

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**Université 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**

**Procédé de Fabrication, Modélisation et Réalisation**  
**d'un Vilebrequin pour MOTO VMS 125 CC**  
**en Fonte à Graphite Sphéroïdal**

Présenté par :

 **Hicham BEN ALLAL**

Promotrice : Dr. Fadila GUERRACHE

Encadreur : Mr. Lounis OUGERGOUZ

**Promotion 2023- 2024**

## *Dédicaces*

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...  
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le  
respect, la reconnaissance*

*Aussi, c'est tout simplement que Je dédie ce mémoire*

*À MES CHÈRES PARENTS, aucune dédicace ne saurait  
exprimer mon respect, mon amour éternel et ma  
considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour  
mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour  
tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon  
enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne  
toujours. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé,  
bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous  
déçoive*

*Je dédie ce mémoire*

*À tous mes chères sœur NADJET, AMIRA*

*À mon frère HICHAM BOUDIAF*

*À tous mes amis, REDOUAN, HALIM, HOSSAM, FAISSAL,  
AYOUB, MOUHEMED, SOFIANEHICHEM, KHALIL.*

*HICHAM*

## *Remerciements*

*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 BOURAHLA 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.*

**المخلص:** تستكشف رسالة الماجستير هذه في الهندسة الميكانيكية تصميم العمود المرفقي *MOTO VMS 125 CC* لحديد الزهر الجرافيت الكروي GS من خلال مفهوم الهندسة العكسية. وتم تنفيذ العمل بالتعاون مع شركة متخصصة وتحت إشراف مشرف أكاديمي. تغطي الوثيقة الدراسة النظرية لمكاوي الزهر، وطرق التصميم بمساعدة الكمبيوتر *Solid Works*، ومحاكاة الصب *ESI ProCast*، بالإضافة إلى مراحل التصنيع والصهر وتحليل الخواص الميكانيكية والبنية الدقيقة للعمود المرفقي.

**الكلمات المفتاحية:** العمود المرفقي، هندسة المواد، حديد الزهر الجرافيت الكروي، المسبك، عملية التصنيع، المحاكاة، *MOTO VMS 125 CC*، *ProCast*، *Solid Works*

**Résumé :** Ce mémoire de master en génie mécanique explore la conception d'un vilebrequin pour *MOTO VMS 125 CC* en fonte à graphite sphéroïdal GS à travers le concept d'ingénierie inverse. Le travail a été effectué en collaboration avec une entreprise spécialisée et sous la direction d'un encadrant académique. Le document couvre l'étude théorique des fontes, les méthodes de conception assistée par ordinateur *Solid Works*, la simulation de la coulée *ESI ProCast*, ainsi que les étapes de fabrication, de fusion et d'analyse des propriétés mécaniques et microstructurales du vilebrequin.

**Mots clé :** Vilebrequin, Génie des matériaux, Fonte à graphite sphéroïdal, Fonderie, Procédé de fabrication, Simulation, *Solid Works*, *ProCast*, *MOTO VMS 125 CC*.

**Abstract:** This master's thesis in mechanical engineering explores the design of a *VMS 125 CC MOTO* crankshaft in GS spheroidal graphite cast iron through the concept of reverse engineering. The work was carried out in collaboration with a specialized company and under the direction of an academic supervisor. The document covers the theoretical study of cast irons, *Solid Works* computer-aided design methods, *ESI ProCast* casting simulation, as well as the stages of manufacturing, melting and analysis of the mechanical and microstructural properties of the crankshaft.

**Keywords:** *Crankshaft, Materials engineering, Spheroidal graphite cast iron, Foundry, Manufacturing process, Simulation, Solid Works, ProCast, MOTO VMS 125 CC.*

## Liste des figures

### Chapitre I : Concept du reverse engineering en fonderie-Généralité sur les fontes

<b>Figure I-1</b> : Vilebrequin. ....	8
<b>Figure I-2</b> : Diagramme binaire Fer Carbone [4]. ....	11
<b>Figure I-3</b> : (A) Structure d'une fonte GS [8] ; (B) Structure d'une fonte GL [9]. ....	14
<b>Figure I-4</b> : Structure d'une fonte blanche eutectique [7]. ....	15
<b>Figure I-5</b> : Composants de la moto. ....	19
<b>Figure I-6</b> : Fonte à graphite sphéroïdal observée au microscope optique [11]. ....	20
<b>Figure I-7</b> : Formes typiques du graphite selon DIN EN ISO 945ASTM A 247. I, graphite lamellaire ; II, graphite de type crabe ; III, graphite vermiculaire ; IV, graphite de recuit ; V, graphite sphéroïdal imparfait ; VI, graphite sphéroïdale [12]. ....	21
<b>Figure I-8</b> : Description de la solidification d'une fonte hyper eutectique [12]. ....	23
<b>Figure I-9</b> : Micrographie d'échantillon de fonte poli et attaque. (a) fonte GS avec 2,4 % de Si, matrice ferrito-perlitique, (b) fonte GS avec 3,04 % de Si, matrice essentiellement ferritique [13]. ....	25
<b>Figure I-10</b> : Micrographie de fonte perlitique polie et attaquée [13]. ....	25

### Chapitre II: Etude expérimentale : Conception, simulation et réalisation d'un vilebrequin

<b>Figure II-1</b> : Schéma représentatif des opérations de la fabrication d'une pièce .....	33
<b>Figure II-2</b> : (1) et (2) vilebrequin 125cc. ....	35
<b>Figure II-3</b> : Pied à coulisse. ....	35
<b>Figure II-4</b> : Logiciel SOLIDWORKS. ....	36
<b>Figure II-5</b> : Interface de logiciel SOLIDWORKS. ....	36
<b>Figure II-6</b> : Conception vilebrequin .....	37
<b>Figure II-7</b> : Vilebrequin final .....	37
<b>Figure II-8</b> : Châssis. ....	38
<b>Figure II-9</b> : Logiciel ESI ProCast. ....	40
<b>Figure II-10</b> : Interface de logiciel ProCast. ....	40
<b>Figure II-11</b> : Vilebrequin et système de coulé sur PROCAST. ....	41
<b>Figure II-12</b> : (1) le maillage et (2) la direction de gravité. ....	41
<b>Figure II-13</b> : Quelques étapes de la simulation .....	42
<b>Figure II-14</b> : 1-4 Modèle du vilebrequin en bois. ....	43
<b>Figure II-15</b> : (A) Calibreur, (B) Balance analytique. ....	44
<b>Figure II-16</b> : (A) Appareil de contrôle de perméabilité, (B) Appareil de contrôle d'humidité. ....	45
<b>Figure II-17</b> : Machine des essais mécaniques (cisaillement et compression). ....	45
<b>Figure II-18</b> : (1,2) Châssis inférieur et supérieur, (3) Châssis final. ....	47
<b>Figure II-19</b> : (1) et (2) Four à induction. ....	48
<b>Figure II-20</b> : (1) Poche de traitement et (2) Intérieur de la poche. ....	49
<b>Figure II-21</b> : (1) et (2) Spectromètre de masse mL300. ....	49
<b>Figure II-22</b> : Bilan de charge pour obtenir une fonte à graphite sphéroïdale de matrice perlitique. ....	50

<b>Figure II-23</b> : Charges.....	51
<b>Figure II-24</b> : Fusion de matière première. ....	51
<b>Figure II-25</b> : (1) et (2) Coulage dans la poche de traitement de sphéroïdisation au Mg. ....	53
<b>Figure II-26</b> : (1) et (2) Etape de coulée de la poche de coulée dans le moule.....	53
<b>Figure II-27</b> : (1) Appareil de polissage, (2) Microscope optique et (3) Appareille de dureté. .....	54
<b>Figure II-28</b> : (1) Analyse par spectromètre et (2) Analyse par microscope optique. ....	55
<b>Figure II-29</b> : Essai de dureté.....	56

### **Chapitre III: Résultat et discussion**

<b>Figure III-1</b> : Dessin de définition du vilebrequin.....	57
<b>Figure III-2</b> : 1-4 Représentent l'écoulement du métal dans le moule en fonction de la température.....	58
<b>Figure III-3</b> : Evolution de l'écoulement du métal dans le moule en fonction de la température avec le système de masselotte. ....	60
<b>Figure III-4</b> :Vilebrequin réalisé.....	60
<b>Figure III-5</b> : Observation microstructurale (X 100). ....	62
<b>Figure III-6</b> : Résultat de l'essai de dureté. ....	63

## Liste des tableaux

### Chapitre I: Concept du reverse engineering en fonderie-Généralité sur les fontes

<b>Tableau I-1</b> : Composition chimique de la fonte [6].....	12
<b>Tableau I-2</b> : Propriétés selon les plans .....	21
<b>Tableau I-3</b> : Composition, à titre indicatif, de la fonte de base pour l'obtention des fontes à graphite sphéroïdale non alliées [13]. .....	24
<b>Tableau I-4</b> : Caractéristiques de traction des fontes à graphite sphéroïdale (norme EN 1563).....	27
<b>Tableau I-5</b> : Dureté Brinell en fonction de l'épaisseur pour différentes fontes. [13].....	27
<b>Tableau I-6</b> : Avantages et les inconvénients .....	29

### Chapitre II: Etude expérimentale : Conception, simulation et réalisation d'un vilebrequin

<b>Tableau II-1</b> : Caractéristique de la pièce.....	34
<b>Tableau II-2</b> : Composition de sable du moulage.....	43
<b>Tableau II-3</b> : Résultats des tests et les essais du mélange.....	46
<b>Tableau II-4</b> : Intervalle d'acceptation les caractéristique. ....	46
<b>Tableau II-5</b> : Composition chimique par le spectromètre mL300. ....	52

### Chapitre III: Résultat et discussion

<b>Tableau III-1</b> : Composition chimique d'un vilebrequin obtenue par spectrométrie optique à étincelle. ....	61
<b>Tableau III-2</b> : Résultats de la composition chimique d'un vilebrequin référentielle et le vilebrequin élaboré.....	63
<b>Tableau III-3</b> : Comparaison de dureté entre les deux collecteurs. ....	64
<b>Tableau III-4</b> : Comparaison de poids et dimensions entre les deux collecteurs.....	64

## Symbole et abréviation

**FGS** : Fonte à Graphite Sphéroïdale.

**GS** : Graphite Sphéroïdal.

**GL** : Graphite Lamellaire.

**GCV** : Graphite Vermiculaire ou Compacte.

**CAO** : Conception Assistée par Ordinateur.

**EN** : Norme Européenne.

**GJ** : Fonte.

**C** : Carbone.

**S** : Soufre.

**Mg** : Magnésium.

**Fe** : Fer.

**Cu** : Cuivre.

**Ni** : Nickel.

**P** : Phosphore.

**Si** : Silicium.

**Al** : Aluminium.

**Fe<sub>3</sub>C** : Cémentite.

**M** : Mètre.

**Cm** : Centimètre.

**Mm** : Millimètre.

**µm** : Micromètre.

**Mpa** : Méga Pascal.

**Gpa** : Giga Pascal.

**HB** : dureté de Brinells (Hardness Brinell).

**C°** : Degrée Celsius.

**%m** : Pourcentage massique

# Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

## Chapitre I Concept du reverse engineering en fonderie-Généralité sur les fontes

I.1 Reverse engineering .....	5
I. 1. 1 Introduction.....	5
I. 1. 2 Utilisation de l'ingénierie inverse.....	5
I. 1. 3 Fonctionnement du reverse engineering.....	5
I. 1. 4 Avantage et inconvénient.....	6
I.2 Vilebrequin.....	7
I. 2. 1 Définition.....	7
I. 2. 2 Fonctionnement d'un vilebrequin.....	8
I.3 Alliages ferreux .....	10
I. 3. 1 Aciers.....	110
I. 3. 2 Fontes.....	10
I. 3. 3 Diagramme d'équilibres Fer-Carbone.....	10
I.4 Généralité sur les fontes .....	11
I. 4. 1 Définition métallurgique d'une fonte.....	12
I. 4. 2 Composition chimique.....	12
I. 4. 3 Type des fontes.....	13
I. 4. 4 Constituants de base des fontes.....	16
I. 4. 5 Avantages et inconvénients des fontes.....	17
I. 4. 6 Champ d'application.....	18
I.5 Fonte à graphite sphéroïdale GS .....	20
I. 5. 1 Définition.....	20
I. 5. 2 Graphite.....	20
I. 5. 3 Graphite sphéroïdal.....	21

I. 5. 4 Sphéroïdisation.....	22
I. 5. 5 Solidification du graphite sphéroïdal dans les fontes.....	22
I. 5. 6 Structures obtenues.....	23
I. 5. 7 Compositions chimiques visées.....	23
I. 5. 8 Structure de la matrice des principales nuances de fontes à graphite sphéroïdale.....	24
I. 5. 9 Influence des éléments spéciaux.....	25
I. 5. 10 Caractéristiques mécaniques de la fonte à graphite sphéroïdale.....	26
I.6 Avantages et inconvénients des fontes à graphite sphéroïdale.....	29
I.7 Domaine d’application des fontes à graphite sphéroïdale.....	29

**Chapitre II Etude expérimentale : Conception, simulation et réalisation d’un vilebrequin**

II.1 Introduction.....	32
II.2 Caractère du travail de la pièce (condition de service de la pièce).....	33
II.3 Acquisition de la pièce référentielle .....	34
II.4 Prise de cotes par pied à coulisse .....	35
II.5 Conception sur SolidWorks .....	35
II. 5. 1 Présentation de logiciel.....	35
II. 5. 2 Etapes de la conception.....	36
II.6 Choix de châssis.....	38
II.7 Système de coulé et alimentation.....	38
II.8 Etude de la simulation (ESI ProCast) .....	39
II. 8. 1 Présentation de logiciel.....	39
II. 8. 2 Etapes de la simulation.....	40
II.9 Atelier de Modelage et Noyautage .....	42
II.10 Préparation et caractérisation du sable.....	43
II. 10. 1 preparation du sable .....	43
II. 10. 2 Caracterisation et analyse du sable.....	43
II.10.3 Matériels utilises.....	44
II.10.4 Mode opératoire.....	45
II.10.5 Résultats.....	45
II.11 Moulage et noyautage .....	46
II.12 Fusion et Elaboration .....	47
II. 12. 1 Equipements.....	47
II. 13. 2 Elaboration.....	50
II. 13. 3 Fusion.....	51

II.14 Opération de coulage .....	52
II.14.1 Opération de Parachèvement .....	53
II.15 Analyse et caractérisation .....	54
II. 15. 1 Matériel utilisés.....	54
II. 15. 2 Analyse par spectromètre.....	55
II. 15. 3 Observation au microscope optique.....	55
II. 15. 4 Essai dureté.....	566
<b>Chapitre III Résultat et discussion</b>	
III.1 Introduction .....	57
III.2 Conception.....	57
III.3 Simulation .....	58
III. 3. 1 Sans masselotte.....	58
III. 3. 2 Avec masselotte.....	60
III.4 Résultat de la réalisation.....	60
III.5 Analyse chimique .....	61
III.6 Microstructure .....	61
III.7 Dureté .....	62
III.8 Etude comparative .....	63
III.8. 1 Composition chimique.....	63
III. 8. 2 Microstructure.....	64
III. 8. 3 Dureté.....	64
III. 8. 4 Poids et dimension.....	64
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>66</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>68</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>69</b>

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

Comme toutes les industries manufacturées en Algérie, la fonderie a dû faire face à une exigence de compétitivité de plus en plus importante dans un contexte économique où le besoin d'intégration est plus que jamais présent. Les entreprises du secteur ont dû mener des ajustements et des restructurations successives pour coordonner leurs efforts afin de combler le besoin, notamment dans le secteur mécanique.

Pour l'entreprise GRALCOME, cela impliquait des frais d'investissement importants, en particulier pour mécaniser les chaînes de moulage, malgré que le processus d'amortissement est long. Mais ces frais, au final sont largement compensés par l'élargissement des domaines d'intervention et la satisfaction des clients. GRALCOME ne s'est pas contentait de fabriquer des produits bruts mais s'investit dans la conception de sous-ensembles complexes pour le compte d'autres industries automobile, ferroviaire, agricole, travaux publics, énergie...

