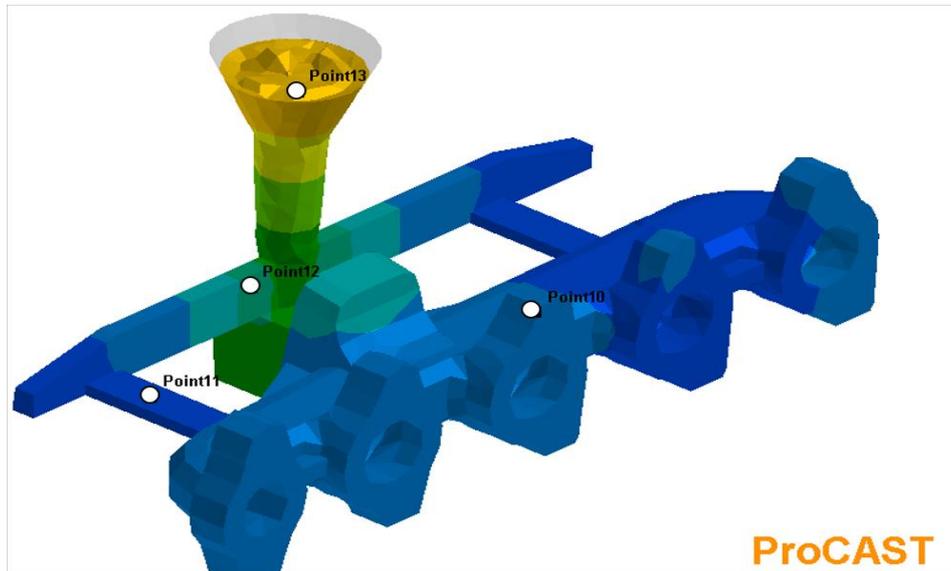


Figure III-13 : Points de mesure de refroidissement.

III.3.3.4 Courbes de refroidissement en fonction de point de mesure

Les courbes présentés dans la figure illustrent la fluctuation de la température en fonction du temps pour différents points de la pièce moulée. Les emplacements critiques se concentrent principalement dans les parties massives, notamment :

- Le (point 10), localisé dans la pièce, qui connaît le refroidissement initial.
- Le (point 11), positionné entre la pièce et le chenal (l'attaque).
- Le (point 12), repéré sur le chenal.
- Le (point 13), repéré sur l'évent, qui conserve la chaleur le plus longtemps.

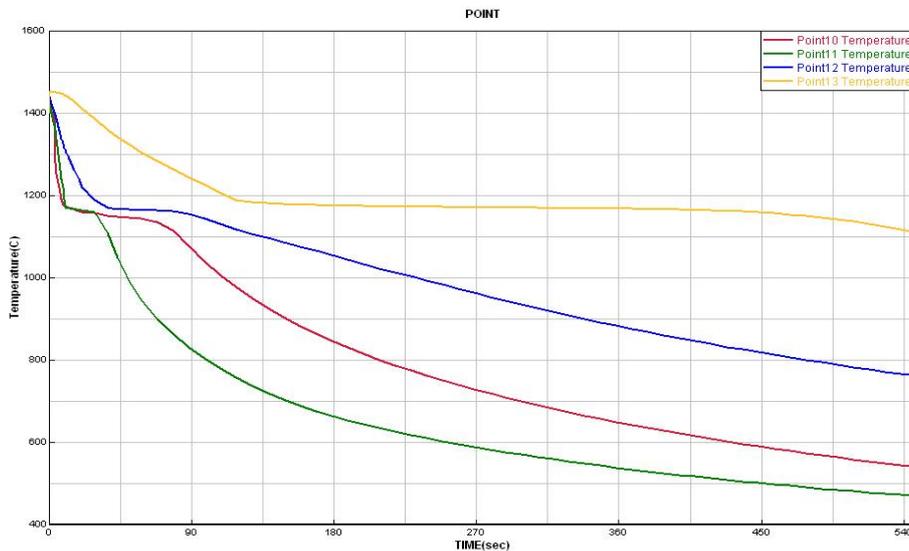


Figure III-14 : Courbe de refroidissement en fonction de point de mesure.

III.3.4 Simulations des défauts volumique

Le retrait de solidification se manifeste dans presque tous les métaux, car la phase solide a une densité supérieure à celle de la phase liquide. Dans notre pièce, le matériau utilisé (fonte GS) présente un coefficient de retrait volumique d'environ 1 % dans toutes les directions (3D).

Ce phénomène est particulièrement important à considérer pour garantir l'intégrité dimensionnelle et structurelle de la pièce finale. La prise en compte de ce coefficient de retrait est cruciale lors de la conception des moules.

La (figure III -15) ci-dessous présente les défauts existants liés à ce phénomène.

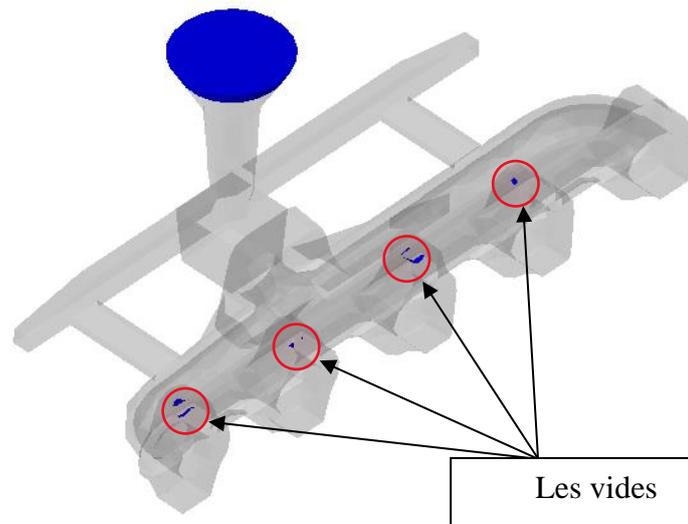


Figure III-15 : Représente les vides existents à l'intérieur du collecteur.

Nous avons identifié les zones vides potentiellement problématiques dans les pièces moulées. Ces vides, souvent résultant de la contraction du métal lors de la solidification, peuvent compromettre l'intégrité et la qualité des pièces fabriquées. Pour remédier à ces défauts, l'utilisation de masselottes et d'évents s'avère être une solution efficace. Les masselottes agissent comme des réservoirs de métal liquide supplémentaires, alimentant les zones sujettes à la contraction et comblant ainsi les vides potentiels. En utilisant la simulation avec Pro-Cast, il est possible de déterminer précisément l'emplacement et la taille optimale des masselottes pour chaque configuration de moule, garantissant ainsi la production de pièces sans défaut, de haute qualité et répondant aux normes de fabrication.

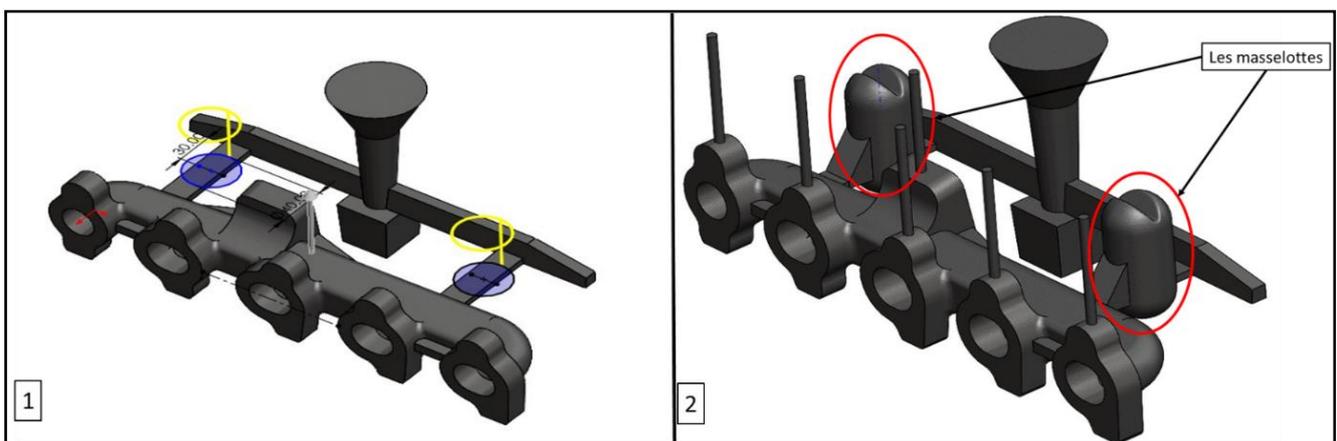


Figure III-16 : Collecteur avec le système de masselotte sur SOLIDWORKS.

III.4 Simulation 2

III.4.1 Simulation de la coulée (avec masselottes)

Les images E, F, et G illustrent le début du remplissage de l’empreinte. L’image H montre la fin du remplissage (figure III-17). Cette séquence visuelle permet de suivre avec précision les différentes étapes du processus. Les observations obtenues corroborent les résultats théoriques attendus.

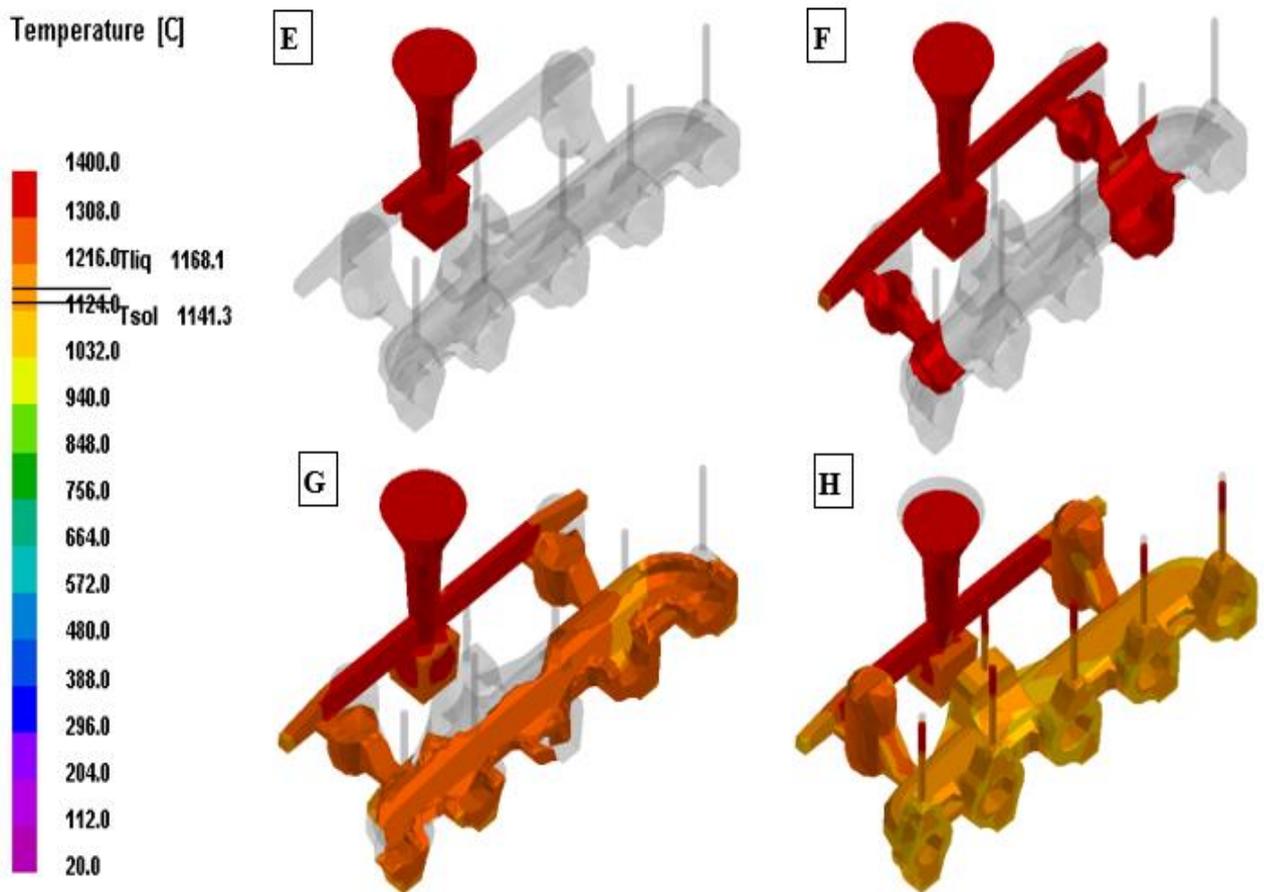


Figure III-17 : Remplissage avec masselottes.