Afin de maintenir une avancée technologique notable, bénéficiant de plusieurs années d'expertise accumulées sur le métier et que ne possèdent pas encore les nouveaux concurrents, GRALCOME est donc en train de basculer d'une conception basée sur un processus d'ingénierie linéaire vers un processus d'ingénierie concourante. La problématique d'intégration des outils et des méthodes devient alors une préoccupation centrale pour perdurer dans le contexte socioéconomique particulier que vit notre pays pour continuer son évolution technique, commerciale et économique.

C'est dans ce contexte de recherche de nouveaux outils intégrés et de nouvelles méthodes que s'inscrit ce travail de PFE : La maîtrise de la phase de conception pourra redonner l'avantage aux fonderies à haut niveau de technicité où le processus de prise de décisions par rapport au produit demandé dépend fortement de sa conception (géométrie, matériaux utilisés, moyens mis en œuvre, savoir-faire et compétence, etc.).

Ce travail de PFE est le fruit de coopération université-secteur socioéconomique visant à valoriser les efforts en ingénierie dans le domaine mécanique. Il ouvre la voie à un dialogue plus constructif pour évaluer les efforts de formation de l'université Algérienne vers une meilleure prise en charge des problèmes techniques des entreprises locales.

Ainsi, en se basant sur le concept de reverse engineering, nous avons contribué, en profitant de l'apport de GRALCOME, à l'intégration de la technologie de fonderie pour la réalisation d'une pièce automobile, à savoir un vilebrequin en fonte GS.

Le manuscrit se divise en trois chapitres, à savoir :

Un premier chapitre englobant les notions de base du reverse engineering et les données essentielles relatives à l'élaboration de la fonte GS.

Un deuxième chapitre regroupant les méthodes expérimentales mis en œuvre dans la réalisation des opérations de conception, simulation et réalisation d'un vilebrequin.

Un troisième chapitre dédié à la discussion des résultats obtenus.

Finalement, se terminons ce mémoire par une conclusion générale qui illustre les principaux résultats obtenus à travers cette étude et une annexe. A l'issue de notre étude des perspectives sont proposées pour améliorer le processus considéré.



## **SARL GRALCOM**

Une entreprise familiale Algérienne existe depuis 1991 sous le nom Les ateliers TOUAZI, devenue la SARL GRALCOME depuis 2001, La société inscrit sa stratégie dans une logique de performance à l'effet d'un positionnement durable dans le domaine de la maintenance industrielle, à développer des partenariats avec de grandes entreprises spécialisées, de renommée mondiale, qui à guider leur action.

Dans le souci de toujours mieux faire, en 2015, Sarl GRALCOME a installé une fonderie de fonte afin d'élargir ses secteurs d'activité, compléter sa gamme de produits et réaliser des pièces plus complexes.

Sarl GRALCOME est implantée à la zone industrielle D'Ouled Moussa, W.Boumerdes



*Figure 1 : Sarl Gralcom.*

**Elle se compose de trois filiales**

**1. Ateliers**

- A. Usinage de précision
- B. Chaudronnerie.

**2. Fonderie**

**3. Import-export**

Ils fabriquent et réparent tous types des pièces d'usure de (briqueterie, Carrière et cimenterie), en appliquant des produits de rechargement de haute résistance à l'usure par abrasion, par érosion, par le choc, par température etc...



*Figure 02 : Briqueterie.*

Aujourd'hui, Sarl GRALCOME compte :

1. Atelier d'usinage conventionnel et numérique environs 20 machines. (Fabrication de pièces mécaniques d'usure pour les briqueteries, cimenteries, carrières et mines.)
2. Atelier de soudage de plus de 20 postes de travail.
3. Magasin de produits de rechargement et assemblage spécifique.
4. Fonderie de fonte et d'acier de capacité de 10 tonnes/jour. (Fabrication de tampons destinées aux chambres de tirage, accouplements, grilles caniveaux, bancs publics, supports et corps de pompes hydrauliques...etc.)

Distribution partenaire officiel de :

- Welding Alloys Group.
- MARTEC.
- PRODUR.
- NLMK.
- MESSERSI Packging.
- DHM Turquie (Equipement de fonderie).

On était chanceux d'avoir pris part de SARL GRALCOM au cours de notre stage qui a été très bénéfique pour l'enrichissement de notre projet de fin d'études.

*Chapitre I :*

**Concept du Réverse Engineering en  
Fonderie, Généralité sur les Fontes GS**

## **I.1 Reverse engineering**

### **I.1.1 Introduction**

L'ingénierie inverse est le processus d'analyse d'un objet existant, de le décomposer en ses composants principaux et de mesurer ses dimensions critiques pour comprendre sa fonction et sa méthodologie. Dans l'industrie de l'ingénierie mécanique, cela permet ensuite de recréer la conception selon des spécifications correspondantes ou améliorées.

Il est parfois abrégé en « RE » et le processus lui-même est effectué par un ingénieur de conception. Plutôt que le produit soit conçu et fabriqué à partir de zéro, l'ingénierie inverse nous permet de comprendre l'intention de conception originale. L'objet ou le produit peut être une pièce mécanique, un produit acheté et utilisé quotidiennement par les consommateurs ou encore une sculpture [1].

### **I.1.2 Utilisation de l'ingénierie inverse**

L'ingénierie inverse est utilisée dans de nombreuses industries différentes, car l'exigence peut souvent être d'améliorer le produit, de le dupliquer ou d'apprendre de la conception pour une utilisation et une fabrication future. Il peut être utilisé dans des secteurs tels que l'automobile, les produits de consommation, la chimie, l'électronique et la conception mécanique. Voici quelques-unes de ses utilisations plus larges :

- Améliorer un produit
- Récupération de données ou infrastructure informatique cassée
- Conversion de dessins papier de conception en données numériques 3D

Dans le cas de l'amélioration d'un produit, cela signifie que le processus permet de le rendre plus facilement, plus rapidement ou plus efficacement pour son usage initial. Qu'il s'agisse de repenser une voiture, d'améliorer un logiciel de jeu et tout le reste [1].

### **I.1.3 Fonctionnement du reverse engineering**

Les services d'ingénierie inverse s'effectuent à l'aide d'équipements particuliers, tels qu'une machine de numérisation 3D ou des outils de mesure traditionnels, par un cabinet de conseil en conception de produits.

**Scanner votre produit** - le scanner 3D mesure des milliers de points sur la surface d'un objet pour capturer sa forme. Dans des exemples plus simples, l'objet peut simplement être mesuré à l'aide de pieds à coulisse, de jauges et de micromètres

**Convertissez ces données** – le logiciel du scanner 3D transforme ces données en informations qui sont représentées par un programme de CAO. Plus traditionnellement, une nouvelle CAO est créée mais en utilisant les dimensions nouvellement obtenues.

**Ajustez la conception comme vous le souhaitez** – un ingénieur peut apporter des ajustements au modèle CAO à ce stade. Cela fournit une plate-forme pour améliorer la fonctionnalité et la fiabilité selon les besoins avant de l'enregistrer dans un format approprié pour être fabriqué.

**Créez votre produit amélioré** – lorsque votre fichier numérique 3D universel est disponible, vous pouvez ensuite le reproduire à l'aide de méthodes de fabrication telles que l'impression 3D, la CNC et le moulage par injection [1].

#### **I.1.4 Avantage et inconvénient**

##### **➤ Avantage**

##### **Réplication de pièces héritées**

Si vous possédez une machine composée de composants désormais anciens ou cassés, RE signifie que vous pouvez la démonter, identifier comment elle a été conçue, puis la réparer et la mettre à jour.

##### **Complications du fabricant de l'équipement d'origine (OEM)**

Si le fabricant d'origine n'est plus en activité pour une raison quelconque ou s'il ne dispose plus des mesures de conception, vous n'avez pas à vous inquiéter. RE signifie que vous n'êtes pas limité car le processus vous permet de fabriquer des composants de remplacement.

##### **Apporter des améliorations au produit**

Si vous avez un produit réussi, vous pouvez utiliser RE pour revenir à l'essentiel, examiner la conception et améliorer l'efficacité du produit. Alternativement, si vous avez un produit qui a désespérément besoin d'une refonte, vous pouvez également le faire via RE.

##### **Inspiration de nouveaux produits ou analyse de la concurrence**

Vous pouvez utiliser RE pour susciter des idées de nouveaux produits. Effectuez une analyse des produits de vos concurrents pour penser de manière innovante et réfléchir afin de rivaliser avec eux.

### **Archivage numérique**

Une fois qu'un objet a fait l'objet d'une ingénierie inverse, les données CAO peuvent ensuite être stockées numériquement et des sauvegardes effectuées en conséquence. Ensuite, si cet objet est endommagé ou si des musées ou des entreprises doivent dupliquer ou refaire le produit, cela peut se produire [1].

#### ➤ **Inconvénient**

#### **Tous les composants ne peuvent pas être numérisés en 3D**

Certains objets extrêmement petits peuvent être plus difficiles à recréer ou si la conception est trop complexe. Alternativement, s'il manque des pièces ou s'il est gravement fissuré, cela ne permettra pas à la machine 3D de donner une analyse complètement précise de l'ensemble du produit [1].

## **I.2 Vilebrequin**

### **I.2.1 Définition**

Un vilebrequin est une pièce mécanique essentielle dans de nombreux moteurs, qui transforme le mouvement de va-et-vient des pistons en un mouvement de rotation. Il joue un rôle crucial dans le fonctionnement des moteurs à combustion interne, comme ceux utilisés dans les automobiles.

Le vilebrequin n'est généralement pas considéré comme une pièce d'usure et peut durer plusieurs centaines de milliers de kilomètres sans problème. Cependant, plusieurs facteurs peuvent influencer sa longévité : [8]

- Le type de moteur : les motrices hautes performances peuvent entraîner une usure plus rapide.
- La qualité des matériaux utilisés : les vilebrequins en alliages spéciaux ont tendance à durer plus longtemps.
- L'entretien du moteur, notamment les vidanges d'huile régulières, contribue à prolonger la durée de vie du vilebrequin en réduisant l'usure.

- Les conditions de fonctionnement extrêmes, comme les charges lourdes constantes, peuvent accélérer l'usure du vilebrequin.
- En cas de défaillance, il est souvent plus rentable de remplacer le vilebrequin que de le réparer, en raison de la complexité de sa structure et de son rôle central dans le moteur.

Donc dans des conditions normales d'utilisation et avec un bon entretien, un vilebrequin peut généralement durer toute la vie du véhicule. Mais des facteurs comme le type de moteur et les conditions d'utilisation peuvent affecter sa durabilité.



*Figure I-1 : Vilebrequin.*

### **I.2.2 Fonctionnement du vilebrequin**

Le vilebrequin joue un rôle crucial dans les moteurs à combustion interne. Lorsque l'énergie libérée par la combustion du carburant et de l'air met le piston en mouvement dans le cylindre, cette force est transmise à la bielle, qui la transmet au vilebrequin. Le vilebrequin transforme les mouvements linéaires des pistons en mouvements de rotation, en utilisant sa structure pour transmettre les forces sous forme de couple. Cela permet au piston de se déplacer en direction du cylindre après avoir atteint le point mort bas, où il comprime le mélange nécessaire à la combustion ou expulse les gaz d'échappement de la combustion. Dans les moteurs à plusieurs cylindres, la structure spécifique du vilebrequin détermine la séquence d'allumage du moteur. [10]

### **I.3 Alliages ferreux**

La production d'alliages à base de fer, c'est-à-dire ceux dont le fer est le principal constituant, est supérieure à celle de tous les autres types de métal. Ce sont d'importants matériaux de construction industriels. Les alliages à base de fer, à de rares exceptions près, contiennent tous du carbone comme élément d'alliage et en proportions diverses. Ainsi, les aciers titrent moins de 2 % de carbone ; les fontes, au contraire, contiennent plus de 2 % de carbone. Dans ces deux cas peuvent être ajoutés d'autres éléments d'alliage en quantités très diverses, sous réserve que l'élément fer reste le plus important [2].

#### **I.3.1 Aciers**

Les aciers sont des alliages fer-carbone qui comportent aussi une concentration appréciable d'autres éléments. Il existe des milliers d'alliages de ce type dont la composition est différente, de même que les traitements thermiques qu'ils ont subis. Les propriétés mécaniques dépendent de la teneur en carbone, laquelle est normalement inférieure à 1 %m.

On classe quelques-uns des aciers les plus courants selon leur concentration en carbone :

- Aciers à faible teneur en carbone
- Aciers à moyenne teneur en carbone
- Aciers à forte teneur en carbone

#### **I.3.2 Fontes**

En termes généraux, les fontes constituent une classe d'alliages à base de fer dont la teneur en carbone est supérieure à 2,14 %m ; en pratique, la plupart des fontes contiennent de 3 % à 4.5 %m de C et d'autres éléments d'alliage.

Quelques-uns des fontes :

- Fonte grise,
- fonte ductile (ou nodulaire)
- fonte blanche et fonte malléable [3].

#### **I.3.3 Diagramme d'équilibres Fer-Carbone**

La plupart des matériaux sont des mélanges d'atomes ou de molécules de nature différente. Dans certains cas, les constituants (atomes ou molécules) du matériau sont solubles en toute proportion et les mélanges sont homogènes. Dans d'autres cas, les constituants ne sont

que partiellement miscibles. Le matériau contient alors plusieurs phases de composition et structure différentes. La combinaison de ces phases produit différentes microstructures qui influencent considérablement les propriétés et les caractéristiques techniques des matériaux. Les diagrammes de phases constituent la base pour analyser la formation des microstructures. Ils définissent d'une façon simple les états d'équilibre entre les phases, la figure I.1 montre le diagramme binaire fer carbone [4].

Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans tout site technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone. La présente section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles. Les alliages à teneur en carbone inférieure ou égale à 2,06 % C s'appellent aciers et dont la teneur en carbone est supérieure à 2,06 % C s'appellent fontes.

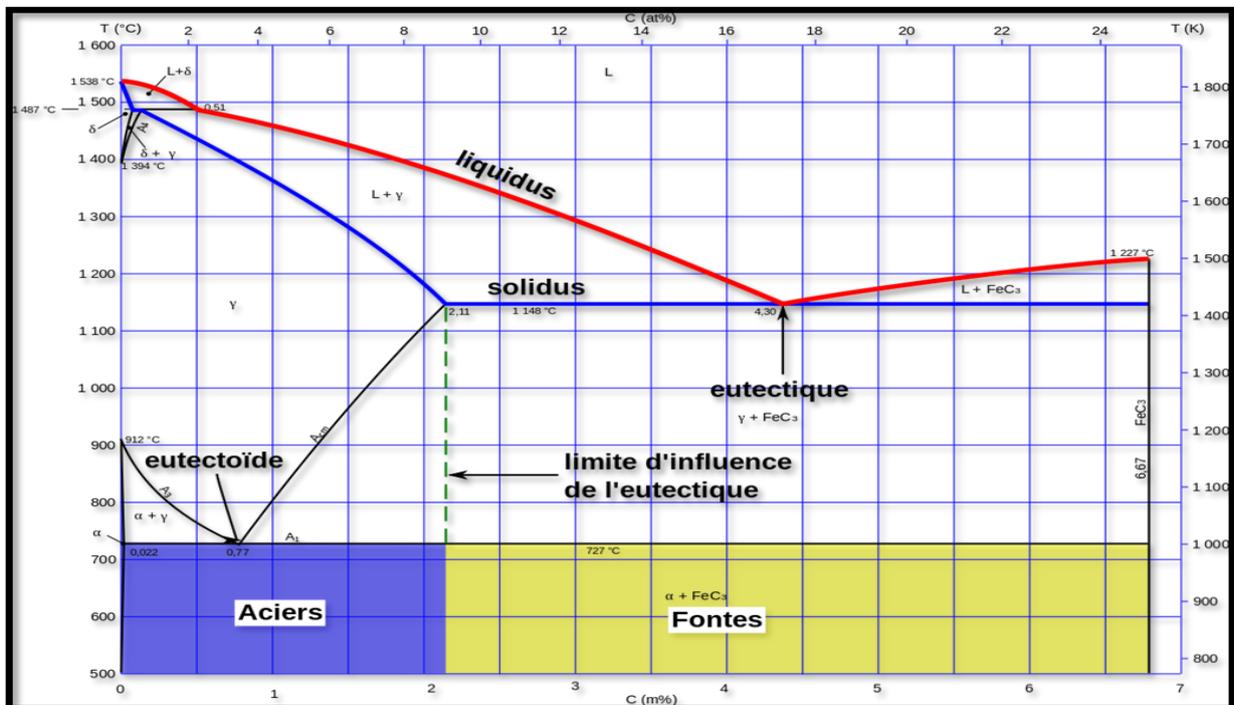


Figure I-2 : Diagramme binaire Fer Carbone [4].