III.4.2 Simulation de la solidification (avec masselottes)

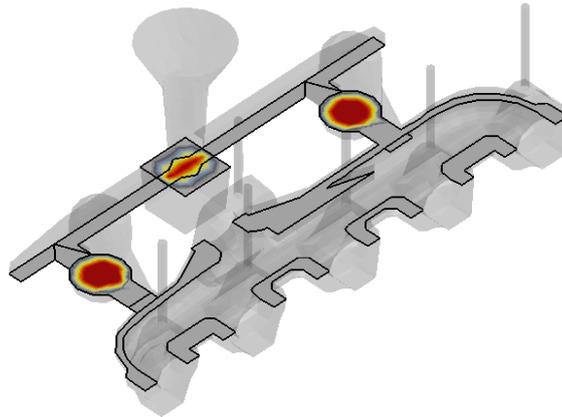


Figure III-18: Vue de coup de solidification image L.

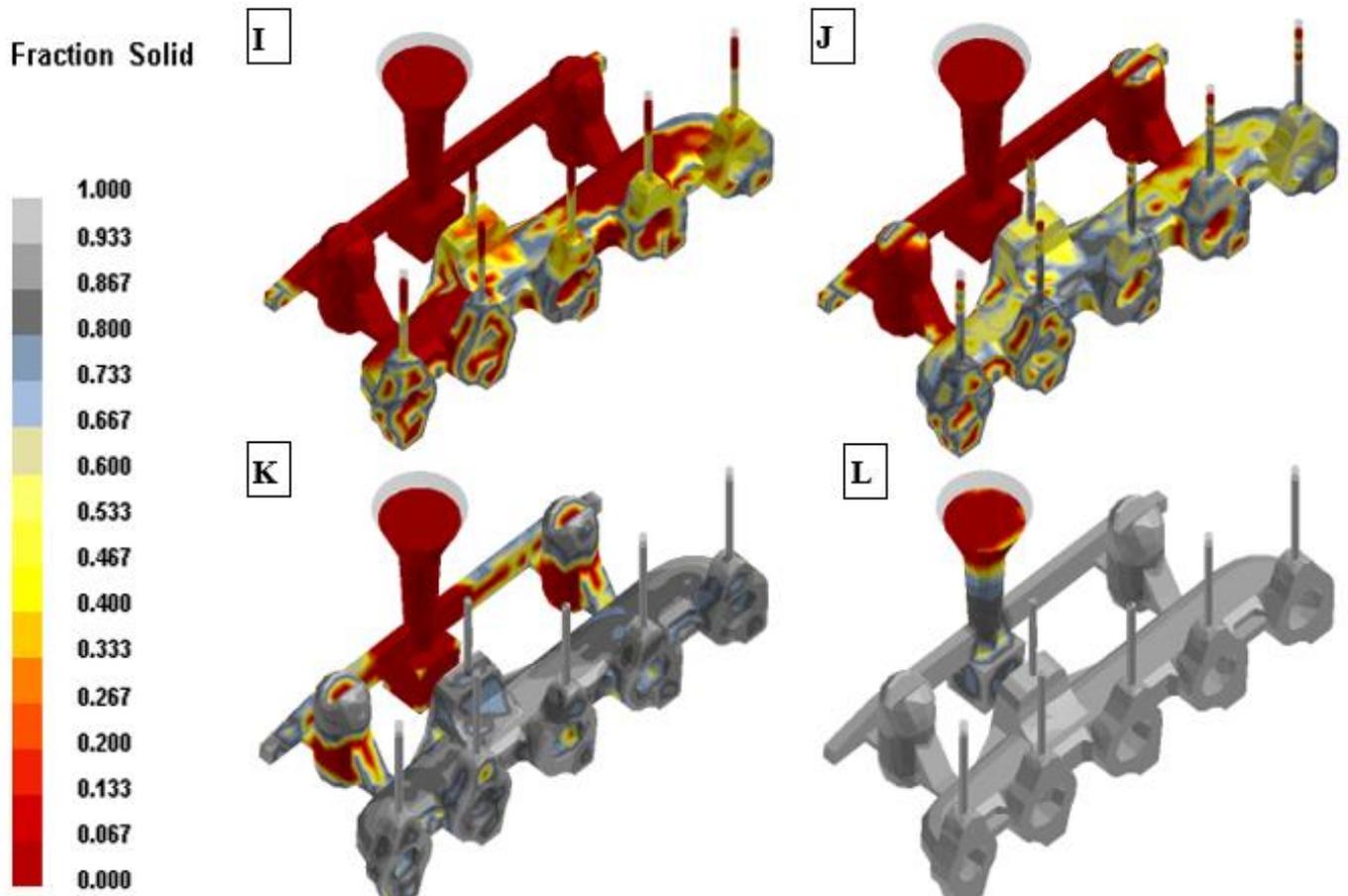


Figure III-19 : Cartographie de l'intervalle de solidification de la pièce.

Nous avons observé que les masselottes et l'entonnoir sont les derniers à se solidifier. Cette observation est cruciale car elle confirme l'efficacité des masselottes en tant que réservoirs de

métal liquide, alimentant les zones sujettes à la contraction jusqu'à la fin du processus de solidification. En solidifiant en dernier, les masselottes et les entonnoirs contribuent à réduire au minimum la formation de vides et d'autres défauts, garantissant ainsi des pièces de haute qualité.

Cette simulation permet d'ajuster précisément la taille et l'emplacement des masselottes pour chaque configuration de moule, optimisant ainsi la production et assurant la conformité aux exigences de fabrication.

III.4.2.1 Simulation de refroidissement en fonction de la température (avec masselottes)

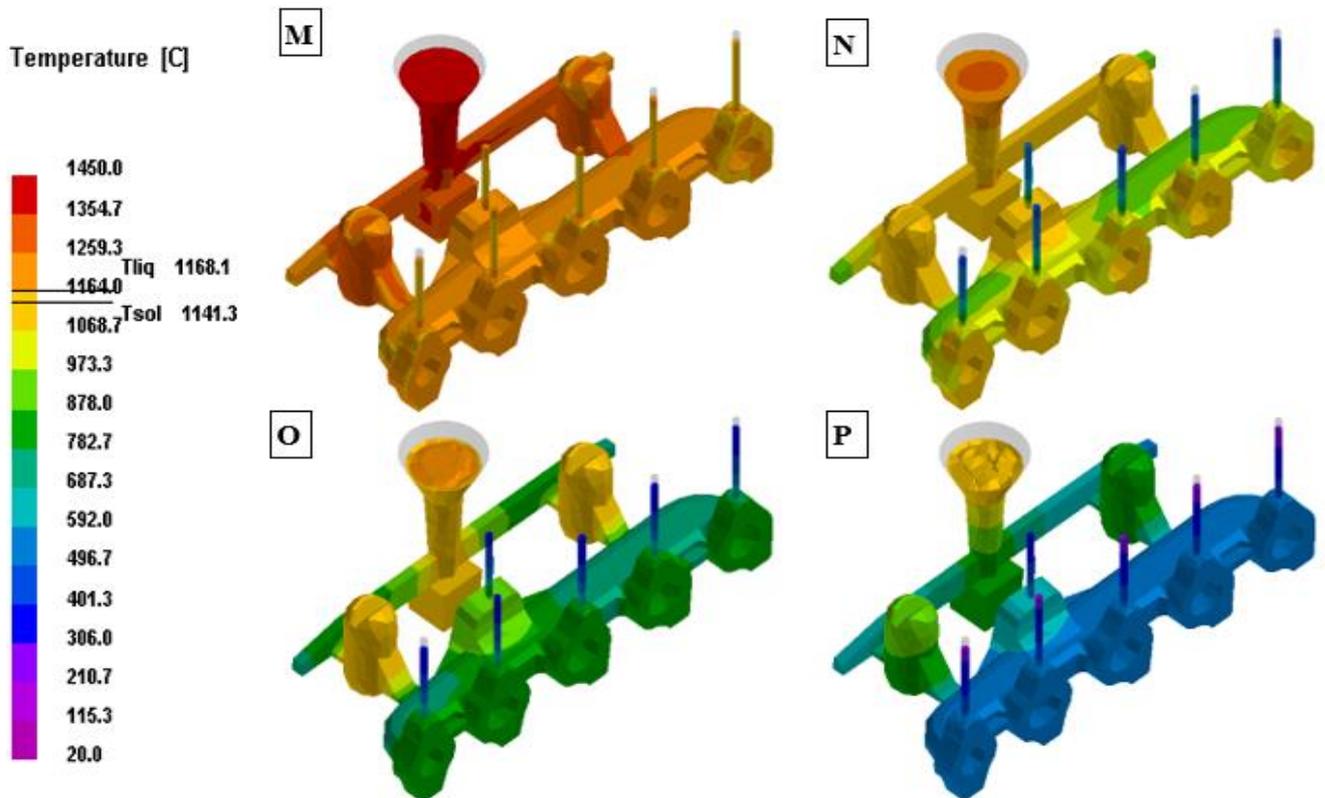


Figure III-20 : Refroidissement de la pièce en fonction de la température.