#### I.4 Généralité sur les fontes

Les alliages de fonderie constituent un ensemble de matériaux métalliques permettant la réalisation de pièces par moulage. Les propriétés des pièces qui en résultent dépendent étroitement des facteurs suivants :

- Elaboration et le traitement du métal liquide ;

- Solidification et le refroidissement dans le moule ;
- Conditions de démoulage et de refroidissement ;
- Traitements thermiques complémentaires éventuels.

Parmi les alliages de fonderie, les fontes ont une grande importance ; elles forment une famille de matériaux ferreux qui, malgré sa complexité, peut être classée de façon logique. Elle présente, bien sûr, certaines analogies avec les aciers [5].

#### **I.4.1 Définition métallurgique d'une fonte**

Se définir comme un alliage à base de fer et de carbone, dont la teneur en carbone est suffisante pour que la fusion et la solidification se produisent dans un intervalle de température nettement plus bas que le point de fusion du fer et relativement étroit, soit généralement entre 1 100 et 1350 °C [6].

#### **I.4.2 Composition chimique**

En dehors du fer et du carbone, quatre autres éléments entrent principalement dans la composition des fontes non alliées :

*Tableau I-1 : Composition chimique de la fonte [6].*

<b>Eléments</b>	<b>Pourcentage massique</b>
<b>Silicium</b>	1 à 3 %
<b>Manganèse</b>	0,1 à 1 %
<b>Phosphore</b>	jusqu'à 1,3 %
<b>Soufre</b>	Jusqu'à 0.15 %

Le silicium, en particulier, est un élément indispensable au fondeur pour régler le comportement métallurgique et la structure des fontes.

Toute fonte industrielle contient aussi, parfois volontairement ajoutés, des éléments à l'état de traces utiles, nocives ou négligeables eu égard à la qualité recherchée.

Les propriétés peuvent en outre être améliorées ou ajustées en vue de certaines applications grâce à des éléments d'alliage dont l'action présente, malgré l'abondance du carbone, de profondes analogies avec le cas des aciers ; les principaux sont les suivants :

- Nickel (jusqu'à 35 %) ;
- Chrome (jusqu'à 30 %) ;

- Molybdène (jusqu'à 3 %) ;
- Cuivre, étain, vanadium, aluminium, ...

Ces mêmes éléments se retrouvent d'ailleurs souvent à l'état de traces, comme impuretés parfois utiles des fontes non alliées [6].

### **I.4.3 Type des fontes**

#### **I.4.3.1 Fontes grises**

Les fontes grises sont caractérisées par la présence de carbone sous forme de graphite. L'analyse de ces fontes est souvent réalisée à l'aide du diagramme fer-graphite stable, à condition que la fonte renferme des éléments graphitants comme le silicium, et que la température de coulé e soit suffisamment élevée. Ce dernier point favorise la réduction de la silice et la dissolution du silicium dans la fonte liquide, spécialement lors d'un refroidissement lent [7].

##### a) Fontes grises à graphite lamellaire

Ces alliages sont peut-être plus connus sous le nom de fontes « ordinaires » car ce sont les plus anciennement utilisées en construction mécanique, en architecture métallique, chauffage domestique et industriel, équipement de voirie. Aujourd'hui encore, elles ont une place prépondérante en fonderie.

Leur structure comprend essentiellement du graphite en lamelles – en paillettes –, ramifiées et arrangées en ensembles cellulaires, incluses dans une matrice le plus souvent perlitique ou perlito-ferritique. Elles peuvent contenir assez de phosphore pour former un réseau de cristaux analogues à des carbures mais moins durs.

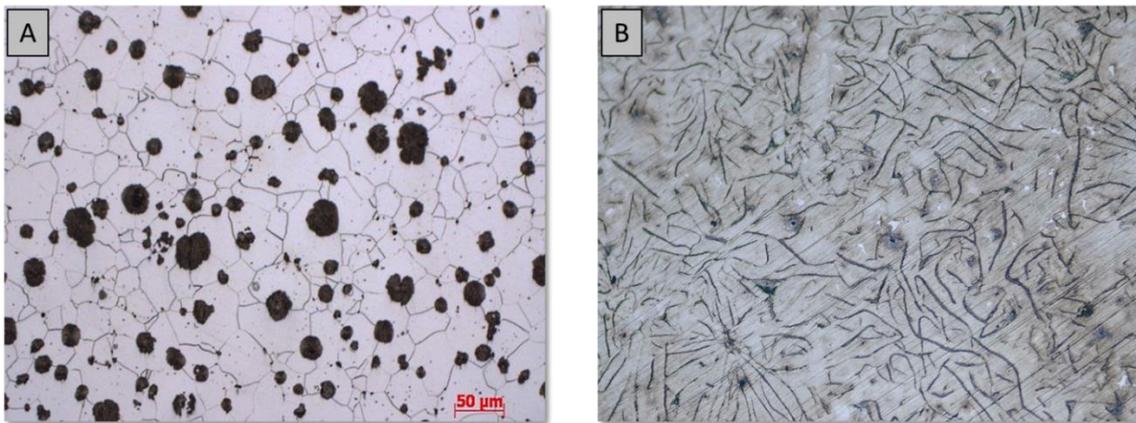
Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Leur résistance à la traction ne dépasse guère 400 Mpa mais elles ont un meilleur comportement en compression, donc en flexion ;
- Leur dureté est modérée (200-280 HB) ;
- Elles sont très facilement usinables et résistent particulièrement bien à l'usure sans grippage ;
- Elles résistent bien aux corrosions courantes et à la chaleur [6].

b) Fontes grises à graphite sphéroïdal

Les fontes à graphite sphéroïdal – fontes GS –, dites aussi parfois fontes ductiles, sont obtenues par un traitement spécifique du métal liquide qui provoque au moment de la solidification un graphite non pas en lamelles mais sous forme de particules quasi sphériques (10 à 100  $\mu\text{m}$  de diamètre). À part cette différence – capitale – la matrice métallique est comparable à celle d'une fonte grise ordinaire.

Sans doute, les fontes GS n'ont pas tous les avantages des aciers ou des fontes grises et, en particulier, leur élaboration – quoique parfaitement maîtrisée – est relativement délicate et exige des contrôles spécifiques stricts. Elles ont été substituées systématiquement aux fontes grises, aux fontes malléables et aux aciers dans des applications très importantes, notamment en construction automobile, dans les canalisations et accessoires d'hydraulique et de voirie [6]. (Figure I.3).



**Figure I-3 :** (A) Structure d'une fonte GS [8] ; (B) Structure d'une fonte GL [9].

c) Fontes à graphite vermiculaire

C'est une variété de fontes qui se développe lentement dans un champ d'application limité où l'on a besoin de propriétés combinant avantageusement celles des fontes grises et des fontes GS. La microstructure dite « vermiculaire » ou « compacte » du graphite – GCV – particules non sphériques, de forme allongée, mais beaucoup moins ramifiées que les lamelles des fontes grises, est obtenue par un traitement sur métal liquide dérivé de celui des fontes GS.

On connaît des applications intéressantes – éléments de gros moteurs thermiques, par exemple – en raison d'une conductivité thermique plus grande que celle des fontes GS homologues et d'une résistance aux contraintes thermomécaniques supérieure à celle des fontes

grises. Leur élaboration est au moins aussi délicate que celle des fontes GS ; elles peuvent être perlitiques, ferritiques, ... comme les autres fontes [6].

#### **I.4.3.2 Fontes blanches et fontes trempées**

##### **a. Fontes blanches**

Les fontes blanches se caractérisent par leur dureté et leur fragilité attribuées à la présence de cémentite. Ces fontes sont obtenues via une procédure spécifique : une température de coulée relativement basse, un refroidissement accéléré, une concentration élevée de manganèse et une faible teneur en silicium contribuent à leur formation [7].

Pour la plupart des applications modernes – éléments de broyeurs, par exemple –, les fontes blanches sont encore durcies par l'ajout d'éléments d'alliage (nickel, chrome, molybdène, vanadium, tungstène) avec une certaine amélioration de la ténacité aux chocs [6]. (Figure I.4).



*Figure I-4 : Structure d'une fonte blanche eutectique [7]*

##### **b. Fontes trempées**

On appelle « fontes trempées » des fontes coulées au contact d'éléments refroidissants constituant le moule en tout ou partie ; ainsi les couches corticales solidifiées dans ces conditions sont en fonte blanche – effet de « trempe primaire » avec solidification dans le système métastable – tandis que le cœur et d'autres parties de la même pièce se solidifient en fonte grise ou GS [6].

##### **c. Fontes malléables**

- Fontes malléables à « cœur noir »

Connues depuis une centaine d'années, ces fontes malléables « à cœur noir » – à cause du graphite –, dites parfois « américaines », ont joué un grand rôle dans le développement du machinisme agricole, de l'automobile... Mais actuellement, leur production est pratiquement abandonnée en France, d'autres pays leur réservant encore une part de marché plus importante [6].

➤ Fontes malléables « à cœur blanc »

Un autre procédé classique pour produire des pièces déformables plastiquement à partir d'une fonte blanche consiste à la recuire en atmosphère décarburante – procédé Réaumur – pour éliminer la plus grande partie du carbone.

Bien adapté aux petites pièces de quincaillerie, aux raccords tubulaires, aux éléments d'ornementation, ce procédé a été abandonné en France à cause de graves handicaps : la très longue durée du traitement thermique et la limitation de l'épaisseur des pièces – moins de 10 mm [6].

#### **I.4.4 Constituants de base des fontes**

##### **I.4.4.1 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  $\alpha$  qui ne peut contenir en solution solide d'insertion qu'au maximum 0,02 % de carbone vers 725 °C, 2,14 % à 1147°C. et encore bien moins à plus basses températures.

La ferrite est magnétique jusqu'à 768° C (point de Curie). En valeurs moyennes : RM30 da N/mm<sup>2</sup> ; HB~ 90 [10].

##### **I.4.4.2 Cémentite**

C'est du carbure de fer. Sa formule Fe<sub>3</sub>C révèle un rapport constant « atome fer atome carbone » dans un réseau cristallin complexe.

- Elle est dure mais fragile HB ~ 750.
- Elle contient en poids 6,7% de carbone.
- Elle est magnétique jusqu'à 210°C [10].

#### I.4.4.3 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-Fe<sub>3</sub>C.

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 [10].

#### I.4.5 Avantages et inconvénients des fontes

##### I.4.5.1 Avantages

- **Haute résistance** : Les fontes sont connues pour leur haute résistance à la compression, ce qui les rend appropriées pour des applications où la force et la durabilité sont essentielles, telles que les structures de construction et les pièces automobiles.
- **Bonne coulabilité** : Les fontes ont une bonne capacité de coulée, ce qui signifie qu'elles peuvent être coulées dans une grande variété de formes complexes, ce qui en fait un matériau polyvalent pour la fabrication de pièces moulées.
- **Bonne usinabilité** : Les fontes peuvent être facilement usinées pour obtenir des finitions précises, ce qui les rend adaptées à une gamme d'applications où une tolérance serrée est nécessaire.
- **Résistance à la corrosion** : Certaines fontes, comme la fonte ductile, ont une résistance supérieure à la corrosion, ce qui les rend appropriées pour des applications exposées à des environnements corrosifs, tels que les conduites d'eau souterraines.

##### I.4.5.2 Inconvénients

- **Fragilité** : Par rapport à certains autres matériaux métalliques, les fontes peuvent être relativement fragiles, ce qui signifie qu'elles peuvent se fissurer ou se casser sous des charges de choc élevées.
- **Poids élevé** : Les fontes sont généralement plus lourdes que d'autres matériaux métalliques, ce qui peut poser des défis dans certaines applications où le poids est un facteur critique, comme dans l'industrie aérospatiale ou automobile.
- **Faible résistance à la traction** : Bien que les fontes aient une bonne résistance à la compression, elles ont généralement une résistance à la traction plus faible, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications structurelles.

- **Difficulté de soudage** : Les fontes peuvent être difficiles à souder en raison de leur composition chimique, ce qui peut limiter les options de fabrication dans certaines situations.

#### **I.4.6 Champ d'application**

Les fontes sont utilisées dans une variété d'applications dans divers secteurs en raison de leurs propriétés mécaniques et chimiques spécifiques, ce qui en fait un matériau polyvalent et largement utilisé dans l'industrie manufacturière.

#### **Construction**

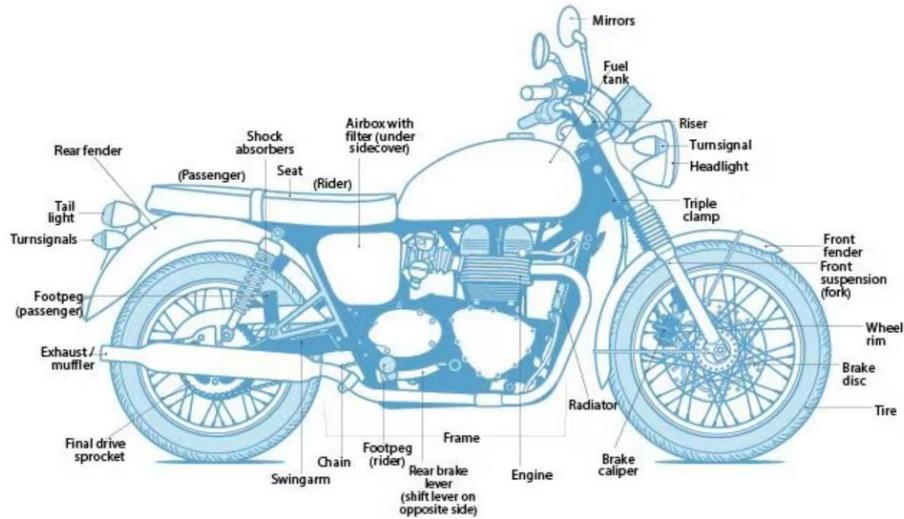
- Les fontes sont utilisées dans la construction pour les éléments structuraux tels que les colonnes, les poutres et les plaques de base dans les bâtiments commerciaux et industriels.
- Les fontes sont également utilisées dans la fabrication d'éléments décoratifs tels que les ornements architecturaux, les balustrades et les fontaines en raison de leur capacité à être coulées dans des formes complexes.

#### **Industrie pétrolière et gazière**

- Dans l'industrie pétrolière et gazière, les fontes sont utilisées dans la fabrication de vannes, de raccords et de collecteurs pour les pipelines en raison de leur résistance à la corrosion et de leur capacité à fonctionner dans des environnements à haute pression et haute température.
- Les composants de forage tels que les brides et les boîtiers de puits sont également fabriqués en fonte pour leur résistance à l'abrasion et à la corrosion.

#### **Industrie transporte**

- Dans l'industrie automobile, les fontes sont utilisées dans la fabrication de composants moteur tels que les blocs-moteur, les culasses et les collecteurs d'admission et d'échappement et les vilebrequins en raison de leur résistance à la chaleur et à l'usure.
- Les tambours de frein et les disques de frein sont également fabriqués en fonte en raison de leur capacité à dissiper la chaleur et à résister à l'abrasion.