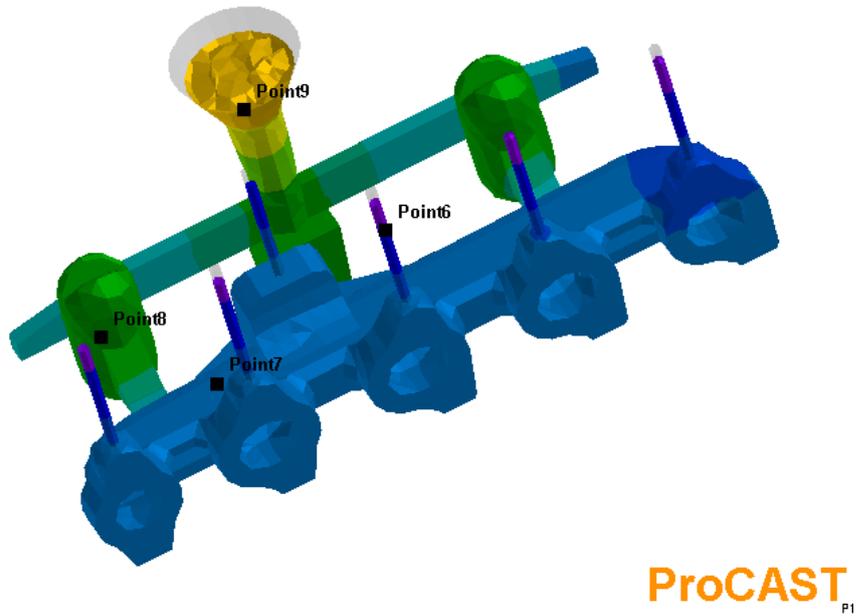


Figure III-21 : Points de mesure de refroidissement.

III.4.2.2 Courbe de refroidissement en fonction de point de mesure

Les courbes indiqués sur la figure représentent la variation de la température en fonction du temps des différents points de la pièce moulée

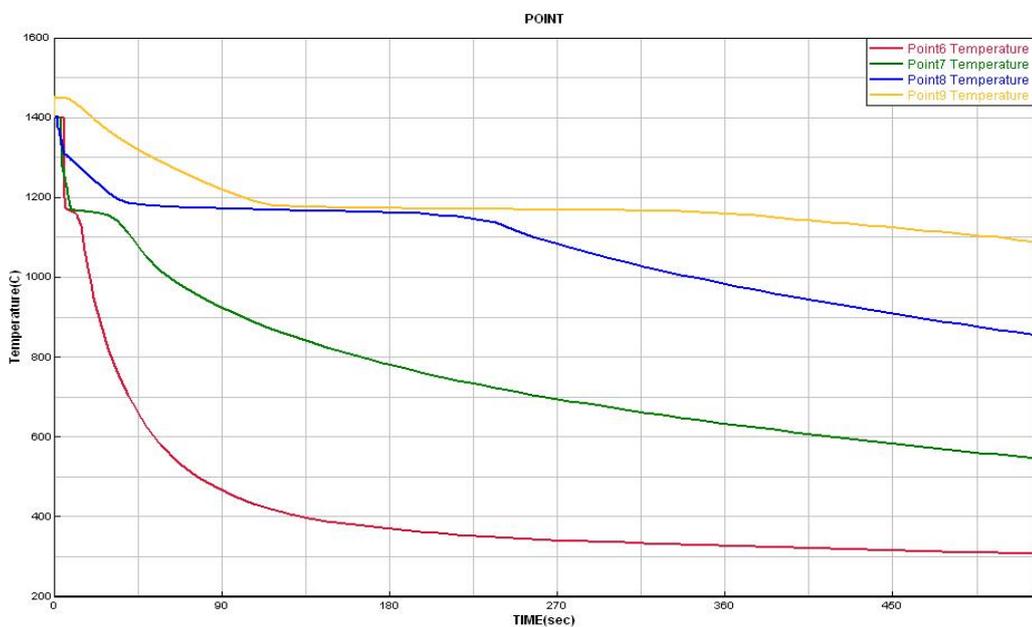


Figure III-22 : Courbe de refroidissement en fonction de point de mesure.

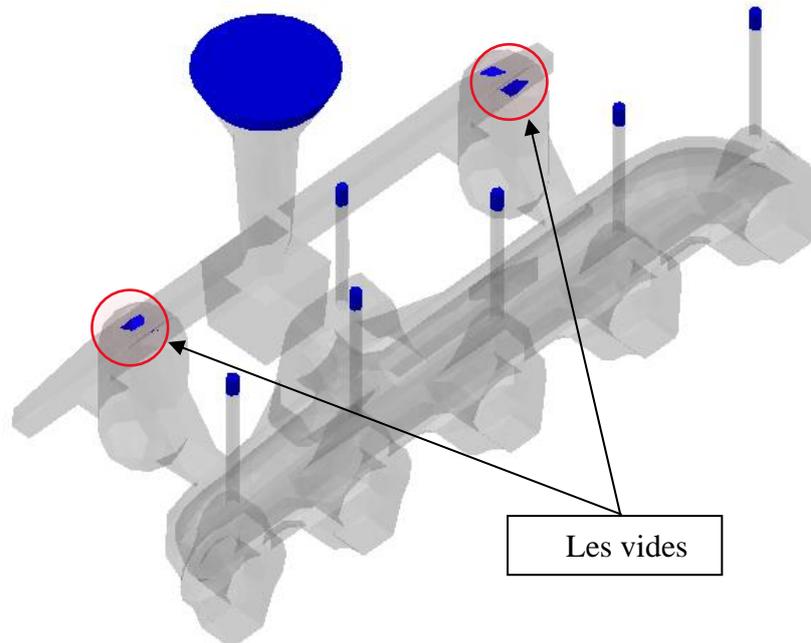


Figure III-23 : Représente les vides.

III.5 Conclusion

Les simulations effectuées avec PROCAST ont permis de comprendre et de visualiser les dynamiques de remplissage et de solidification dans le moulage au sable de pièces en fonte. L'utilisation de masselottes s'est avérée essentielle pour éviter les défauts internes et produire des pièces de haute qualité. Ce chapitre souligne l'importance des outils de simulation numérique pour optimiser les procédés de fabrication, réduire les défauts et améliorer la fiabilité des pièces moulées. En conclusion, l'intégration de masselottes dans notre processus de moulage est une stratégie efficace pour garantir l'intégrité et la performance des pièces en fonte, validée par les résultats obtenus grâce à PROCAST

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la réalisation et la discussion autour de la fabrication d'un collecteur d'échappement en fonte GS (Fonte à Graphite Sphéroïdal) en utilisant un four à induction. Nous décrivons les étapes clés du coulage, y compris la préparation du moule en sable, la fusion et le coulage du métal liquide, suivis d'un refroidissement contrôlé. Les essais mécaniques sur le sable de moulage ont permis de vérifier la résistance, la perméabilité et la finesse des grains, garantissant ainsi la stabilité du moule. La fonte obtenue a été analysée et caractérisée à l'aide d'un spectromètre pour déterminer sa composition chimique et d'un microscope optique pour observer la microstructure, en particulier la formation des nodules de graphite. En conclusion, nous comparons le collecteur fabriqué avec un collecteur de référence en termes de propriétés mécaniques, caractéristiques microstructurales et performance en service, mettant en évidence les améliorations et les éventuelles lacunes à corriger pour optimiser le procédé de fabrication.

IV.2 Modélisation le système de remplissage

Après avoir achevé les calculs du système de remplissage, nous progressons vers sa modélisation sur la base du collecteur d'échappement. Cette démarche intègre les données acquises et applique des techniques de modélisation avancées afin d'affiner et d'optimiser la conception du collecteur. Par ailleurs, l'exploitation de simulations numériques permet d'approfondir la compréhension des phénomènes dynamiques internes au collecteur. La (figure IV :1) offre une représentation visuelle du système de remplissage, mettant en évidence les aspects cruciaux de sa conception.

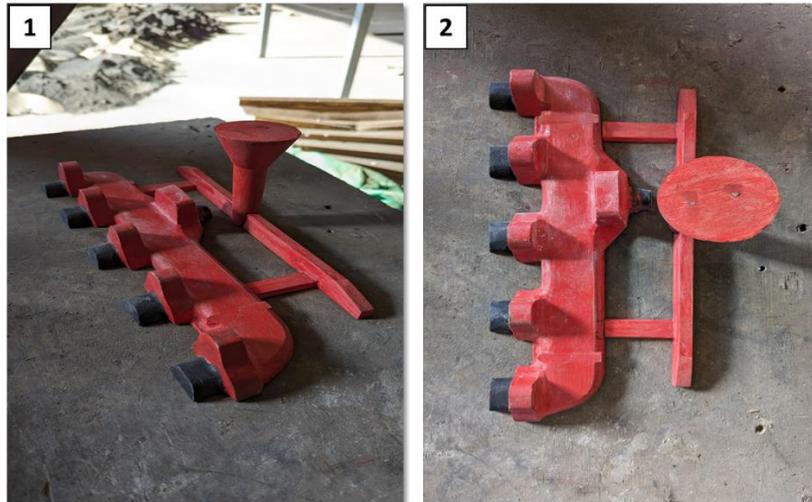


Figure IV-1 : Modèle avec le système de remplissage.

IV.2.1 Préparation du sable de moulage

La préparation du sable de moulage revêt une importance capitale pour garantir la qualité des pièces finales. Dans le malaxeur évoqué dans le précédent chapitre, le sable vert est mélangé avec des proportions précises de bentonite et de noire minérale. La bentonite agit en tant que liant, assurant la cohésion entre les grains de sable, tandis que la noire minérale améliore diverses propriétés du mélange.

On distingue deux types de sable utilisés :

- **Sable neuf (jaune)** : destiné à la fabrication des noyaux.
- **Sable de moulage (noir)** : Le sable de moulage, pour la création de moules de haute qualité dotés de propriétés mécaniques optimales.

L'incorporation de la bentonite garantit une cohésion et une résistance accrues du mélange, tandis que l'ajout de noir minéral améliore ses propriétés thermiques. Un strict contrôle de l'humidité est impératif afin de préserver les caractéristiques désirées du sable.

IV.3 Essais mécaniques

IV.3.1 Matériels utilisés

- Balance analytique.
- Calibreur.
- Appareil de contrôle de la perméabilité.

- Appareil de contrôle l'humidité.
- Machine des essais mécaniques.

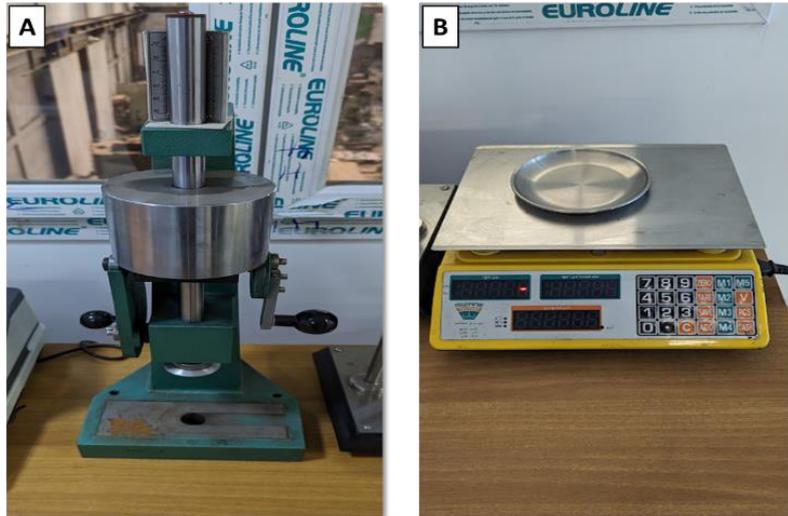


Figure IV-2 : (A) calibreur, (B) balance analytique.

IV.3.2 Détermination du taux d'humidité

Pour évaluer le taux d'humidité, une quantité de 10g du mélange est prélevée et placée dans l'appareil lors du test d'humidité.