*Figure I-5 : Composants de la moto.*



*Figure I-6 : Freins à disque.*



*Figure I-7: Blocs moteurs.*



*Figure I-8 : Regard d'égouts.*



*Figure I-9 : Collecteur.*

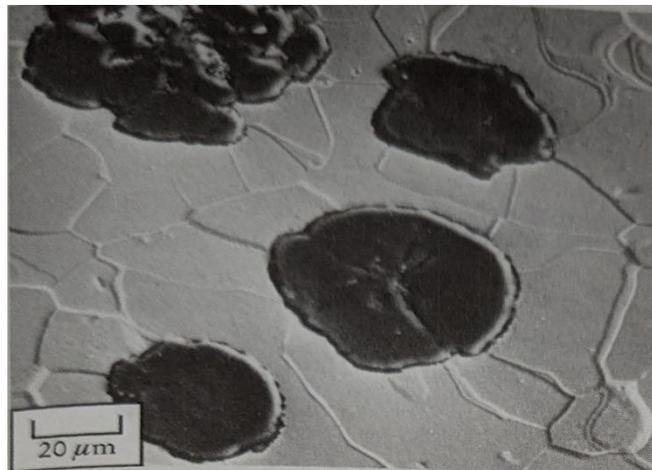
## I.5 Fonte à graphite sphéroïdale GS

### I.5.7 Définition

Si, au moment de la coulée de la fonte, on ajoute 0,1% à 0,2% de magnésium, cela modifie complètement la morphologie du graphite qui se forme au cours de la solidification ; au lieu de lamelles de graphite, on obtient alors des nodules de graphite sphériques, ce qui améliore considérablement la ductilité et la ténacité du matériau. Les fontes GS, dont la matrice peut être soit ferritique, soit perlitique, se prêtent aux mêmes traitements thermiques que les fontes grises.

En général, les fontes GS ont d'excellentes propriétés : leur élaboration présente peu de difficulté, et leur coulabilité est tout aussi bonne que celle des fontes grises ; par ailleurs, leurs propriétés mécaniques sont comparables à celles de l'acier (haute résistance, bonne ténacité, bonne trempabilité, excellente usinabilité et meilleure résistance à l'usure que l'acier).

Compte tenu de ces qualités, on utilise les fontes GS, par exemple, pour la fabrication de carters de pompes et de vannes, de vilebrequins, d'engrenages, de pièces de machines soumises à des chocs et à des contraintes alternées, et de tuyaux fabriqués par coulée centrifuge [11]. La figure I.6 montre la structure de la fonte GS.



**Figure I-10** : Fonte à graphite sphéroïdal observée au microscope optique [11].

### I.5.8 Graphite

Le graphite présente une structure cristallographique hexagonale organisée selon des feuillets nommés graphènes. Les atomes d'un même plan de graphènes sont reliés entre eux par des liaisons covalentes de type  $sp^2$  et la cohésion entre les plans de graphènes se fait par des

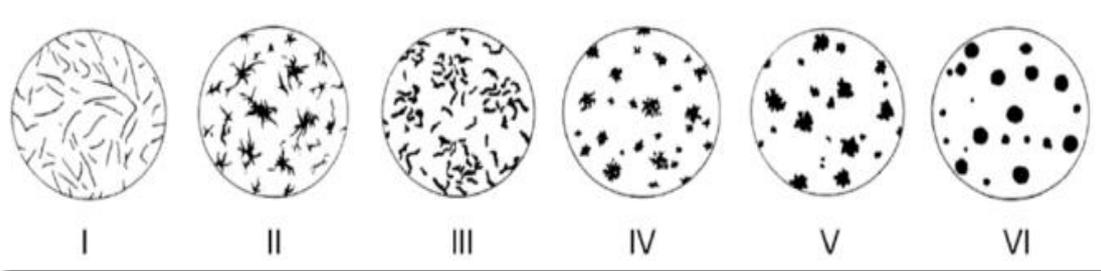
liaisons de Van der Waals. Cette structure est responsable de l'anisotropie des propriétés physiques du graphite (Tableau). Elle lui organise plusieurs degrés d'organisation.

Sa maille élémentaire possède quatre atomes et ses paramètres sont les suivants :  $a=b=2,461 \text{ \AA}$  et  $c=6,708 \text{ \AA}$  [6]. Les plans de graphènes sont empilés le long de l'axe c pour former une structure hexagonale (empilement ABAB...). Le plan B est traduit par rapport au plan A d'une longueur d'une double liaison C=C égale à  $1,42 \text{ \AA}$  suivant la direction de la liaison [12]. Tableau II-2 présente les propriétés du graphite.

**Tableau I-2 : Propriétés selon les plans.**

Propriétés	Selon le plan (ab)	Selon le plan (c)
Résistivité électrique ( $\Omega.cm$ )	$40.10^{-6}$	0.04
Conductivité thermique ( $W.M^{-1}.K^{-1}$ )	$2.10^{-3}$	8
Module de Young (GPa)	1000	50

Le graphite est rarement parfait et présente souvent des défauts de structure. Des exemples de ces défauts sont retrouvés dans d'autres types de matériaux carbonés. Pour illustrer ceci, on peut citer des matériaux ayant des structures moins ordonnées que celle du graphite tels que le carbone turbostratique et le carbone amorphe [12]. (Figure I.7).



**Figure I-11 : Formes typiques du graphite selon DIN EN ISO 945ASTM A 247. I, graphite lamellaire ; II, graphite de type crabe ; III, graphite vermiculaire ; IV, graphite de recuit ; V, graphite sphéroïdal imparfait ; VI, graphite sphéroïdal [12].**

### I.5.9 Graphite sphéroïdal

En 1948, il a été découvert que l'ajout d'une faible quantité de magnésium ou/et des terres rares dans une fonte liquide avant sa coulée menait à la production de graphite sous forme de précipités sphériques. Les fontes dont les morphologies du graphite sont sphériques sont génériquement appelées fonte ductile. La ductilité et la ténacité des fontes à graphite sphéroïdal

sont supérieures à celles des fontes grises puisqu'il n'y a plus l'effet d'entaille qui a lieu en pointe de lamelle. Il est donc possible d'obtenir des fontes à graphite sphéroïdal avec des propriétés mécaniques très diverses en jouant sur la nature de la matrice (Ferritique, perlitique, ferrito-perlitique...).

La formation du graphite sphéroïdal nécessite différents traitements avant la coulée de la fonte liquide : l'inoculation ou la sphéroïdisation. Il est donc nécessaire d'ajouter certains éléments dont la fonction sera d'obliger le précipité à prendre une forme sphérique [12].

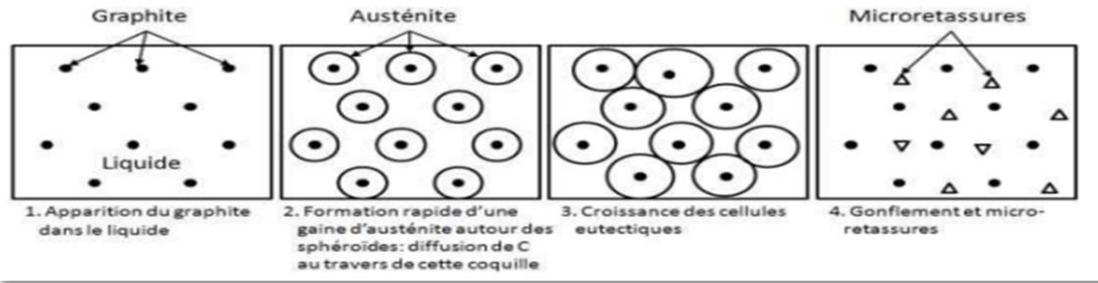
### **I.5.10 Sphéroïdisation**

Les sphéroïdes de graphite apparaissent dans le métal liquide et non dans le solide, se forment à partir de germes « hétérogènes », particules étrangères dont le système cristallin permet la cristallisation du graphite (qui se produit dans le système hexagonal) [6]. Ce traitement permet comme son nom l'indique d'obtenir un graphite de forme sphérique. Lors de cette étape, il est nécessaire d'ajouter du Mg dans le bain liquide, qui se combine au S et à l'O pour former des sulfures et des oxydes, et fait augmenter la tension superficielle du liquide.

Quand la tension superficielle de la fonte augmente jusqu'à 1,4 N/m, la modularisation est complète. Une teneur de 0,03 à 0,06 % de Mg dans le bain liquide suffit à obtenir une forme sphéroïdale du graphite dans une fonte à bas soufre [5]. Le magnésium n'est pas le seul élément qui favorise la formation du graphite sphéroïdal (GS) ; le cérium, le lithium, le barnum, le strontium et de nombreux autres éléments ont les mêmes effets sur la fonte liquide. Le magnésium pur ou sous forme de ferro-alliage est l'élément utilisé industriellement [13].

### **I.5.11 Solidification du graphite sphéroïdal dans les fontes**

Les fontes à graphite sphéroïdal sont majoritairement de composition eutectique ou hyper eutectique. Lors de la solidification, c'est le graphite qui se forme en premier dans le bain liquide sur les sites de germination constitués pendant l'étape d'inoculation. Ensuite, les sphéroïdes formés s'entourent d'une couche austénitique, appelée cellule eutectique, à travers laquelle le carbone doit diffuser pour les faire croître. La Figure I.8 ci-dessous schématise les mécanismes de solidification :



**Figure I-12** : Description de la solidification d'une fonte hyper eutectique [12].

La solidification des fontes à graphite sphéroïdal entraîne toujours la formation de porosités que l'on peut diviser en deux familles des micro-retassures de petite taille (de l'ordre de quelques micromètres) qui sont dues aux espaces laissés libres en fin de solidification, lorsque les cellules eutectiques se rencontrent, et 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 à l'état liquide et à l'état solide, qui entraîne un retrait lors de la solidification et provoque la formation de cavités appelées retassures [12].

### I.5.12 Structures obtenues

On peut obtenir trois formes différentes :

- Fonte GS Ferri tique.
- Fonte GS ferrito-perlitique.
- Fonte GS perlitique.

### I.5.13 Compositions chimiques visées

Les fontes à graphite sphéroïdale présentent un rare ensemble de caractéristiques, du fait que le graphite se présente sous forme de sphères. Cette forme sphéroïdale est obtenue par ajout d'une quantité très faible, mais bien définie de magnésium à une fonte de composition appropriée. La fonte de base est l'objet de restrictions sévères en ce qui concerne les teneurs maximales admissibles de certains éléments mineurs susceptibles de gêner la formation des sphéroïdes de graphite. Le magnésium réagit avec le soufre et l'oxygène présents dans la fonte liquide et modifie le mode de germination et de croissance du graphite. Des processus de réglage des teneurs maximales en soufre et en oxygène ont été mis au point afin de rendre très fiable l'élaboration de ces fontes. Contrairement aux fontes à graphite lamellaire, les fontes à graphite sphéroïdal ont des teneurs en carbone et en silicium relativement élevées, ces

teneurs apportent les propriétés de fonderie recherchées [13]. Le Tableau I-3 présente la composition pour l'obtention des fontes.

*Tableau I-3 : Composition, à titre indicatif, de la fonte de base pour l'obtention des fontes à graphite sphéroïdale non alliées [13].*

Nuance de fonte	C (wt%)	Si (wt%)	Mn (wt%)	S (wt%)	P (wt%)
Ferritique	3,2 – 3,8	2,5 – 3	< 0,2	< 0,01	< 0,08
Ferrito-perlitique	3,2 – 3,8	2,2 – 2,7	0,3 – 0,4	< 0,01	< 0,08
Perlitique	3,2 – 3,8	2 – 2,5	0,5 – 0,8	< 0,01	< 0,08

#### **I.5.14 Structure de la matrice des principales nuances de fontes à graphite sphéroïdale**

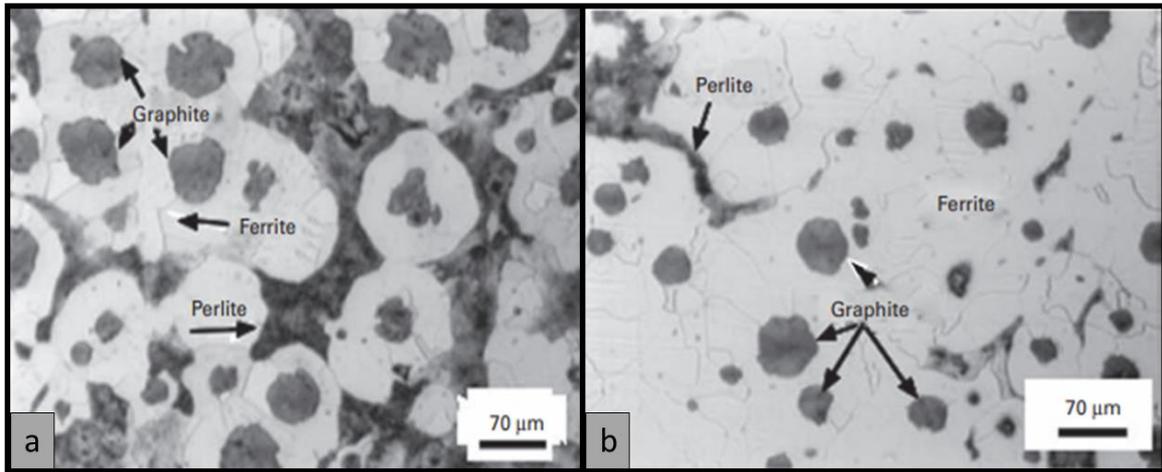
La matrice qui entoure les particules de graphite peut être composée de ferrite, de perlite ou d'un mélange de ferrite et de perlite. La structure est obtenue dans la plupart des cas sur les pièces brutes de coulée. Elle est ensuite vérifiée par examen micrographique sur échantillon poli et attaqué [13].

##### **I.5.14.1 Ferrite**

Ce constituant est une solution solide de fer avec un réseau cristallin cubique centré pratiquement exempt de carbone dans laquelle d'autres métaux peuvent se dissoudre (figure). Ainsi la ferrite contient en solution du manganèse et une quantité appréciable de silicium. D'autres éléments d'alliage peuvent être dissous tel que le cuivre et le nickel [7]. La figure I.9 présente la micrographie des échantillons des fontes polis et attaques.

##### **I.5.14.2 Ferrito-perlitique**

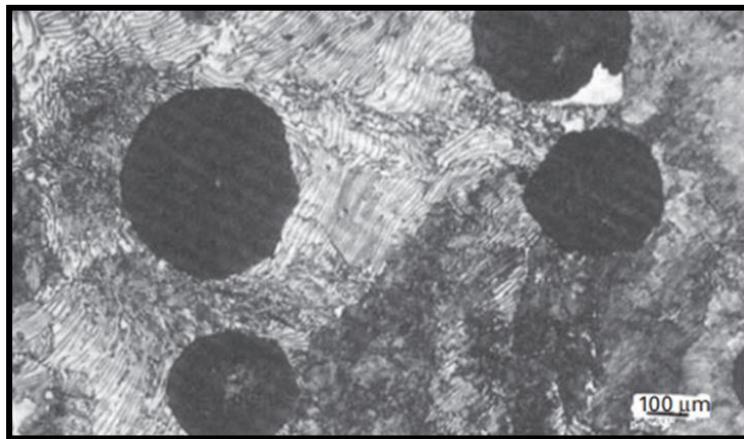
Le graphite de forme sphéroïdale se trouve dans une mixte de ferrite et de perlite C'est la nuance de fonte GS la plus courante. Les propriétés de ce type de fontes se situent entre celles des structures «totalement ferritiques» et «totalement perlitique». Elles sont caractérisées par leurs bonnes usinabilités et un prix de revient faible [14].



**Figure I-13 :** Micrographie d'échantillon de fonte poli et attaque. (a) fonte GS avec 2,4 % de Si, matrice ferrito-perlitique, (b) fonte GS avec 3,04 % de Si, matrice essentiellement ferritiques [13].

### I.5.14.3 Perlite

Un examen au microscope, à fort grossissement, d'échantillon poli et attaqué a révélé que la perlite est un agrégat composé de lamelles de ferrite et de carbure de fer : cémentite  $Fe_3C$  (figure). La résistance mécanique et la dureté varient en fonction de l'épaisseur des lamelles de carbures de fer [13]. La figure I.10 présente la micrographie de la fonte perlitique.