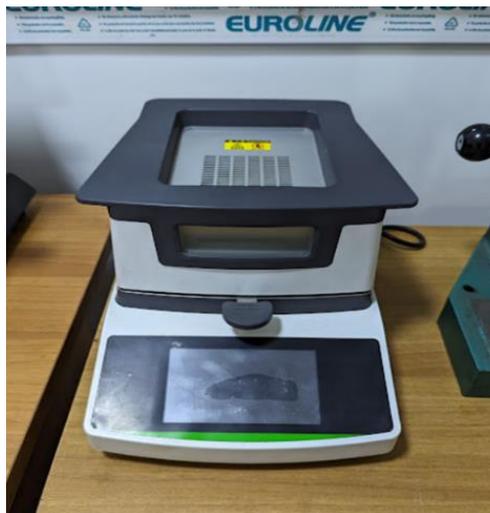


Figure IV-3 : Analyseur d'humidité type PWG, avec dispositif de séchage.

IV.3.3 Détermination de la perméabilité au gaz

L'évaluation de la perméabilité au gaz a été réalisée en utilisant 150 g d'un mélange de sable, caractérisé par sa capacité à permettre le passage des gaz à travers une structure dense de sable.



Figure IV-4 : Appareil de contrôle de perméabilité.

IV.3.4 Détermination de la résistance à la compression et au cisaillement

On a utilisé 150 g de sable. Une charge croissante est appliquée suivant un plan passant par l'axe de révolution de l'éprouvette jusqu'à rupture.



Figure IV-5 : Machine et échantillons des essais mécaniques.

IV.3.4.1 Résultats

Les résultats des tests et les essais sont :

Tableau IV-1 : Résultats des tests et les essais du mélange.

Analyse	Humidité	Perméabilité	Compression	cisaillement
Moyenne	2.93	202.6	0.155	0.36

Tableau IV-2 : Caractéristique de sable du moulage (Norme)

Caractéristique	Humidité	Perméabilité	Compression Kg.f/cm ²	Cisaillement Kg.f/cm ²
Intervalle	[2.9 - 3.5]	[155 - 185]	[1.7 - 2]	[0.35 - 0.55]

IV.4 Moulage et noyautage

Après avoir déterminé les caractéristiques du sable de moulage, nous pouvons entamer la phase de moulage proprement dite. Cette étape consiste à préparer le moule avec le sable optimisé, assurant ainsi la précision et la qualité de la forme finale du collecteur d'échappement. Consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir.

Le processus de moulage comprend la création des cavités nécessaires, la mise en place des systèmes de coulée et de ventilation, et la consolidation du sable pour garantir la stabilité et la résistance du moule durant la coulée du métal en fusion.

Un moule simple est constitué de deux parties :

- La partie supérieure.
- La partie inférieure.

Le châssis supérieur et le châssis inférieure qui compose le moule sont préparé séparément, chacun des deux est remplis avec du sable. Les figures III.36 et III.37 présentent le processus du moulage.



Figure IV-6: (1) Modèle inférieur dans le châssis inférieur, (2) et (3) remplissage le châssis inférieur.

Le modèle supérieur réservé au châssis supérieur du moule est enfoncé avec pression dans le but d'y créer une empreinte, de même pour le châssis inférieure.

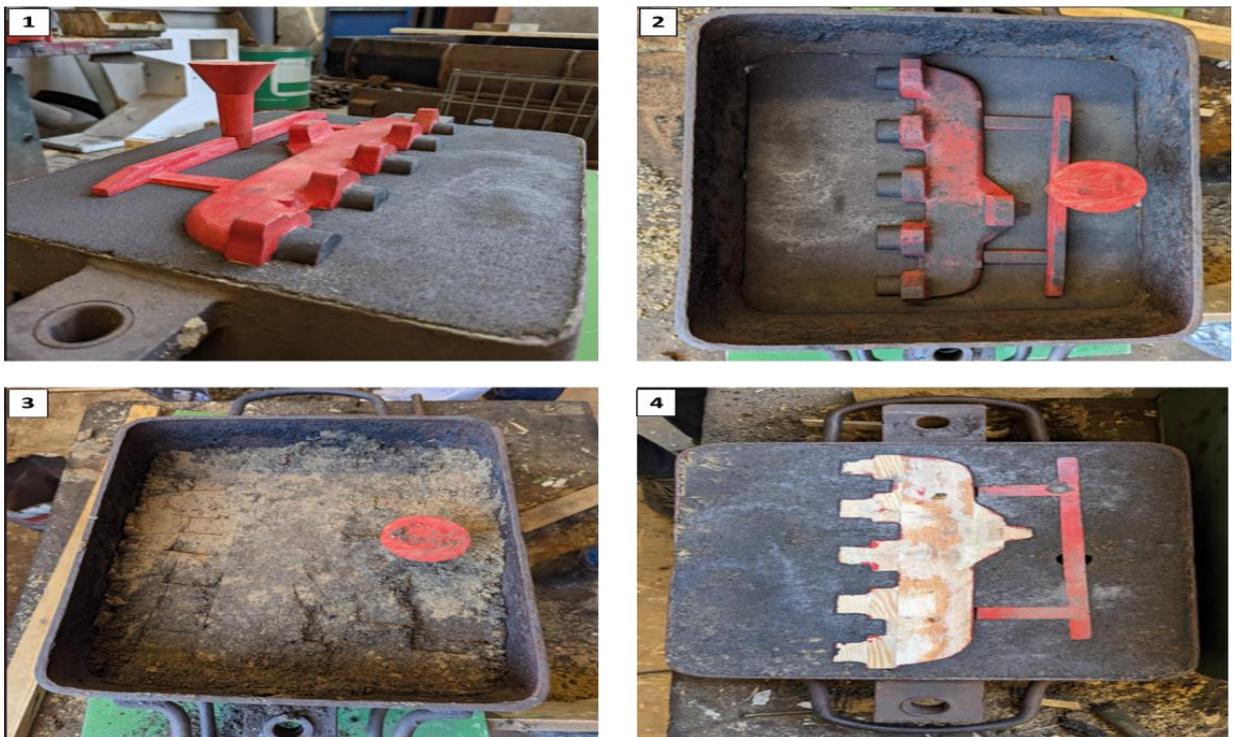


Figure IV-7 : (1), (2) Modèle réservé au châssis supérieur, (3) et (4) remplissage le châssis supérieur.

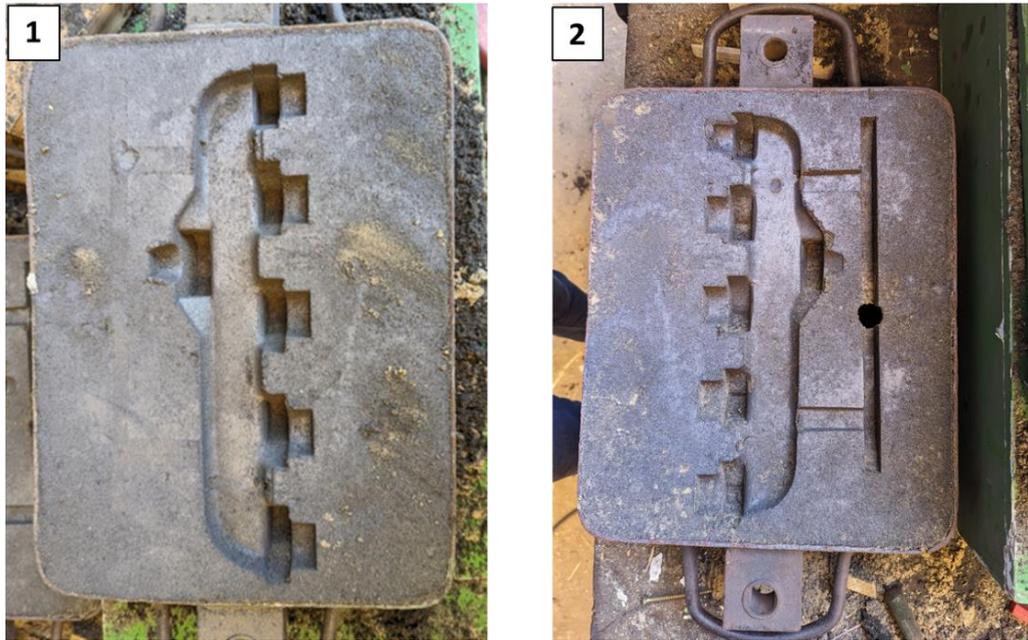


Figure IV-8 : Empreints de modèle.

Une fois cela finie, on place les noyaux et les additions nécessaires, les deux parties du moule sont assemble et sérés l'un contre l'autre fixe avec agrafes, un entonnoir est créer sur la partie supérieure entoure par le talc pour facilite l'opération de la coulée.

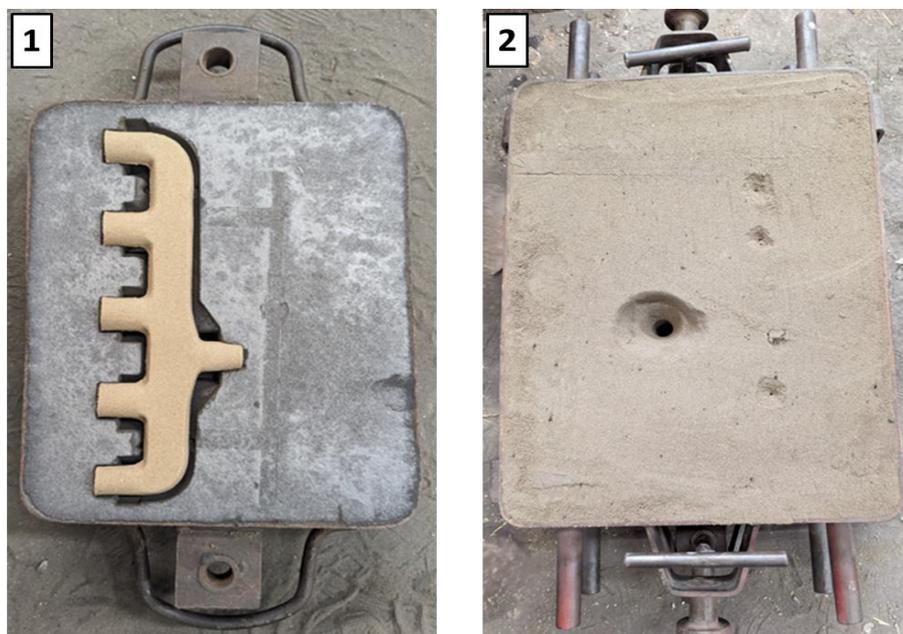


Figure IV-9 : (1) Assemblage de moule avec le noyau et (2) le moule est prêt.

IV.5 Fusion et élaboration

La fusion des métaux est la pratique qui consiste à faire passer un métal de l'état solide à l'état liquide. La préparation des charges est le secteur où arrive la matière première (minerai, lingots de matière, déchets métalliques récupérés, et...).

- Pour obtenir une matière coulée qui correspond aux exigences.
- Techniques de la pièce terminée, la préparation des charges a un rôle essentiel dans la fonderie. Dans les grandes fonderies, le chargement se fait par des moyens pilotés par informatique.

Les moyennes de la fusion :

- Un four à induction.
- Une poche de traitement.
- Spectromètre.

Une fois le métal fondé sur le four arc, une médaille envoyée a laboratoire pour faire l'analyse les éléments d'addition, cette opération nous permettre de faire la correction pour obtenu le métal (GS).

IV.5.1 Equipements

IV.5.1.1 Four à induction

Le four de fonderie à induction d'une capacité d'une tonne est un équipement industriel conçu pour la fusion efficace des métaux à l'aide de l'induction électromagnétique. Il est équipé d'une puissance nominale adaptée pour fondre jusqu'à une tonne de métal à la fois.



Figure IV-10 : Four à induction.

IV.5.2 Poche de traitement

Une poche de coulée, qui est un grand récipient utilisé dans les fonderies pour transporter et verser le métal en fusion. La poche de coulée semble être en métal et est doublée d'un matériau réfractaire pour résister aux hautes températures. La poche est équipée d'un mécanisme pour incliner et verser le métal en fusion. D'une capacité jusqu'à 300 Kg.



Figure IV-11 : (1) Poche de traitement et (2) intérieur de la poche.

IV.5.3 Spectromètre (ml 300 à étincelle)

Un spectromètre à étincelles est un appareil utilisé principalement dans les fonderies pour analyser la composition chimique des métaux. Ce type de spectromètre utilise une technique appelée spectrométrie d'émission à étincelles pour identifier et quantifier les éléments présents dans un échantillon métallique.

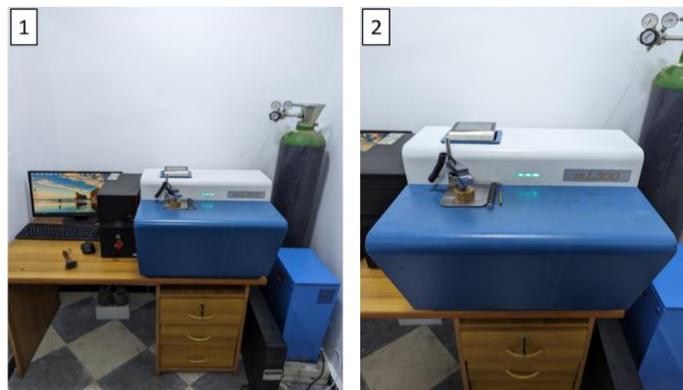


Figure IV-12 : Spectromètre mL300.

La caractérisation chimique du collecteur d'échappement a été réalisée à l'aide d'un spectromètre de masse (mL 300), les résultats de ces analyses sont illustrés par le Tableau IV.1

Tableau IV-3 : Composition chimique du collecteur d'échappement.

Eléments	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Cr%	Ni%	Cu%	Fe%
Pourcentage massique	3.70	2.37	0.509	0.01	0.164	0.202	0.07	0.204	92.524

Le tableau montre que :

- Le fer est le principal composant, comme attendu dans les alliages ferreux. La teneur de 92.524% confirme que le matériau est principalement constitué de fer
- Le carbone à 3.70% est typique des fontes. Une teneur élevée en carbone favorise la formation de graphite. Les traitements et les additions d'éléments comme le magnésium (Mg) la formation de graphite sphéroïdale.
- Le silicium est un élément graphitisant qui favorise la formation de graphite par rapport au carbure de fer (Fe_3C). Une teneur de 2.37% est courante dans les fontes à graphite sphéroïdal et aide également à stabiliser la ferrite.
- Le manganèse à 0.509% contribue à la formation de perlite.
- Le cuivre est un élément perlitifant qui favorise la formation de perlite et améliore la résistance à la traction et à la corrosion. Une teneur de 0.204% est modérée et appropriée pour une matrice ferrito-perlitique.
- Les autres éléments en petites quantités (Mn, S, P, Cr, Ni, Cu) contribuent à améliorer certaines propriétés spécifiques comme la résistance, la dureté et la résistance à la corrosion.

IV.5.4 Elaboration

Pour obtenir un collecteur d'échappement à base d'une fonte à graphite sphéroïdale de matrice ferritique on doit passer par le bilan de charge suivant :

Ductile Iron - 400/15 Grade										
Material	Wt	C	Si	Mn	Cu	Present	C	Si	Mn	Cu
Pig Iron	400	15.2	6.4	1	0		3.80%	1.60%	0.25%	0%
CRCA	400	0.8	0.8	0.8	0		0.20%	0.20%	0.20%	0%
Runner		0	0	0	0		3.60%	2.40%	0.24%	0.10%
Rejection	200	7.2	4.8	0.48	0.2		3.60%	2.40%	0.24%	0.10%
Total Kg	1000	23.2	12	2.28	0.2					
% Available		2.32%	1.20%	0.23%	0.02%					
Required %		3.80%	1.70%	0.23%	0.05%					
Required kgs		38	17							
Diff Kgs		14.8	5							
Recovery		95%	75%							
Addition req kgs		15.58	6.67							

Figure IV-13 : bilan de charge pour obtenir une fonte à graphite sphéroïdale de matrice ferritique.

- **Pig Iron** : lingot de fonte ductile à haute teneur de carbone.
- **CRCA** : ferraille recuite laminé à froid.
- **Runner et rjection** : chenal et masselotte et le retour de la fonte GS non validé.

➤ **Remarque :**

L'obtention d'une fonte à graphite sphéroïdale ferritique on doit choisir une matière première qui pauvre d'en Mn inférieur à 0.2 et Cu inférieur à 0.05 comme montré dans le bilan précédent.

Dans notre cas la disponibilité de la matière première ou le Mn et le Cu, qui sont présents en faible teneur, n'est pas assurée. Pour cela on a utilisé le bilan de charge suivant :

Ductile Iron										
Material	Wt	C	Si	Mn	Cu	Present	C	Si	Mn	Cu
Block moteur	200	7.2	4	1.2	0		3.60%	2.00%	0.60%	0%
acier disque emb	100	0.034	0.019	0.21	0		0.03%	0.02%	0.21%	0%
CRCA	350	0.56	0.3045	1.155	0		0.16%	0.09%	0.33%	0%
disque de frien	150	5.4	3.6	0.765	0.825		3.60%	2.40%	0.51%	0.55%
Retour	200	6.8	5	1.66	0.2		3.40%	2.50%	0.83%	0.10%
Total Kg	1000	19.994	12.924	4.99	1.025					
% Available		2.00%	1.29%	0.50%	0.10%					
pert		1.59952	0.5816	0.1996						
Total Kg & pert		18.3945	12.342	4.79						
Required %		3.80%	1.90%	0.30%	0.05%					
Required kgs		38	19	3	0.5					
Diff Kgs		19.6055	6.6581	-1.79	-0.525					
Recovery		95%	75%	75%	98%					
Addition req kgs		20.64	8.88	-2.39	-0.54					

Figure IV-14 : Bilan de charge selon la disponibilité.

Les charges sont montrées dans la figure suivante :



Figure IV-15 : Charges.

IV.5.5 Fusion

Après la sélection des charges, nous les introduisons dans le four pour la fusion. Cette étape permet de transformer les matières premières en un alliage.



Figure IV-16 : Fusion de matière première.

Après fusion, la charge est analysée par un prélèvement de métal liquide (appelé : médaille) qui sera envoyé au laboratoire pour être analysé.

À l'aide d'un spectromètre de type mL300 à étincelle, la composition de la médaille a été analysée. Les résultats obtenus révèlent les pourcentages massiques des éléments constitutifs du métal. Cette analyse permet de déterminer avec précision la teneur en différents éléments :

Eléments	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Cr%	Ni%	Cu%	Fe%
Résultats	3.68	1.94	0.539	0.038	0.168	0.223	0.06	0.208	92.971

Tableau IV-4 : Tableau de composition chimique par le spectromètre mL300.

D'après les résultats obtenus, la composition chimique du métal liquide dans le four est corrigée. Par l'ajout d'éléments, selon les besoins :

- Le graphite pour corriger le carbone (C).
- Le manganèse sous forme de ferro-silicium-magnésium (FeSiMg)

IV.6 Opération de coulage

L'étape suivante après avoir corrigé le métal de fusion est l'opération de coulage. Pour commencer :

- Transfert du métal dans une poche de coulée.
- Versage du métal fondu dans le moule de sable.
- Surveillance continue pour un remplissage complet et éviter les défauts.
- Refroidissement et solidification du métal coulé.
- Retrait du produit final du moule pour les finitions ultérieures.



Figure IV-17 : (1) et (2) Coulage dans la poche.

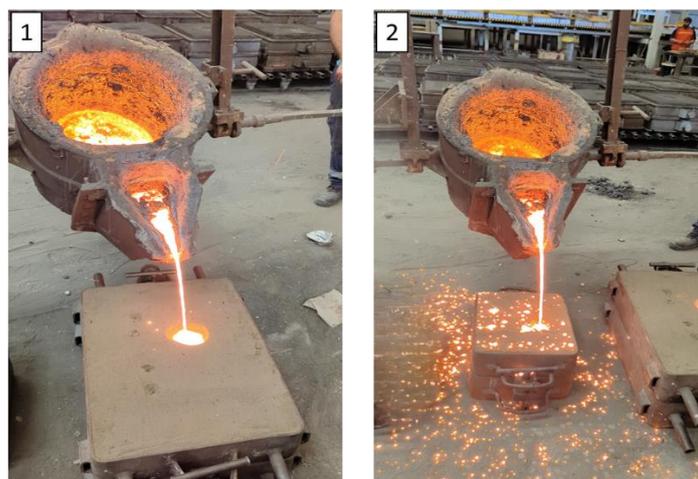


Figure IV-18 : Coulage dans le moule.

IV.7 Opération de parachèvement

Ce secteur est chargé d'extraire la pièce du moule ainsi que de la nettoyer du sable contenu à l'intérieure en suivant trois phases.

- Décochage, séparation du sable de moulage qui adhère à la pièce coulée.
- Débourage, opération qui permet d'extraire le sable contenu à l'intérieur d'une pièce, après coulée et solidification.
- Grenailage, opération de dessablage est nécessaire, afin de débarrasser la pièce du sable qui adhère à ses surfaces. Au contact du sable froid, le métal se refroidit rapidement et sa surface extérieure est enrobée de grains de sable, on procède le plus souvent par grenailage par des bulles d'aluminium projetées au moyen d'un jet d'air comprimé.



Figure IV-19 : Séparation de collecteur.



Figure IV-20 : (1), (2) Grenailage et (3) finition.

IV.8 Analyse et caractérisation

Après l'opération de coulage, le collecteur est prêt pour l'analyse. Des échantillons sont prélevés pour diverses analyses et caractérisations

IV.8.1 Matériel utilisé

Au niveau de laboratoire SARL GRALCOM :

- Appareil de polissage.
- Spectromètre.
- Microscope optique.
- Appareil de dureté.