**Figure I-14:** Micrographie de fonte perlitique polie et attaquée [13].

## I.5.15 Influence des éléments spéciaux

### I.5.15.1 Silicium

Le silicium est un élément de graphitisation de base dans les fontes. Il abaisse la température du liquidus et élève celle du solidus, donc il diminue l'intervalle de la solidification. Une

augmentation de la teneur de silicium à tendance à augmenter la fraction ferritiques de la structure donc à diminuer la dureté, ainsi la résilience [14].

Cependant l'augmentation du silicium favorise la ductilité par la formation préférentielle de ferrite au sein de ces fontes. Pour une fonte entièrement ferritiques, l'augmentation du silicium durcit la ferrite et accroît sensiblement la résistance mécanique [14].

#### **I.5.15.2 Manganèse**

Son effet anti graphitant n'est sensible qu'à des taux élevé. Aux taux normaux de 0.5 à 0.8 % il affine la perlite, augmente la dureté et la résistance à la traction [14].

#### **I.5.15.3 Cuivre**

Elément graphitant à la solidification surtout aux basses teneurs en silicium, il contribue fortement à l'affinement de la perlite. Il favorise l'obtention d'une matrice perlitique, à l'état brut de coulé.

Son introduction dans les fontes entraîne une augmentation de la résistance au choc et de la dureté. Un taux croissant de Cu permet d'obtenir :

- Une matrice ferrito-perlitique pour 0.3 à 0.5% de Cu
- Une matrice perlitique pour 1% de Cu [14].

### **I.5.16 Caractéristiques mécaniques de la fonte à graphite sphéroïdale**

#### **I.5.16.1 Normalisation et caractéristiques en traction**

Les experts des différents pays européens ont mis au point une dénomination commune et rationnelle des fontes (tableau). 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 % [13]. (Tableau I-4).

**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-4 : Caractéristiques de traction des fontes à graphite sphéroïdale (norme EN 1563).**

Désignation du matériau	Épaisseur 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.5.16.2 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-5).

**Tableau I-5 : Dureté Brinell en fonction de l'épaisseur pour différentes fontes. [13]**

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 ferritiques dépendent des éléments dissous dans la ferrite comme le silicium, le manganèse et le nickel. [13]

#### I.5.16.3 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 extensomètre. 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/mm<sup>2</sup>. Au-delà de 800, ce rapport tend à s'élever pour les fontes trempées et revenues [15].

#### **I.5.16.4 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/mm<sup>2</sup> 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 [15].

#### **I.5.16.5 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 [13].

#### **I.5.16.6 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 ferritiques [13].

#### **I.5.16.7 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 [15].

#### **I.5.16.8 Résistance à l'usure**

##### **A. Résistance à l'usure par frottement**

L'aptitude au frottement d'un matériau dépend de ses caractéristiques mécaniques (module d'élasticité, dureté), de sa composition et de sa structure. C'est le graphite qui donne aux fontes leurs avantages. Dans le cas de frottement sans lubrification, ou en cas d'interruption du film d'huile, le graphite, qui est autolubrifiant, fait diminuer les risques de jonctions intermétalliques (grippage) par formation d'un manteau protecteur. Par ailleurs, les microcavités qui subsistent lorsque le graphite est arraché peuvent retenir le lubrifiant et éviter

la rupture du film d'huile ou encore capter les débris des surfaces endommagées. La nature de la matrice métallique joue un rôle important dans l'aptitude au frottement des fontes à graphite sphéroïdale. La structure perlitique fine est la plus favorable [16].

#### B. Résistance à l'usure par abrasion

Pour résister à l'usure par abrasion, les fontes à graphite sphéroïdal peuvent être trempées à la coulée de telle sorte qu'elles présentent, au droit d'un refroidisseur métallique, une structure de fonte blanche. Pour certains composants mécaniques devant résister à des liquides très chargés, à des boues abrasives ou à d'autres formes d'usure par abrasion, des fontes à graphite sphéroïdal à structure martensitique, bainitique ou trempées superficiellement après usinage peuvent apporter des solutions économiques [15].

### I.6 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 (Tableau I-6).

**Tableau I-6 :** Avantages et les inconvénients.

Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"><li>• Résistance mécanique élevée</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Coût initial élevé</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Résilience améliorée</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sensibilité à la porosité</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Bonnes caractéristiques d'usinabilité</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Limitations dans certaines</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Résistance à la corrosion</li></ul>	applications spécifiques

### I.7 Domaine d'application des fontes à graphite sphéroïdale

En raison de ces caractéristiques élevées suscités, les fontes FGS sont utilisées dans une variété de branches de l'industrie :

- Industrie chimique et pétrolière : fabrication de pompes, valves, conduites travaillant dans les milieux corrosifs.
- Eléments de machines-outils, de presses et de forges qui travaillent à des pressions élevées, fabrication des pièces accouplées aux arbres ne subissant pas de traitement thermique [17].
- Pièces pour l'industrie lourde (cylindres de laminoirs, ...) [18].
- Pièces de construction automobile, canalisations et accessoires d'hydraulique et de voirie. (Collecteur d'échappement et vilebrequin...)
- Autres moyens de transport (Pignons pour chenilles, Paliers de pont, Godets d'élévateurs) [19].

*Chapitre II :*

**Etude expérimentale :  
Conception, simulation et  
réalisation du vilebrequin**

## II.1 Introduction

Les organes et pièces constituant les machines et appareils proviennent de sources diverses de fabrication tels que le forgeage, l'usinage, la fonderie, etc.

La technique de fonderie est le plus souvent utilisée, car elle est non seulement économique, mais :

- Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés).
- La série des pièces est identique.
- L'obtention de pièces massives.

Les opérations de fonderie, ou de coulée des métaux, consistent à couler du métal en fusion à l'intérieur d'un moule réfractaire creux qui reproduit la forme extérieure ou négative du modèle de l'objet métallique à fabriquer. Le moule pourra contenir un noyau correspondant aux éventuels évidements de la pièce moulée définitive. Le travail de fonderie comprend les opérations ci-après :

- Préparation du modèle de la pièce que l'on veut fabriquer ;
- Fabrication du moule et des noyaux et l'assemblage du moule ;
- Fusion et l'affinage du métal
- Coulée du métal dans le moule ;
- Refroidissement de la pièce moulée ;
- Démoulage, le décochage et le dénoyautage ;
- Dessablage et l'ébarbage ;
- Traitements thermiques ;
- Finition (Usinage, Revêtement) ;

Pour notre projet de recherche, nous avons choisi de nous concentrer sur la rétro conception du vilebrequin, une moto populaire reconnue pour son efficacité et sa fiabilité. Notre objectif est de comprendre en détail la géométrie et les caractéristiques de ce composant afin d'optimiser sa conception et ses performances. La figure II.1 présente le schéma des étapes de fabrication de la pièce.

L'ensemble des opérations de moulage en sable est donné par le schéma ci-dessous :

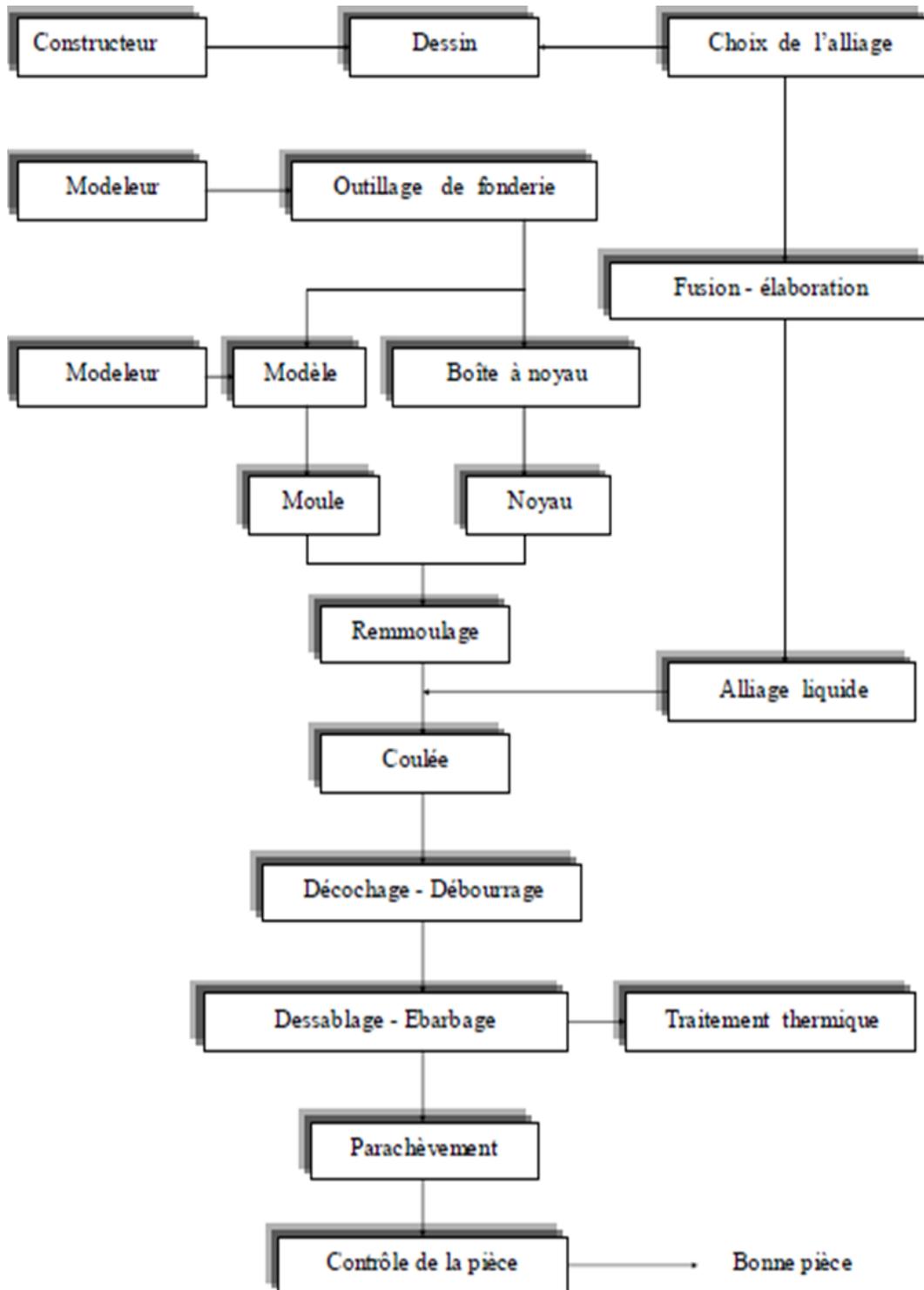


Figure II-1 : Schéma représentatif des opérations de la fabrication d'une pièce.

## II.2 Caractère du travail de la pièce (condition de service de la pièce).

Le vilebrequin est un composant essentiel du système de la moto.

Son rôle principal est de convertir la force produite par la combustion dans le moteur en mouvement rotatif. Le mouvement linéaire de haut en bas des pistons est transformé par la bielle en un couple et transmis à l'inertie.

**Tableau II-1** : Caractéristique de la pièce.

<b>Nom de la pièce</b>	<b>Vilebrequin</b>
<b>Poids de la pièce</b>	2 Kg
<b>Retrait</b>	2%
<b>Dimension de châssis</b>	410*325*120 mm
<b>Hauteur de la pièce</b>	83,20 mm
<b>Nombre des pièces dans le moule</b>	4
<b>Nombre des noyaux</b>	0
<b>Temps de remplissage</b>	10.17

### **II.3 Acquisition de la pièce référentielle**

Nous avons obtenu un vilebrequin d'une moto 125cc 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-2 présente le vilebrequin de la moto 125cc



Figure II.2 : (1) et (2) Vilebrequin 125 CC.

## II.4 Prise de cotes par pied à coulisse

À l'aide d'un pied à coulisse de précision, nous avons effectué des mesures détaillées de toutes les dimensions pertinentes du vilebrequin.

La figure II.3 montre le pied à coulisse.



Figure II-3 : Pied à coulisse.

## II.5 Conception sur Solid Works

### II.5.1 Présentation de logiciel

SolidWorks est un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur 3D (CAO) fonctionnant sous Windows. SolidWorks est un modéleur 3D utilisant la conception

paramétrique. 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.



Figure II-4 : Logiciel SOLIDWORKS.

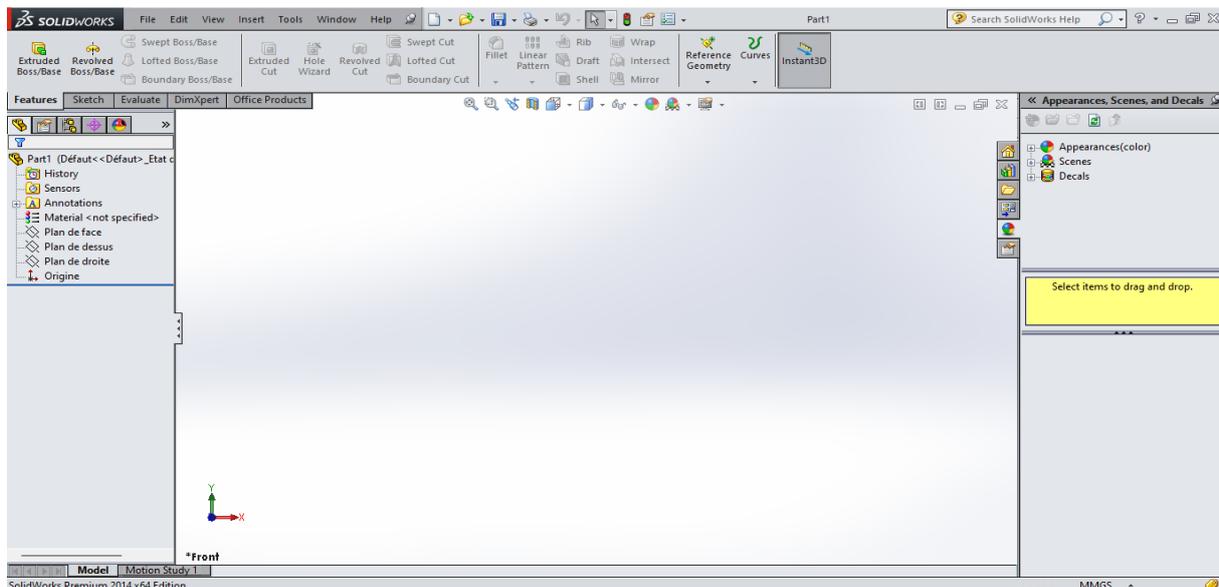
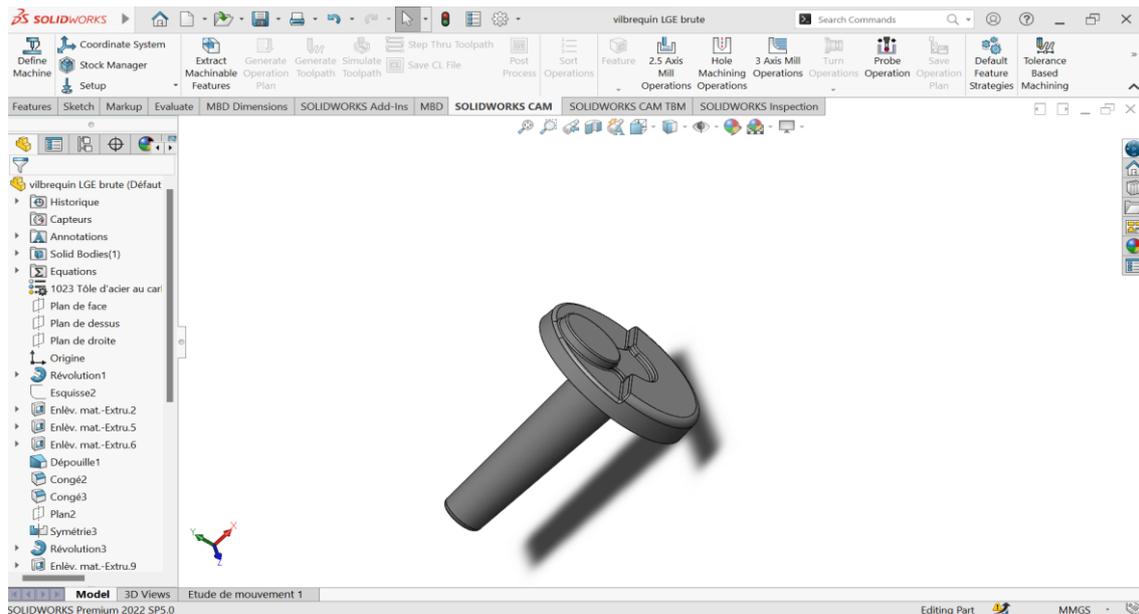


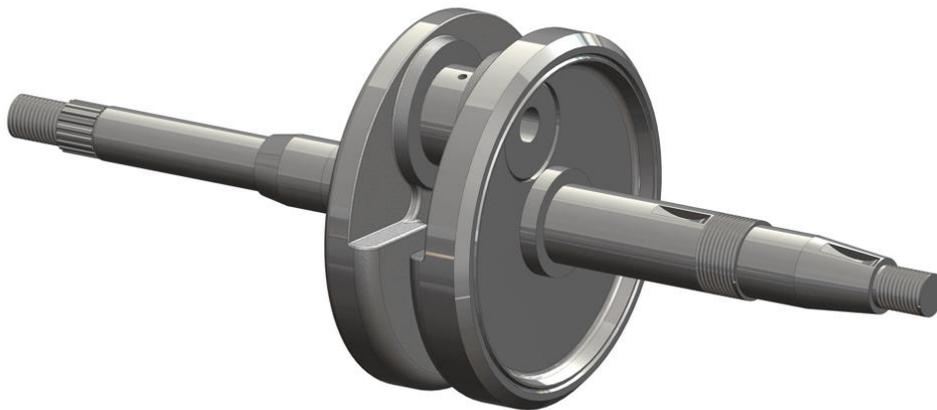
Figure II-5 : Interface de logiciel SOLIDWORKS.