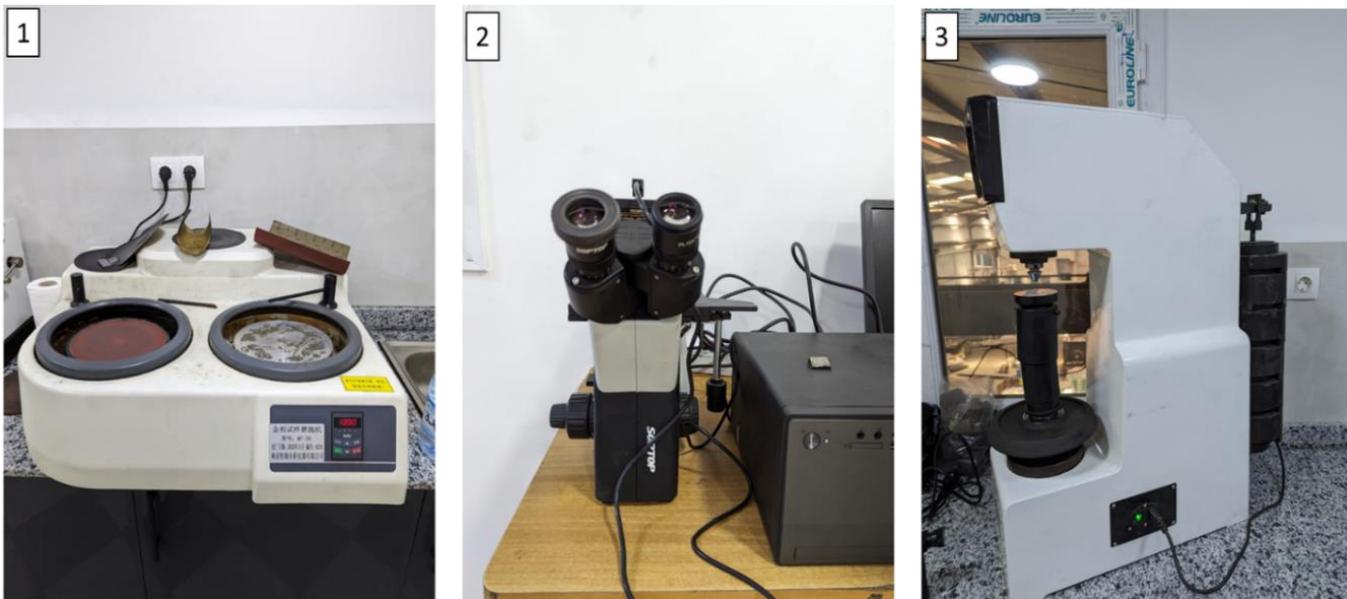


Figure IV-21 : (1) Appareil de polissage, (2) microscope optique et (3) appareille de dureté.

Avant de procéder à ces analyses, l'échantillon doit être préparé en suivant des étapes spécifiques :

- **Polissage** : L'échantillon est d'abord poli pour obtenir une surface lisse et sans imperfections. Cette étape est essentielle pour garantir des observations précises lors des analyses au microscope et des essais de dureté.

- **Attaque chimique** : Après le polissage, l'échantillon subit une attaque chimique, également appelée "gravure". Cette étape consiste à plonger l'échantillon dans une solution chimique réactif (Nital 2%) spécifique aux fontes.

IV.8.2 Observation au microscope optique

Cette méthode permet d'examiner la microstructure des échantillons. En observant les grains, les phases et les éventuels défauts microscopiques, on peut évaluer la qualité de la structure interne du collecteur

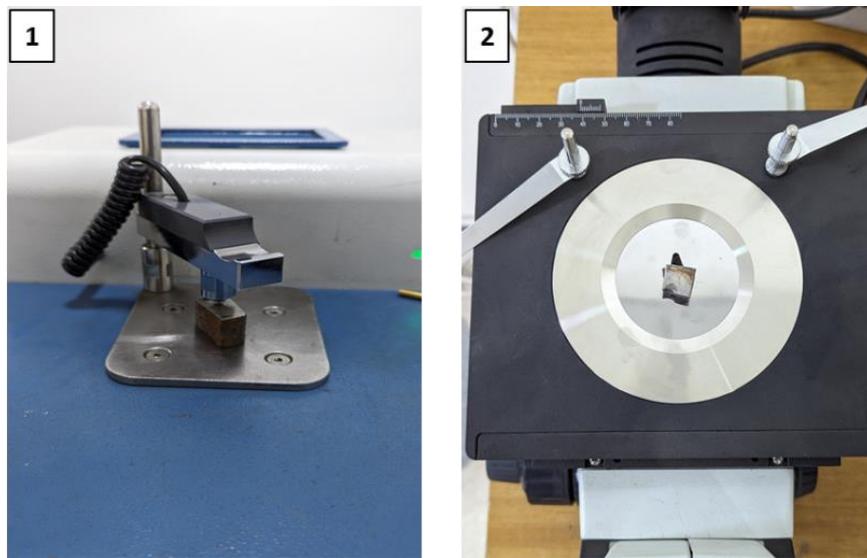


Figure IV-22 : (1) Analyse par spectromètre et (2) analyse par microscope optique.

IV.8.3 Microstructure

Les analyses métallographiques ont été réalisées sur des échantillons polis et attaqués pour révéler les constituants de la microstructure. La figure IV.13 montre la microstructure du collecteur d'échappement.

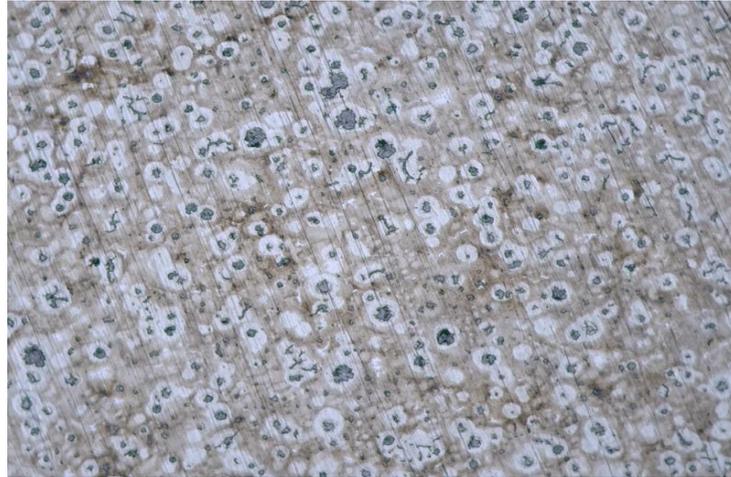


Figure IV-23 : Observation microstructurale du collecteur (X 100).

On prend un agrandissement sur la figure IV-14 pour interpréter la microstructure

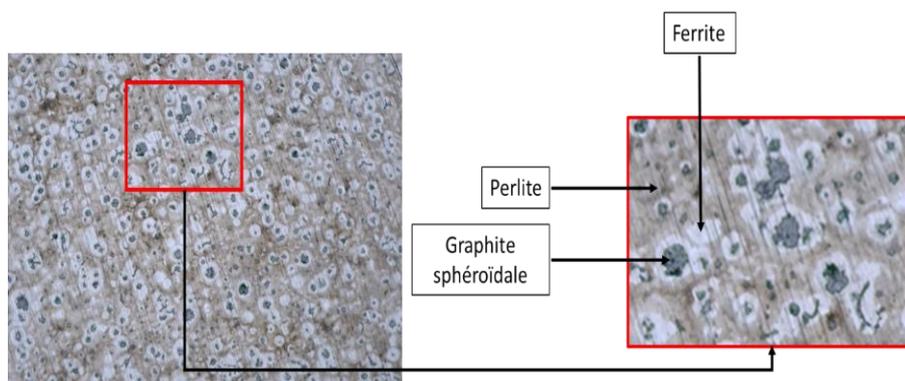


Figure IV-24 : Agrandissement de la zone sélectionné.

On remarque :

- Les sphéroïdes de graphite sont visibles sous forme de nodules sombres et arrondis dispersés dans la matrice. Ces sphéroïdes sont caractéristiques des fontes ductiles (ou fontes à graphite sphéroïdal).
- La ferrite apparaît en zones plus claires et constitue une phase douce et ductile de la microstructure. Ces zones claires sont visibles autour des nodules de graphite, formant une matrice continue et contribuant à la ductilité globale du collecteur.
- La perlite apparaît en zones plus sombres, souvent situées entre les régions ferritiques.

➤ **Confirmation de la structure**

- Graphite sphéroïdal, les nodules sombres bien formés et dispersés confirment que le graphite est présent sous forme sphéroïdale.
- Matrice ferrito-perlitique, la présence de zones claires (Ferrite) et de zones sombres lamellaires (Perlite) dans la microstructure confirme que la matrice est bien ferrito-perlitique.

IV.8.4 Essai dureté

Cet essai mesure la résistance du matériau à la pénétration. Il fournit des informations sur la dureté du collecteur, ce qui est essentiel pour évaluer ses propriétés mécaniques et sa durabilité



Figure IV-25 : Essai de dureté.

Afin de compléter la caractérisation du collecteur d'échappement, nous avons effectué un essai de dureté de Brinell (HB). On obtient un diamètre 3.87 mm et une dureté de 245 HB.



Figure IV-26 : Résultat de l'essai de dureté.

- Les fontes à graphite sphéroïdal avec une matrice ferrito-perlitique ont typiquement une dureté Brinell qui varie en fonction de la proportion de ferrite et de perlite dans la matrice.
- Une matrice principalement ferritique a tendance à être plus douce, tandis qu'une matrice principalement perlitique a tendance à être plus dure.
- Une dureté de 245 HB est indicatif d'une matrice mixte ferrito-perlitique, plutôt que d'une matrice totalement ferritique ou totalement perlitiques. Cela suggère une présence significative de perlite, qui augmente la dureté par rapport à une matrice complètement ferritique.

IV.9 Etude comparative

Une étude comparative a été réalisée entre le collecteur d'échappement référentiel et le collecteur d'échappement élaboré à travers une analyse de microstructure (microscope optique), une spectrométrie de masse, et une caractérisation de dureté. Les résultats obtenus révèlent des différences significatives entre les deux collecteurs.

IV.9.1 Composition chimique

Tableau IV-5 : Résultats de la composition chimique du collecteur d'échappement référentielle et le collecteur d'échappement élaboré.

Eléments	C%	Si%%	Mn%	Cu%	S%
Collecteur référentiel	3.8	2.34	0.3	0.028	0.005
Collecteur élaboré	3.7	2.37	0.5	0.2	0.01

Les résultats du tableau comparant les compositions chimiques de deux collecteurs d'échappement, tous deux en fonte à graphite sphéroïdale mais avec des matrices différentes (ferritique pour le collecteur référentiel et ferrito-perlitique pour le collecteur élaboré), révèle des variations significatives dans leurs constituants qui influencent leurs propriétés mécaniques et leur performance. Les éléments tels que le carbone et le silicium dans les deux collecteurs présentent des variations similaires. En revanche, les pourcentages de manganèse (0.3%) et de

cuivre (0.028%) dans le collecteur référentiel indiquent une matrice ferritique, tandis que les pourcentages de manganèse (0.5%) et de cuivre (0.2%) dans le collecteur élaboré indiquent une matrice ferrito-perlitique.

IV.9.2 Microstructure



Figure IV-27 : Microstructure (MO) du collecteur référentiel.

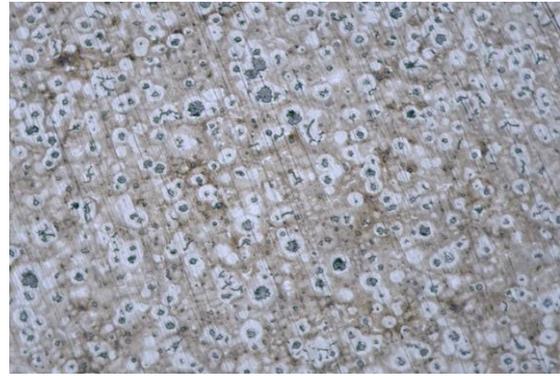


Figure IV-28 : Microstructure (MO) du collecteur élaboré.

Les nodules de graphite sphéroïdal sont bien distribués dans les deux microstructures. Pour le collecteur référentiel, la matrice environnante est principalement ferritique, ce qui est visible par la structure relativement uniforme et claire autour des nodules de graphite. La ferrite offre des propriétés de ductilité et de souplesse accrues.

Pour le collecteur élaboré la matrice présente une combinaison de ferrite (zones claires) et de perlite (zones sombres). La présence de perlite, formée par des couches alternées de ferrite et des nodules de graphite, indique une plus grande dureté et résistance à l'usure par rapport à une matrice uniquement ferritique.

IV.9.3 Dureté

Tableau IV-6 : Comparaison de dureté entre les deux collecteurs.

Le collecteur	Référentiel	Elaboré
Dureté (HB)	199	245

Les données indiquent une différence significative dans les propriétés des deux types de collecteurs d'échappement. Le collecteur référentiel avec une matrice ferritique a une dureté

plus faible, ce qui le rend plus apte à absorber les déformations, tandis que le collecteur élaboré avec une matrice ferrito-perlitique a une dureté plus élevée, ce qui le rend plus résistant à l'usure et à la déformation permanente.

IV.9.4 Poids et dimension

Tableau IV-7 : Comparaison de poids et dimensions entre les deux collecteurs.

Dimensions	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur d'entrée (mm)	Epaisseur de sortie (mm)	Poids (Kg)
Collecteur référentiel	373	29.3	9.28	13.5	2.7
Collecteur élaboré	371	33.3	18	19	3.6

Les données semblent représenter les dimensions physiques entre les deux types de collecteurs d'échappement.

Les dimensions du collecteur élaboré sont légèrement différentes de celles du collecteur référentiel. Il est plus court en longueur mais plus large et plus épais.

Le poids du collecteur élaboré est également plus élevé, ce qui suggère une densité plus grande ou une composition différente de matériaux par rapport au collecteur référentiel.

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la réalisation d'un collecteur d'échappement en fonte GS (Fonte à Graphite Sphéroïdal) en utilisant un four à induction, en mettant l'accent sur les différentes étapes de coulage et les essais mécaniques du sable. L'analyse de la fonte, effectuée à l'aide de techniques de spectrométrie et de microscopie optique, a confirmé la qualité et la conformité de la composition chimique et de la microstructure. La comparaison avec un collecteur de référence a montré des améliorations significatives en termes de propriétés mécaniques et de performance. Ces résultats démontrent l'efficacité du processus de fabrication et offrent des indications précieuses pour de futures optimisations, tout en soulignant l'importance d'un contrôle rigoureux à chaque étape pour assurer la production de pièces de haute qualité.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le stage pratique que nous avons effectué à l'entreprise ATELIERS TOUAZI – BOUMERDES nous a permis en premier lieu de nous intégrer dans le milieu professionnel. Il nous a permis d'appliquer nos connaissances théoriques dans le milieu industriel.

Ce mémoire de fin d'études présente une analyse détaillée de la conception, de la modélisation et de la réalisation d'un collecteur d'échappement en fonte à graphite sphéroïdal (fonte GS). À travers quatre chapitres principaux, les aspects clés de la fonderie, de la conception, de la simulation numérique et de la réalisation pratique ont été explorés pour démontrer l'efficacité et l'optimisation du processus de fabrication.

Le premier chapitre a fourni une base théorique solide sur les techniques de fonderie, en particulier celles adaptées à la fonte GS. L'évolution historique des méthodes de fonderie, du moulage en sable aux techniques modernes de simulation, a été discutée, mettant en lumière la combinaison de tradition et d'innovation pour répondre aux exigences de l'industrie moderne.

Le deuxième chapitre a détaillé le processus de conception du collecteur d'échappement. En utilisant des outils de conception assistée par ordinateur, les formes et les structures optimales ont été déterminées pour assurer des performances mécaniques et thermiques élevées. Ce chapitre a également couvert les premières étapes de la fabrication, y compris la préparation des moules et les essais mécaniques sur le sable de moulage.

Dans le troisième chapitre, l'utilisation du logiciel PROCAST pour la simulation numérique a été essentielle pour prédire et optimiser le comportement du matériau durant le processus de coulée. Les simulations ont permis d'identifier et de corriger les défauts potentiels, assurant ainsi une meilleure qualité des pièces moulées. L'intégration des masselottes a été particulièrement efficace pour éviter les défauts internes et garantir l'intégrité des pièces finales.

Le dernier chapitre a porté sur la réalisation pratique du collecteur. Chaque étape, de la fusion à l'analyse microstructurale, a été documentée pour vérifier la conformité du produit aux spécifications requises. Les tests mécaniques et les comparaisons avec des collecteurs de référence ont montré que le collecteur fabriqué répondait bien aux exigences de performance, tout en identifiant des améliorations possibles pour les futures optimisations.

En conclusion, ce mémoire démontre que la fonte à graphite sphéroïdal est un matériau approprié pour les applications exigeantes comme les systèmes d'échappement automobiles. La combinaison de techniques de fonderie traditionnelles et de simulations numériques modernes a permis d'atteindre des résultats optimaux, validant ainsi la méthodologie et les choix de conception adoptés. Ce travail ouvre également des perspectives pour de nouvelles recherches et des améliorations continues dans le domaine de la fonderie et de la conception de pièces automobiles.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [3] AMMAR Aziz, 'Etude, conception et réalisation d'une équerre de montage', Mémoire de fin d'études Master Professionnel, Université Mouloud MAAMERI de Tizi Ouzou, 2014/2015.
- [4] TAHIR Djedjiga, YASSAA 'Faridja, Étude de moulage du moyeu avant des véhicules en fonte GS ', Mémoire de fin d'études Master, Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, 2019- 2020.
- [5] BENZAADA Said, BOUZIANE M.T, 'Livre science des matériaux : propriétés et emploi métaux et alliages', Université Blida 1,2015.
- [6] Guide fonderie/ Remplissage d'une empreinte par du métal en fusion. Université Biskra.
- [7] MAMMARI Toufik, 'Contribution à l'étude théorique d'un four à induction', Mémoire de Magister Matériaux électrotechnique, Université Batna 2 ,2012.
- [8] CHAZE Louis, 'Fusion de la fonte au cubilot principes, technologie, aspects technico-économiques', CTIF 1998.
- [9] FOUAGUIG D, DAIS O, 'Evaluation du FMD d'un four à arc électrique au niveau l'entreprise d'ALFET Tiaret', Mémoire Master, 2017.
- [10] Institut National de Recherche et de Sécurité, Champs électromagnétiques, ED4211, june 2012.
- [11] CUININ Pierre, 'Centre français d'exploitation'. Technique de l'ingénieur. Métallurgie des alliages de fonderie, M 3520-2.
- [12] BELAHOUEL Mohamed, 'Métallurgie cours et exercices corrigés', Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, Faculté de Génie Mécanique, 2016/2017.
- [13] CHAIRI, A, 'Guide fonderie étude du moulage', Polycopie de cours, ISTA de Constantine, 2020-2021.
- [14] CHALAL Mustapha, BEN AMMAR Abdeljalil. LAISSANI Walid, 'Etude Et Réalisation Une Pièce Aluminium', Institut National Spécialisé de la Formation Professionnel De Bordj El-Bahri, 2015/2018.

- [15] ATMANI Ahmed, Etude de l'influence des traitements thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'une Fonte, ADI De type STT 700-2, 2012.
- [16] MARGERIE Jean-Claude, 'Propriétés des fontes grises ordinaires', Technique de l'ingénieur M 380,
- [17] TOURSAL Malek, 'Etude de l'influence des traitements thermiques sur la structure et les propriétés mécaniques des Fontes à Graphite Sphéroïdal', Université M'Hamed Bougera Boumerdès, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie des Matériaux, 2014.
- [19] BOUITNA Mohamed, Thèse de doctorat en sciences, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB, Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procédés, 2019.
- [20] ASM Handbook, ASM International, Volume 15 – Casting, 2008.
- [21] HEINE R. W, LOPER C. R., and ROSENTHAL P. C, 'Principles of Metal Casting'. 2nd Edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi, 1967.
- [22] Jain P. L, 'Foundry Technology', McGraw-Hill Education, 2003.
- [23] John R. Walker, 'Modern Metalworking', Tenth Edition, Workbook, 2002.
- [24] Peter Beeley, 'Foundry Technology', Butter worth-Heinemann; 2nd edition, 2001.
- [25] Casting, volume 15 of the 9th Edition Metals Handbook, with the second printing, 1992.
- [33] 1995-2015, Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, une société de Dassault Systèmes SE, 175 Wyman Street, Waltham, Mass. 02451 USA.
- [34] FOUAGUIGD, DAIS O, 'Evaluation du FMD d'un four à arc électrique au niveau l'entreprise d'ALFET Tiaret', Mémoire Master, 2017.
- [37] Saidi Kahina, 'Élaboration du métal des Fontes à Graphite Sphéroïdal' Université M'Hamed Bougera Boumerdès, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie des Matériaux, 2018.

Sites web

- [1] <https://www.gralcome.com>, (27/02/2024).
- [2] <https://fr.linkedin.com/pulse/historique-de-la-fonderie-fr%C3%A9d%C3%A9ric-humbert>, (04/03/2024).
- [39] <https://www.reliance-foundry.com/blog/definition-fonderie-fr>, (08/04/2024).
- [18] www.H7G6.FR, (05/04/2024).
- [26] <https://www.actiplace.com/quels-sont-avantages-et-inconvenients-fonderie>, (08/04/2024).
- [27] <https://www.solutionimport.eu>, (07/04/2024).
- [28] <http://souspression.canalblog.com>, (07/04/2024).
- [29] <https://metalblog.ctif.com>, (08/04/2024).
- [30] <https://www.loiselet.com/fr>, (10/04/2024).
- [31] <https://images.app.goo.gl/tvsXUxNvXMoVSeBc9>, (10/04/2024).
- [32] https://fr.wikiversity.org/wiki/M%C3%A9tallurgie_g%C3%A9n%C3%A9rale, (15/04/2024).
- [35] www.humeau.com.2pied-a-couliss, (15/04/2024).
- [36] www.techniques-ingenieur.fr, (20/05/2024).
- [38] <https://www.techniques-ingenieur.fr/INDUCTION>, (22/04/2024).