### II.5.2 Etapes de la conception

Les mesures précises obtenues lors de la rétro conception par pied à coulisse sont utilisées comme données d'entrée pour la conception sur SolidWorks. Chaque dimension relevée est soigneusement intégrée dans le modèle numérique afin de garantir la précision et l'exactitude de la représentation.



**Figure II-6 :** Conception vilebrequin.



**Figure II-7 :** Vilebrequin final.

Après avoir achevé la conception de la pièce principale à l'aide du logiciel SolidWorks, nous avons poursuivi avec la création des conceptions et des dessins de définition pour plusieurs composants essentiels. Chaque conception a été élaborée avec une attention particulière aux détails, assurant la précision des dimensions, la sélection adéquate des matériaux, et le respect des spécifications techniques nécessaires pour la fabrication. Les dessins de définition pour chacun de ces composants incluent toutes les cotes critiques, les tolérances, et les instructions de fabrication, garantissant ainsi une communication claire et précise avec l'équipe de

production. Cette approche rigoureuse et méthodique est fondamentale pour garantir la qualité, la fiabilité et l'efficacité du produit final.

## II.6 Choix de 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.

- Les dimensions de châssis :

Au niveau de l'atelier de moulage mécanique, les châssis utilisés avec des dimensions de :

410\*325\*120 mm

- Nombre de pièce dans le moule :

Compte tenu des dimensions de la pièce et des dimensions du châssis, nous pouvons déterminer le nombre de pièces dans chaque moule qui est : 1 pièce dans moule.

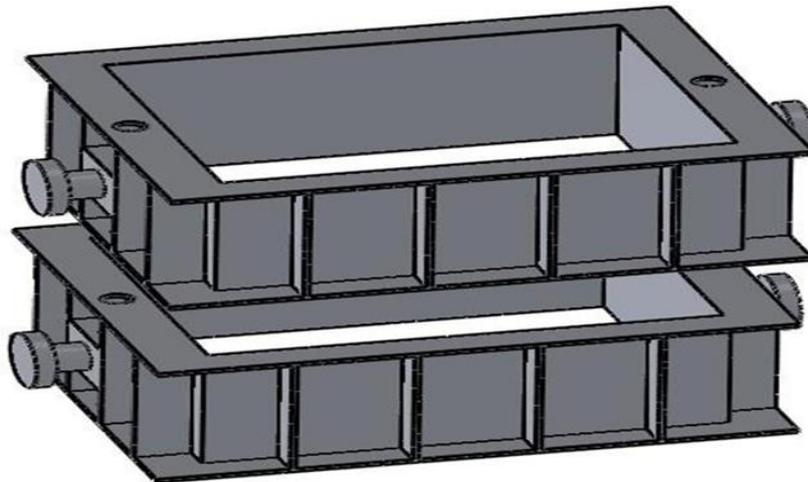


Figure II-8 : Châssis.

## II.7 Système de coulé et alimentation

Le système de coulée sert à l'alimentation de l'empreinte du moule, et à son remplissage par le métal liquide. Le choix du type de système de coulée dépend de :

- La configuration de la pièce.
- La disposition de la pièce dans le moule.
- La nuance de l'alliage.

Ce système présente un remplissage calme et sans turbulences et une solidification dirigée.

Elément de système de coulée et d'alimentation :

### ***Entonnoir***

Il est placé dans le châssis supérieur et a pour but de :

- Faciliter d'introduction du métal dans le moule avec le débit nécessaire
- Permettre l'engorgement immédiat et éviter les aspirations d'air

### ***Descente de coulée***

C'est un canal vertical qui relie l'entonnoir au chenal. Elle est aussi appelée jet de coulée, elle est de forme cylindrique.

### ***Chenal***

C'est un conduit horizontal de section trapézoïdale qui achemine le métal vers les attaques. Dans ce chenal on peut trouver le piège à crasse dont le rôle primordial est de piéger la scorie et les autres inclusions non métalliques.

### ***Attaques***

Les attaques amènent le métal dans l'empreinte du moule et doivent satisfaire les conditions suivantes :

- Assurez un remplissage complet et correct.
- Assurer une solidification parfaite par un bon emplacement des attaques.
- Le métal liquide amené dans le moule ne doit pas déplacer les noyaux et détruire les parois du moule.

L'attaque de coulée doit permettre l'ébarbage de système de coulée sans risque de détérioration de la pièce.

## **II.8 Etude de la simulation (ESI ProCast)**

### **II.8.1 Présentation de logiciel**

Le logiciel ProCast est un logiciel de fonderie basé sur la simulation du métal au cours de la coulée. Qui va permet aux ingénieurs de la fonderie de résoudre rapidement leurs problèmes de fonderie causés par le retrait du métal et la porosité et d'autres problèmes qui rapproche les fondeurs à comprendre la source des défauts et de corriger ces défauts par la suite.

Ces résultats nous donnent la trajectoire du métal dans le moule en sable et son mouvement et aussi la température de solidification qui va nous mener à repérer les derniers points chauds (zones qui contient des retassures) et les défauts de fonderie en générale.



Figure II-9 : Logiciel ESI ProCast.

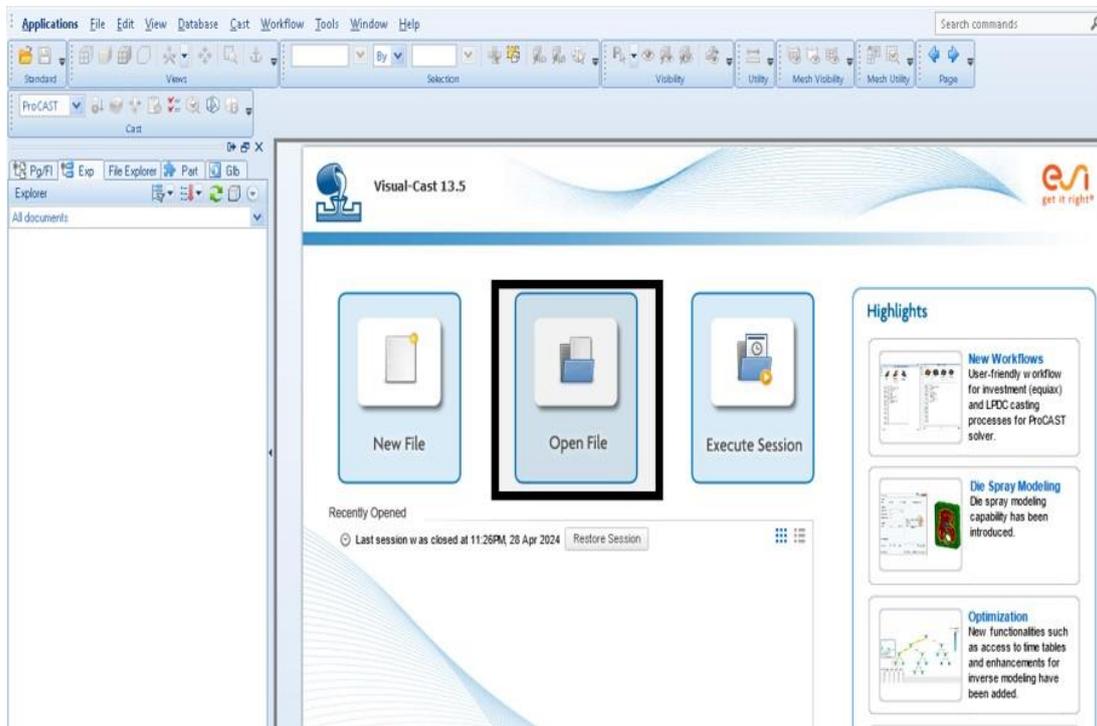


Figure II-10 : Interface de logiciel ProCast.

### II.8.2 Etapes de la simulation

1. Après avoir convertir le format de fichier de la pièce conçu par Solide Works au format IGS, on ouvre ProCast et on commence à étudier et à faire une simulation de la pièce. Cette simulation permet de modéliser le comportement du matériau métallique coulé dans un moule durant toutes les phases du procédé. La figure II.13 présente le vilebrequin avec le système de coulé dans le logiciel ESI ProCast.

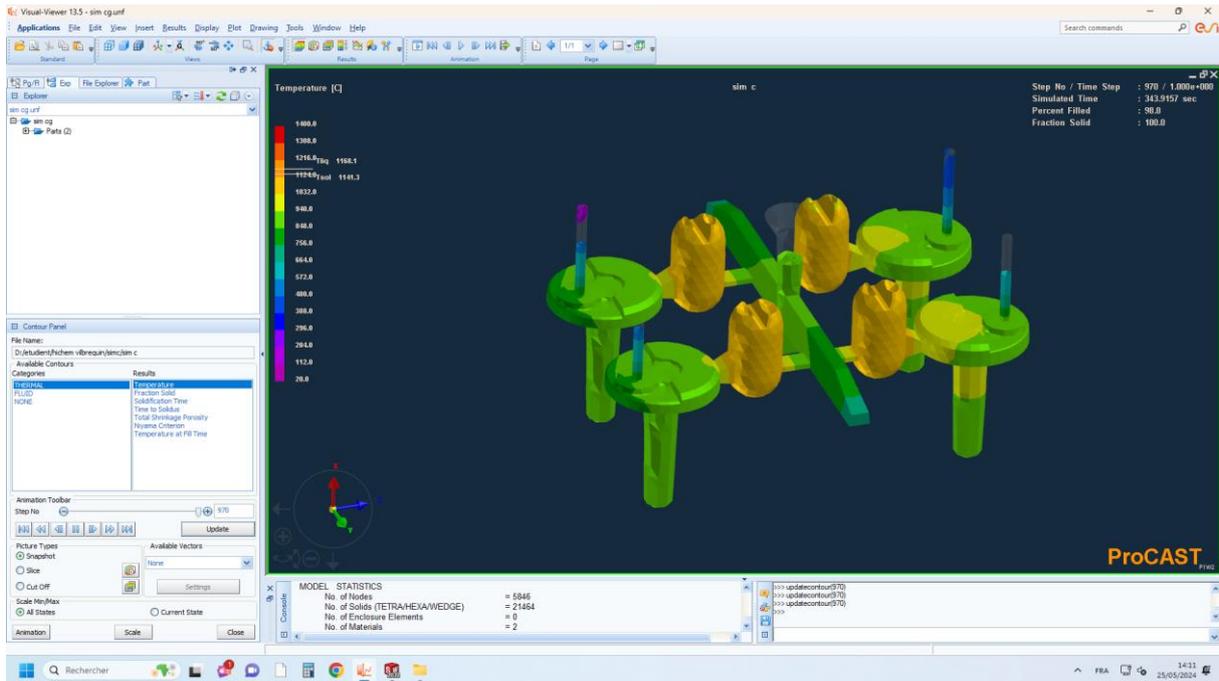


Figure II-11 : Le vilebrequin et système de coulé sur PROCAST.

2. Un maillage consiste en la discrétisation spatiale d'un milieu continu ou en une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments finis.
3. Avant de commencer la coulée du métal, on doit sélectionner la direction du vecteur de gravité.

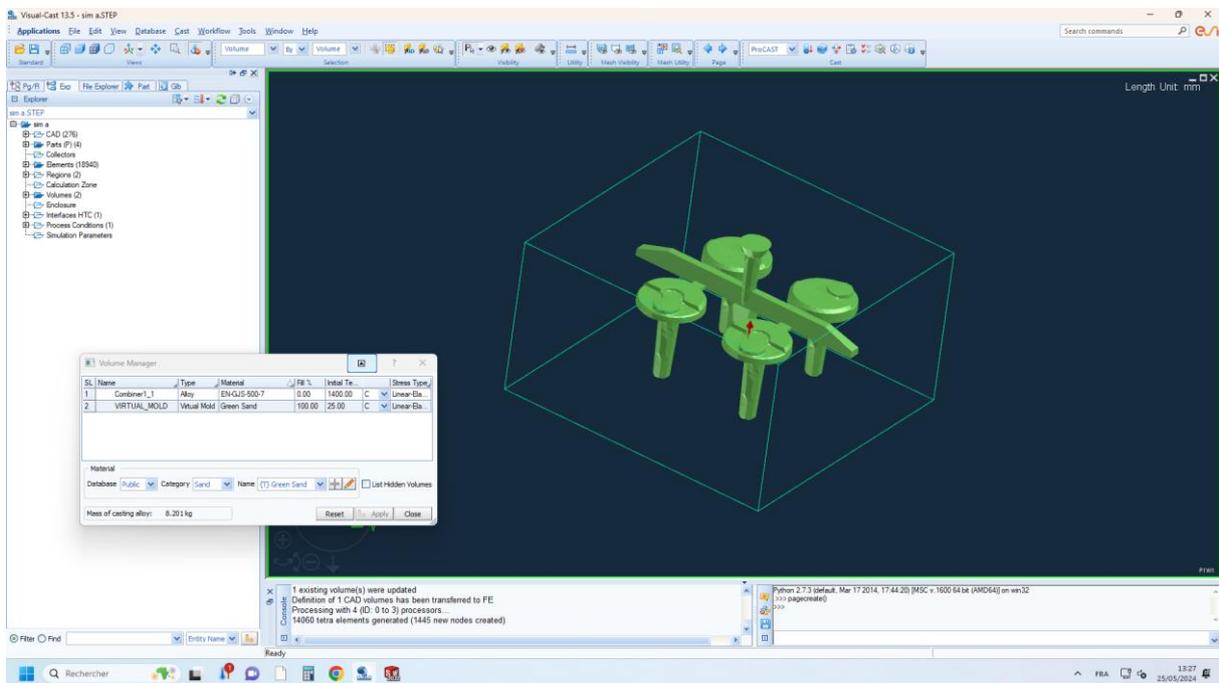


Figure II-12 : (1) Maillage et (2) Direction de gravité.

4. 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.