Annexe

❖ Annexe 1

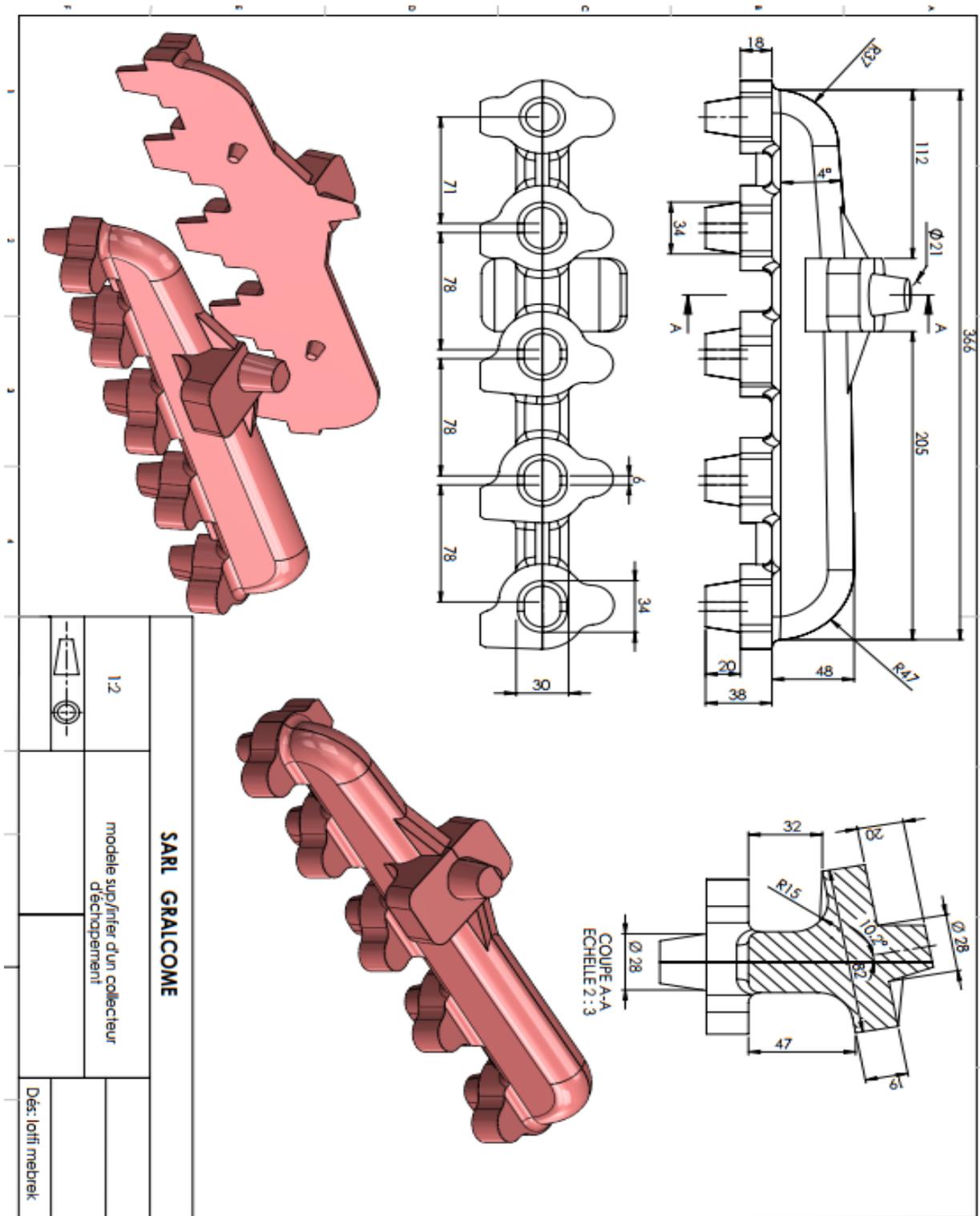


Figure A : Dessin de définition de model de collecteur d'échappement.

❖ Annexe 2

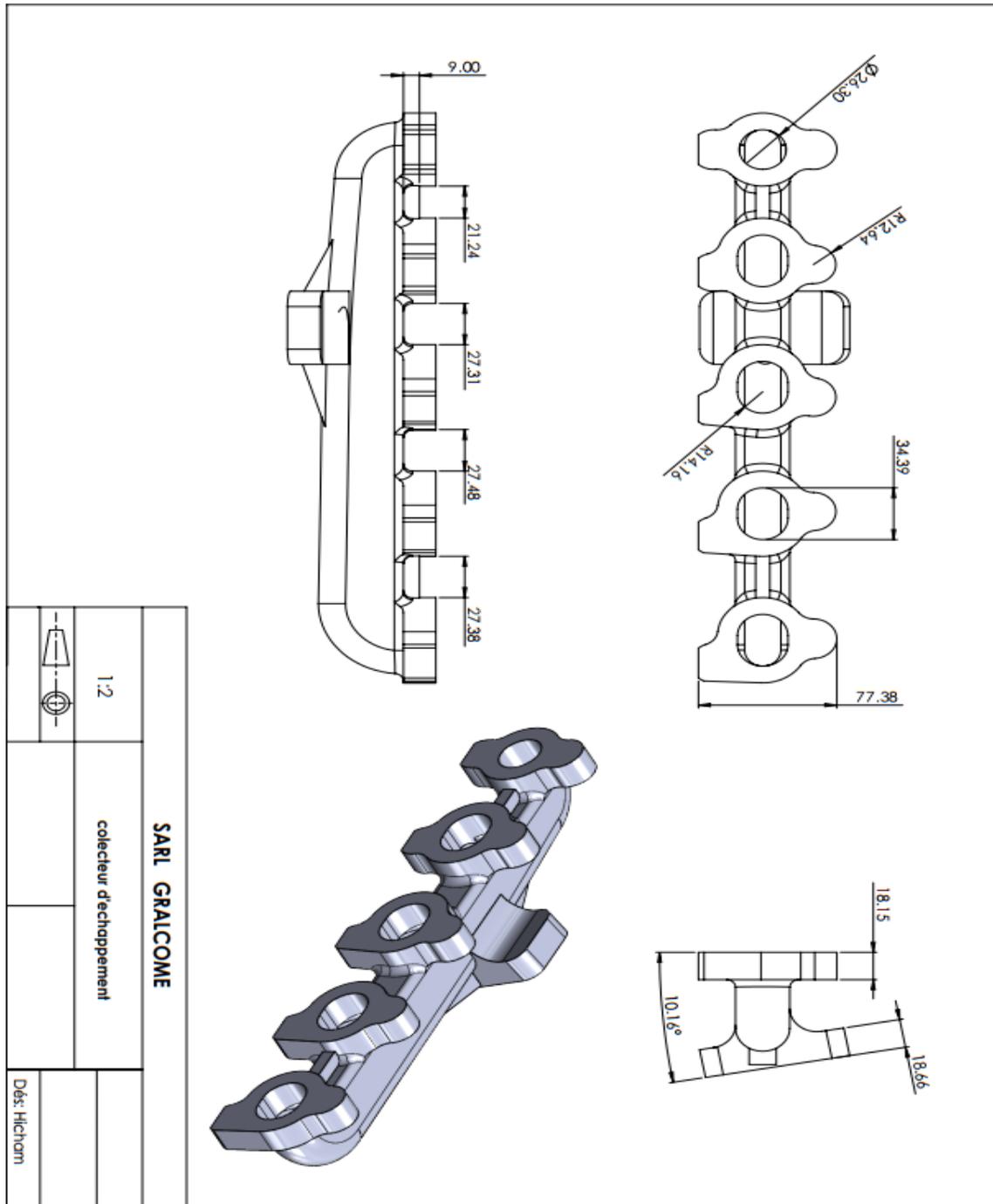


Figure B : Dessin de définition collecteur d'échappement.

❖ Annexe 3

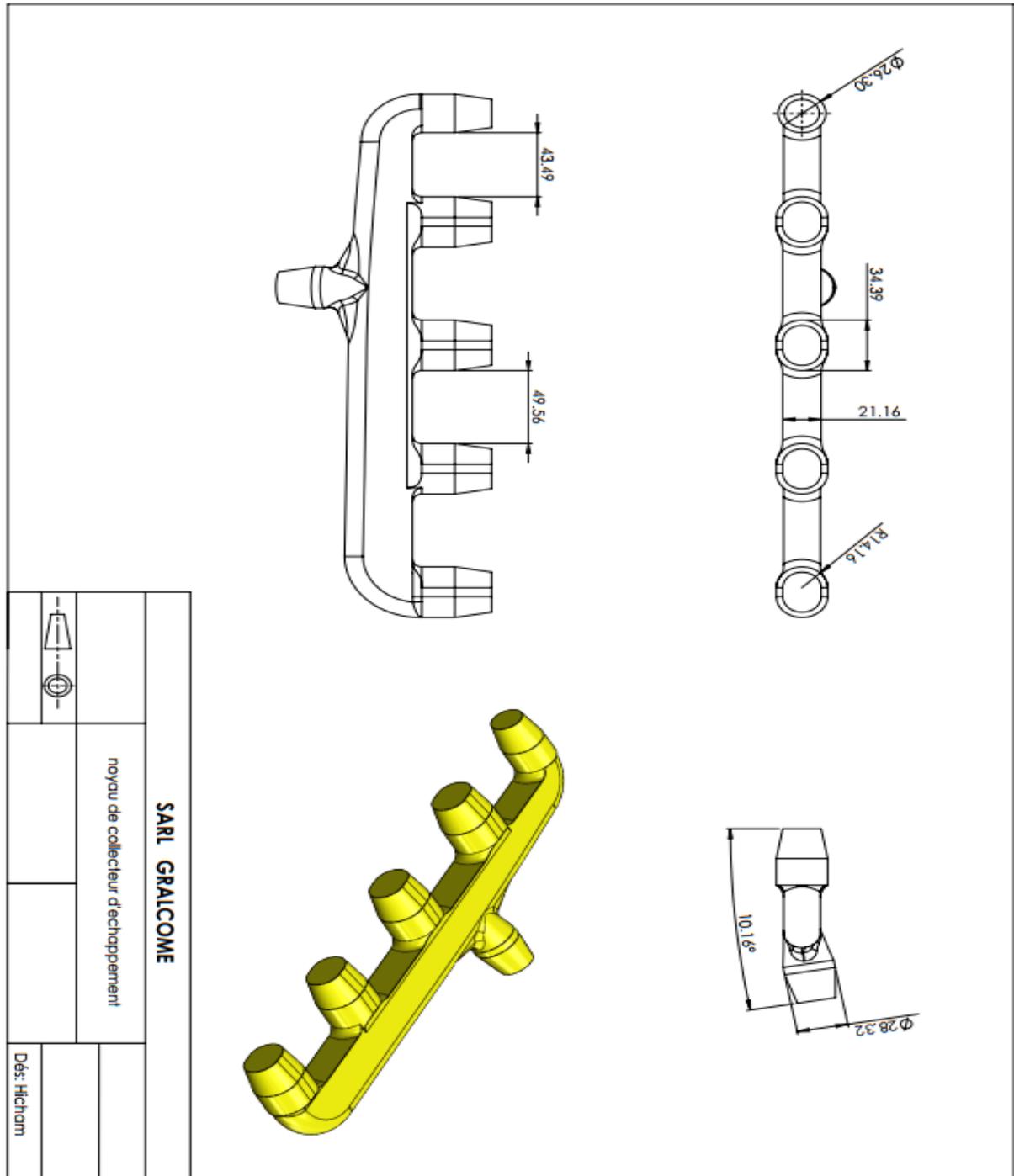


Figure C : Dessin de définition de noyau