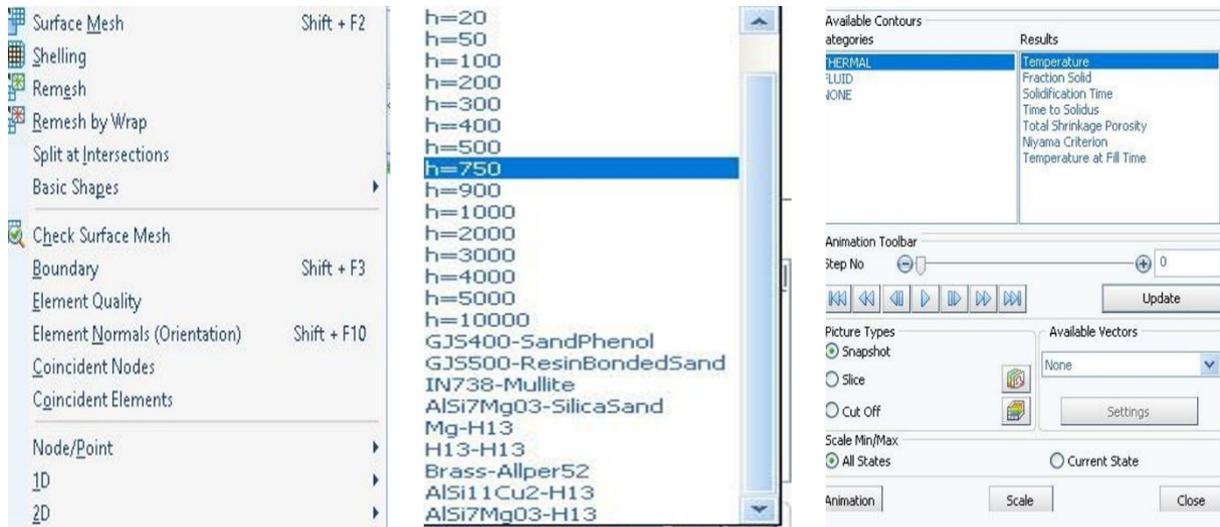


Figure II-13 : Quelques étapes de la simulation

Cette simulation a permis de modéliser et d'analyser les étapes essentielles de l'écoulement du métal dans le moule en fonction de divers paramètres, notamment la température et la solidification. Les résultats obtenus fournissent des informations détaillées sur la dynamique de l'écoulement, les gradients de température, les zones de solidification, et d'autres phénomènes critiques. Ces résultats, ainsi que leur interprétation, sont présentés de manière détaillée dans le chapitre Résultats et Interprétation.

## II.9 Atelier de Modelage et Noyautage

L'atelier de modelage et noyautage constitue une étape cruciale dans la fabrication du vilebrequin, où les modèles des composants sont préparés pour le processus de moulage. Voici comment nous avons abordé cette phase

### Préparation du Modèle de la Pièce

Nous avons commencé par préparer le modèle de la pièce du vilebrequin, en utilisant le bois et en veillant à ce que toutes les caractéristiques de conception soient correctement représentées. Sur la base du modèle créé sur SolidWorks, nous avons élaboré un modèle physique à l'échelle, utilisant des techniques de modelage telles que le fraisage ou le tournage, pour obtenir une reproduction fidèle de la pièce. (Figure II.17).



Figure II-14 Modèle du vilebrequin en bois.

## II.10 Préparation et caractérisation du sable

### II.10.1 Préparation du sable

La préparation du sable du moulage constitue une étape fondamentale dans le processus de moulage pour garantir la qualité des pièces finales. Dans le malaxeur, précédemment évoqué dans le premier 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 nécessaire entre les grains de sable, tandis que la noire minérale contribue à améliorer certaines caractéristiques du mélange. Tableau II-4 présente la composition sable du moulage.

Tableau II-2 : Composition de sable du moulage.

Les éléments de mélange	Sable vert	Bentonite	Noir minérale
Le pourcentage %	85 %	10 %	5 %

### II.10.2 Caractérisation et Analyse du sable

Une fois le mélange jugé prêt, des échantillons sont prélevés pour une analyse détaillée. Le but de travail est la détermination de l'humidité, la perméabilité et la déformabilité.

**Humidité** : La teneur en humidité a un impact sur la solidité d'un moule et sur sa perméabilité.

**Perméabilité** : La capacité d'un moule au sable à laisser les gaz et la vapeur s'échapper pendant le procédé de moulage.

**Déformabilité** : La capacité du mélange de sable à se déformer sous la contrainte. Des essais mécaniques (compression et cisaillement).

### II.10.3 Matériels utilisé

Au niveau de laboratoire de SARL GRALCOM

Pour déterminer les caractéristiques de mélange il suffit d'utiliser :

- Balance analytique.
- Calibreur.
- Appareil de contrôle de la perméabilité.
- Appareil de contrôle l'humidité.
- Machine des essais mécaniques.

Les figures II.20, II.21 et II.22 ci-dessous présentent l'appareillage utilisé :

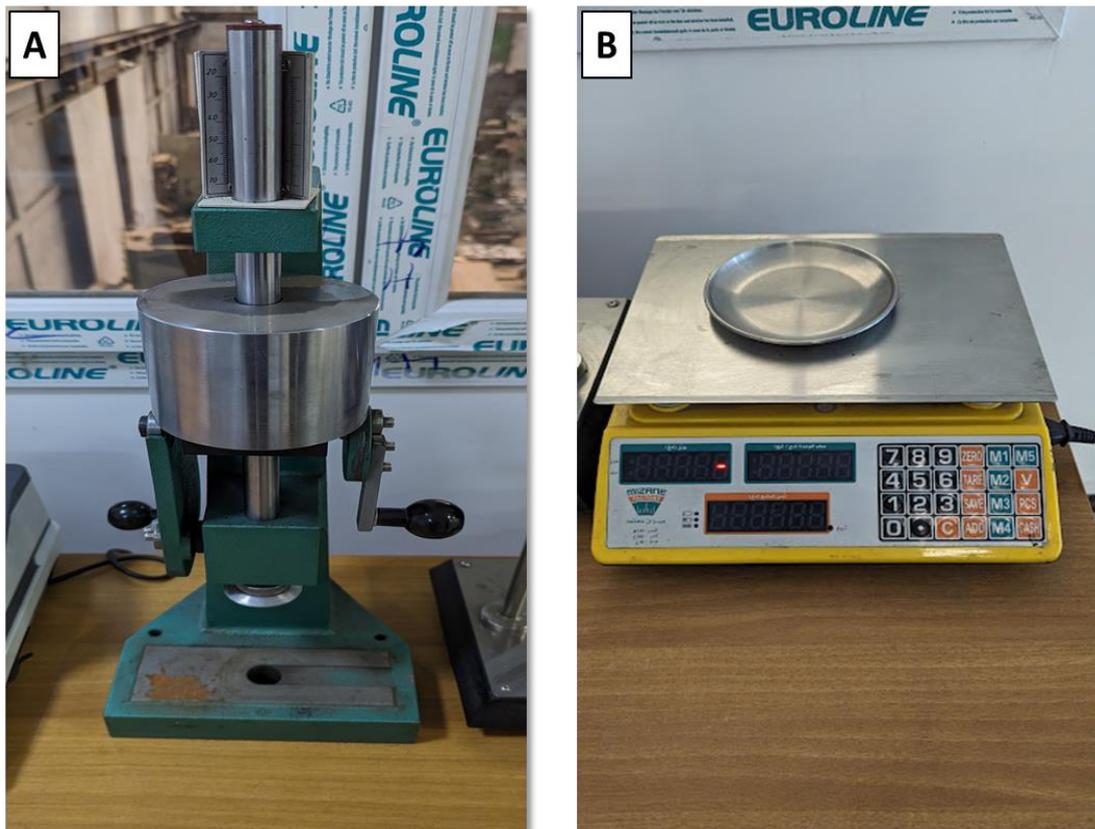


Figure II-15 : (A) Calibreur, (B) Balance analytique.



Figure II-16 : (A) Appareil de contrôle de perméabilité, (B) Appareil de contrôle d'humidité.



Figure II-17 : Machine des essais mécaniques (cisaillement et compression).

#### II.10.4 Mode opératoire

1. Dans le test d'humidité, 10g du mélange sont prélevés et introduits dans l'appareil.
2. Dans les tests de perméabilité ainsi que les essais mécaniques de compression et de cisaillement, des éprouvettes sont préparées.

Pour chaque essai, trois éprouvettes contenant 150 g du mélange sont utilisées.

#### II.10.5 Résultats

Les résultats des tests et les essais sont répertoriés dans le tableau II-5.

**Tableau II-3** : Résultats des tests et les essais du mélange.

Analyse	Humidité	Perméabilité	Compression Kg.f/cm <sup>2</sup>	Cisaillement Kg.f/cm <sup>2</sup>
Moyenne	2.93	202.6	0.155	0.36

Caractéristique de sable du moulage

**Tableau II-4** : Intervalle d'acceptation les caractéristique.

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

## II.11 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 vilebrequin. 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 supérieure et le châssis inférieure qui compose le moule sont préparé séparément, chacun des deux est remplis avec du sable.



Figure II-18 : (1,2) Châssis inférieur et supérieur, (3) Châssis final.

## II.12 Fusion et Elaboration

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, etc...), 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, une médaille envoyée a laboratoire pour faire l'analyse des éléments d'addition, cette opération nous permettre de faire la correction pour obtenu le métal (GS).

### II.12.1 Equipements

#### II.12.1.1 Four à induction

Le four à induction de la fonderie à 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 II.27)



**Figure II-19 :** (1) et (2) Four à induction.

#### **II.12.1.2 Poche de traitement**

Une poche de coulée (capacité 'jusque à 300 Kg), 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.



Figure II-20 : (1) la poche de traitement et (2) intérieur de la poche.

### II.12.1.3 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 II-21 : (1) et (2) Spectromètre de masse mL300.

### II.13 Elaboration

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

<b>Ductile Iron -</b>		<b>700/2 Grade</b>								
Material	Wt	C	Si	Mn	Cu	Present	C	Si	Mn	Cu
Pig Iron	300	11,4	4,8	0,75	0		3,80%	1,60%	0,25%	0%
CRCA	350	0,7	0,7	0,875	0		0,20%	0,20%	0,25%	0%
Runner	350	12,6	8,4	1,575	1,05		3,60%	2,40%	0,45%	0,30%
Rejection	0	0	0	0	0		3,60%	2,40%	0,45%	0,30%
Total Kg	1000	24,7	13,9	3,20	1,05					
% Available		2,47%	1,39%	0,32%	0,11%					
Required %		3,70%	1,60%	0,60%	0,70%					
Required kgs		37	16	6	7					
Diff Kgs		12,3	2,1	2,8	5,95					
Recovery		85%	60%	60%	98%					
Addition req kgs		<b>14,47</b>	<b>3,50</b>	<b>4,67</b>	<b>6,07</b>					

**Figure II-22** : Le bilan de charge pour obtenir une fonte à graphite sphéroïdale de matrice perlitique.

- 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**

Pour une fonte à graphite sphéroïdale perlitique, on choisit une matière première qui est riche en Mn et de Cu comme montré dans le bilan précédent.

Les charges sont montrées dans la figure suivante :



**Figure II-23 : Charges.**

### II.13.1 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 II-24 : 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 :

*Tableau II-5 : Composition chimique par le spectromètre mL300.*

Eléments	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Cr%	Ni%	Cu%	Fe%
Pourcentage Massique	3.68	1.6	0.59	0.038	0.168	0.223	0.06	0,7	92.971

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) sous forme de poudre.

## II.14 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 II-25 : (1) et (2) Coulage dans la poche de traitement de sphéroïdisation au Mg.

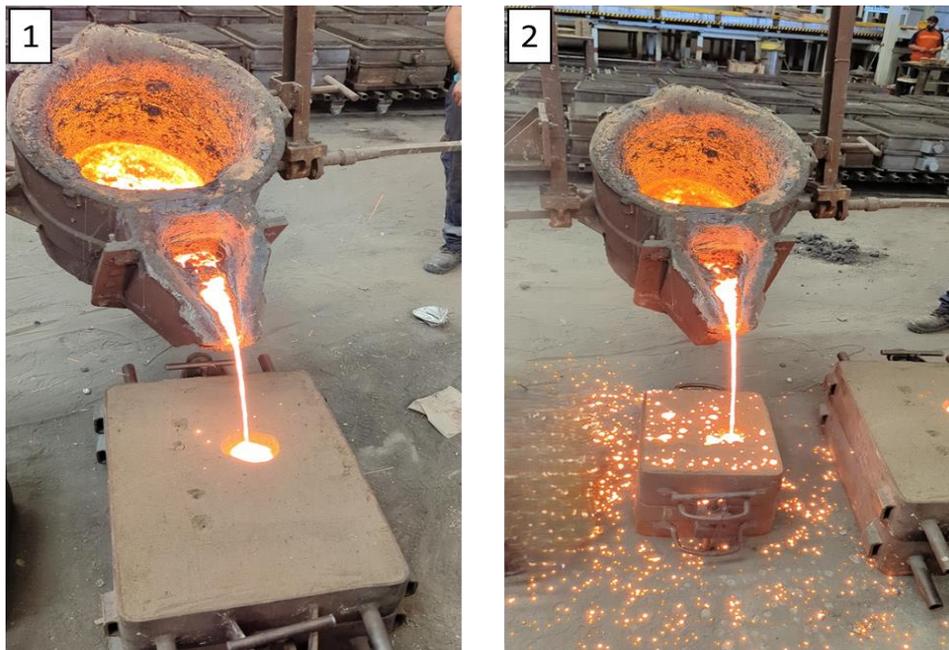


Figure II-26 : (1) et (2) Etape de coulée de la poche de coulée dans le moule.

## I.8 Opération de parachèvement

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

- Décochage, séparation du sable de moulage qui adhère à la pièce coulée.
- Déburrage, opération qui permet d'extraire le sable contenu à l'intérieur d'une pièce, après coulée et solidification.

- Grenailage, on procède le plus souvent par grenailage par des bulles d'acier projetées au moyen d'un jet d'air comprimé.

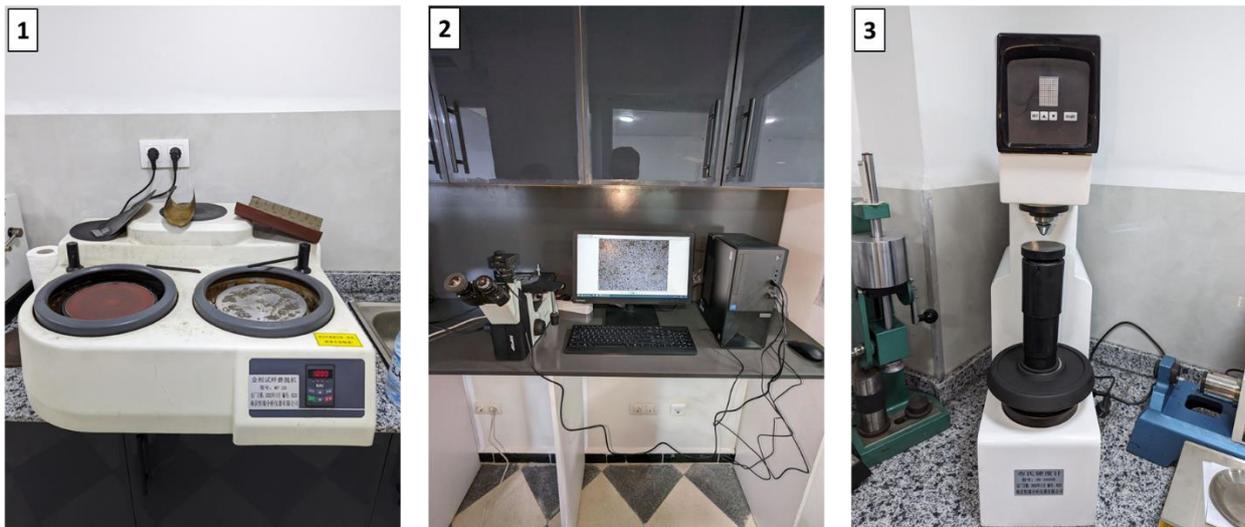
## II.15 Analyse et caractérisation

Après l'opération de coulage, le vilebrequin est prêt pour l'analyse. Des échantillons sont prélevés pour diverses analyses et caractérisations. La même chose pour le vilebrequin d'origine, pour faire une étude comparative entre les deux.

### II.15.1 Matériel utilisé

Au niveau de laboratoire SARL GRALCOM :

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



**Figure II-27 :** (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 4%) spécifique aux fontes.

### II.15.2 Analyse par spectromètre

Cette analyse permet de déterminer la composition chimique de l'échantillon de vilebrequin en utilisant le spectromètre.

### II.15.3 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 vilebrequin.

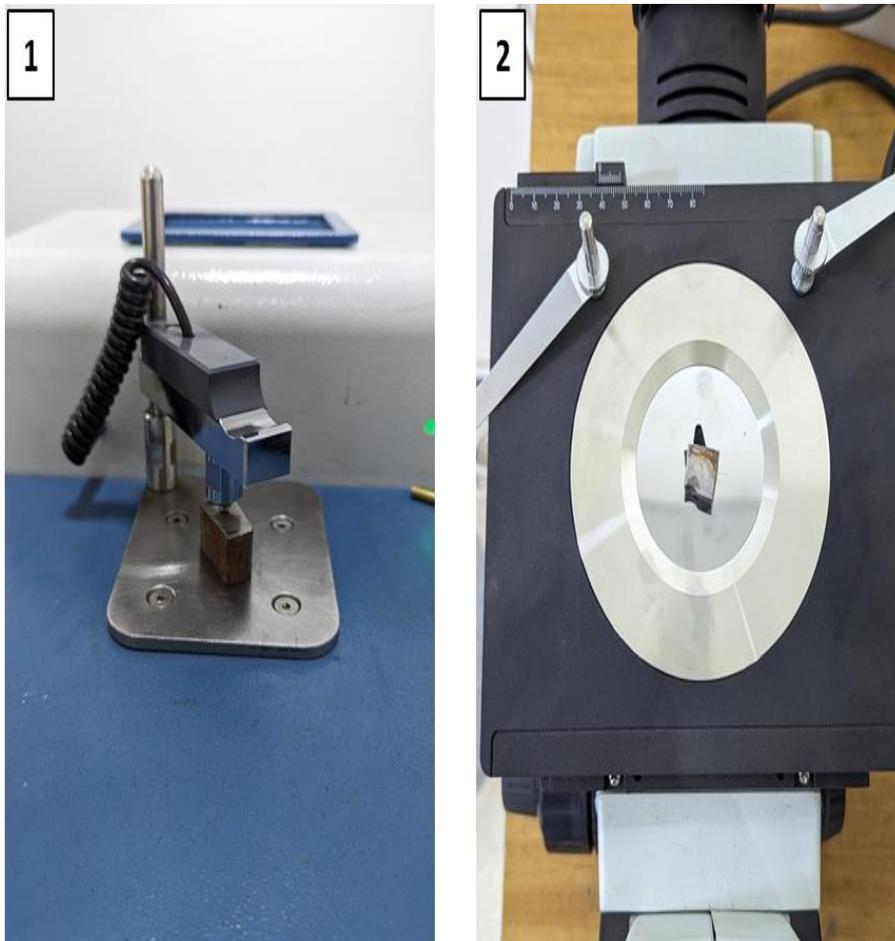


Figure II-28 : (1) Analyse par spectromètre et (2) Analyse par microscope optique.

### II.15.4 Essai duresté

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

**Figure II-29** : Essai de dureté.



*Chapitre III :*  
**Résultats et discussions**

### III.1 Introduction

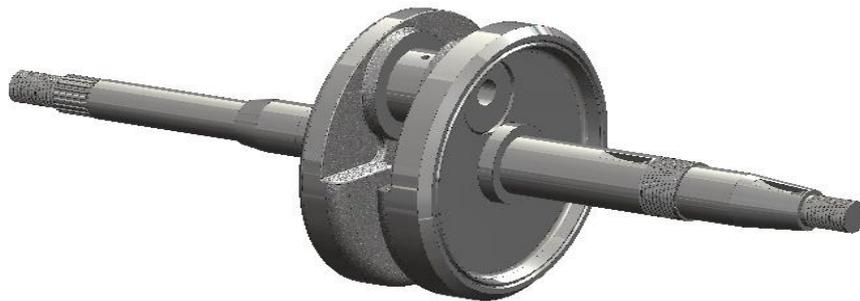
Dans ce chapitre, nous présenterons de manière détaillée les résultats obtenus tout au long du processus de conception du vilebrequin. Nous commencerons par illustrer la conception de la pièce, en incluant le modèle. Ensuite, nous exposerons les résultats des simulations effectuées pour évaluer et optimiser les performances du vilebrequin. En suivant, nous aborderons les résultats des caractérisations métallurgiques, notamment l'analyse par spectromètre de masse qui permet de déterminer la composition chimique, ainsi que les observations de la microstructure (MO) pour évaluer la qualité. Enfin, nous conclurons par le résultat de l'essai de dureté, essentiels pour vérifier la résistance mécanique de la pièce fabriquée.

### III.2 Conception

À l'aide du logiciel SolidWorks, nous avons réalisé le dessin de définition suivant :

- vilebrequin
- le modèle

La figure III.1 représente le dessin de définition de notre pièce



**Figure III.1** : Dessin de définition du vilebrequin.

### III.3 Simulation

Dans cette étape on va se Concentrer sur la coulée du métal, pour cela en va étudier son environnement afin d'obtenir une pièce moulée, et aussi pour éviter plusieurs problèmes :

- Le risque de caresse.
- La solidification prématurée.
- Une pression insuffisante.
- Un emprisonnement d'air.

#### III.3.1 Sans masselotte

Commençons d'abord par l'écoulement du métal dans le moule en fonction de la température. La figure III.8 montre l'écoulement du métal en fonction de température.

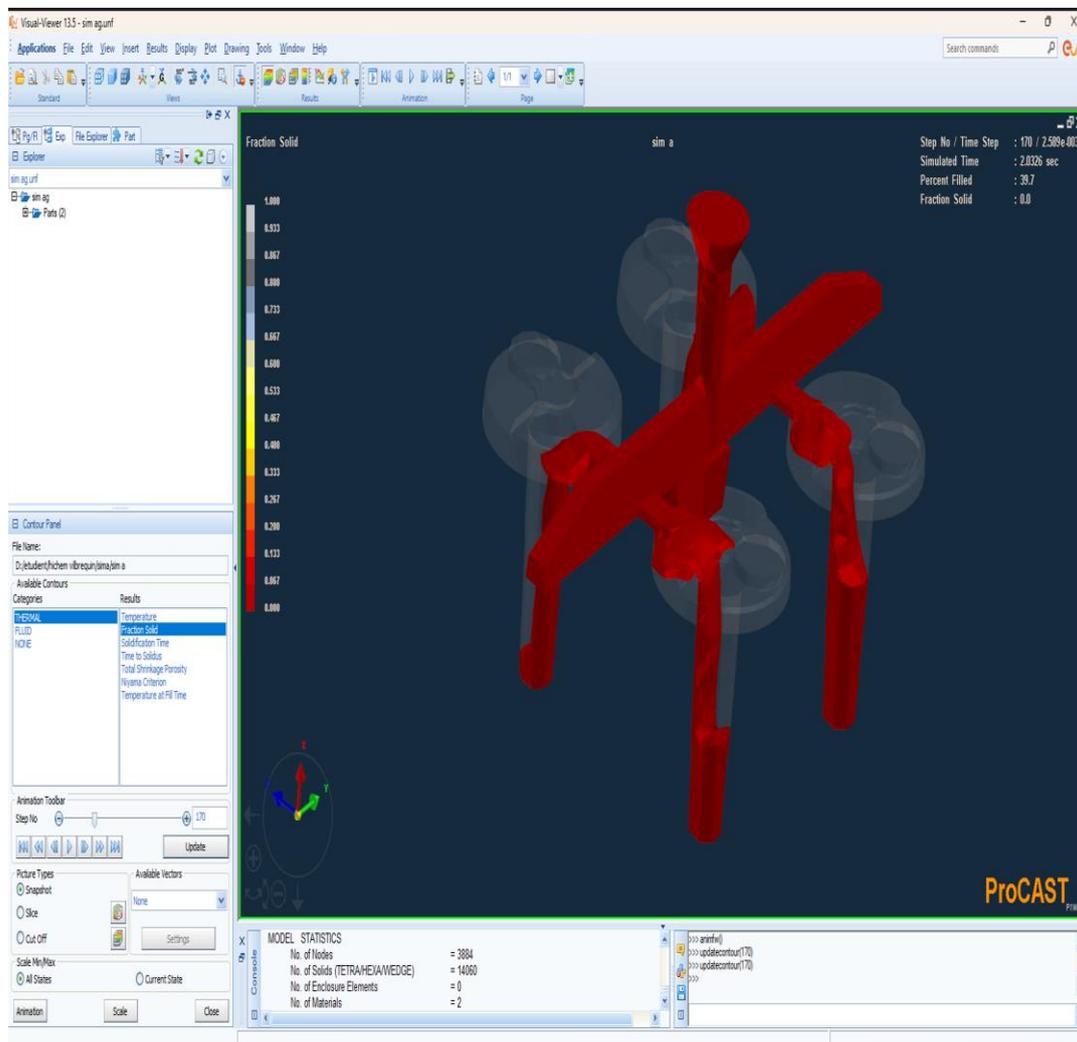


Figure III.2 : Représentent l'écoulement du métal dans le moule en fonction de la température.

### Le défaut

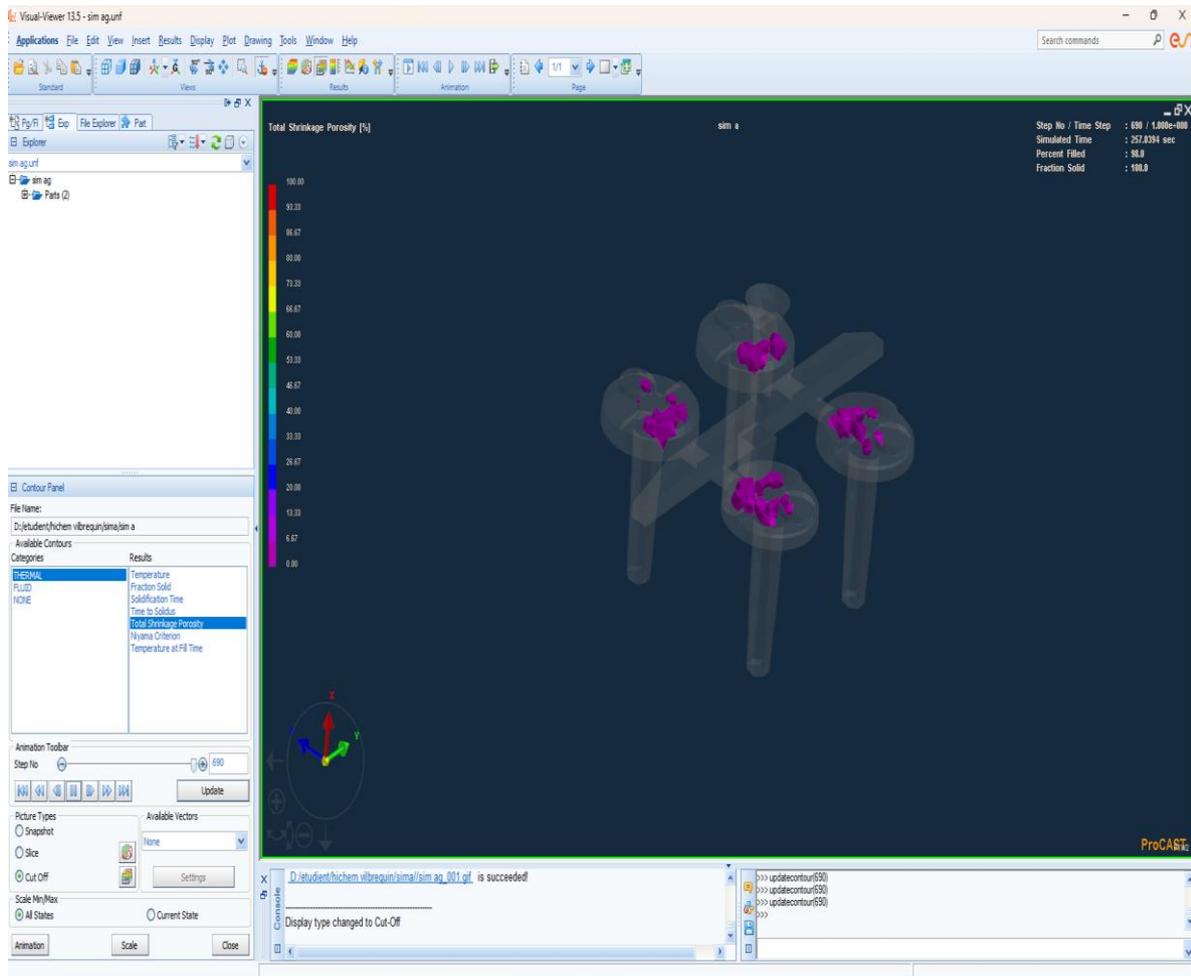


Figure III.3: Porosité.

### Vides

Représentés par des taches bleues, situés dans la partie supérieure du vilebrequin. Sont des cavités internes qui se forment en raison d'une insuffisance d'alimentation en métal liquide pendant le processus de solidification, entraînant des zones non remplies dans la structure du vilebrequin.

### Retrait de porosité

Représenté par des taches mauves, localisation situés dans les parois de sortie du vilebrequin. La porosité de retrait se forme lorsque le métal liquide ne parvient pas à compenser la contraction volumétrique qui se produit durant la solidification, créant ainsi des cavités dans les parois de sortie du vilebrequin.

### III.3.2 Avec masselotte

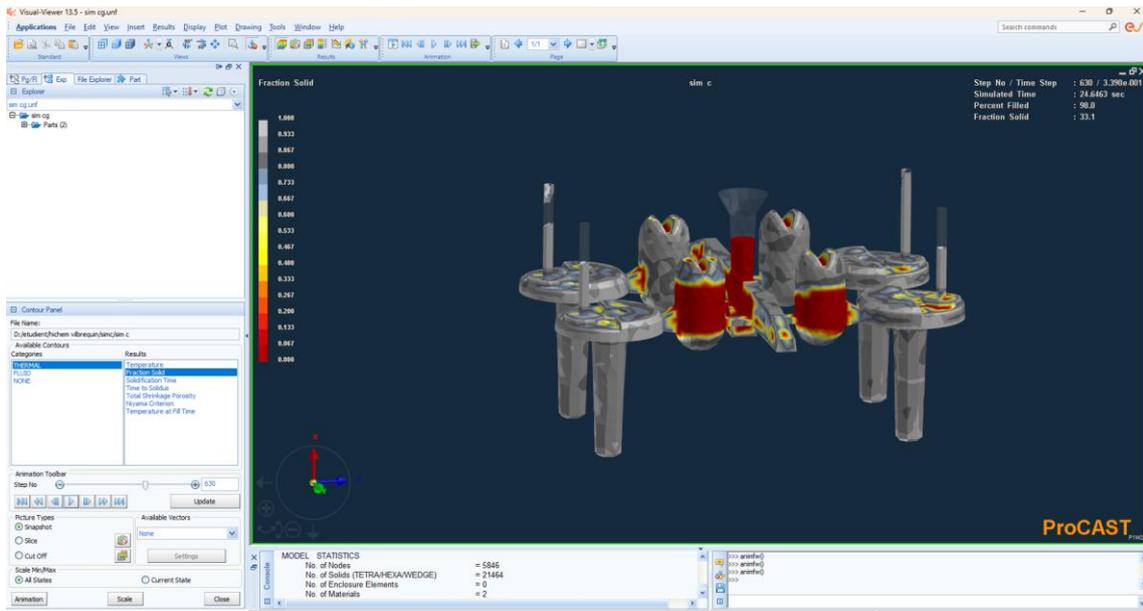


Figure III-4 Evolution de l'écoulement du métal dans le moule en fonction de la température avec le système de masselotte.

### III.4 Résultat de la réalisation

D'après les opérations de coulage et de parachèvement, nous obtenons notre pièce.



Figure III-5 Vilebrequin réalisé.

### III.5 Analyse chimique

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

**Tableau III.1** : Composition chimique du vilebrequin obtenue par spectrométrie optique à étincelle.

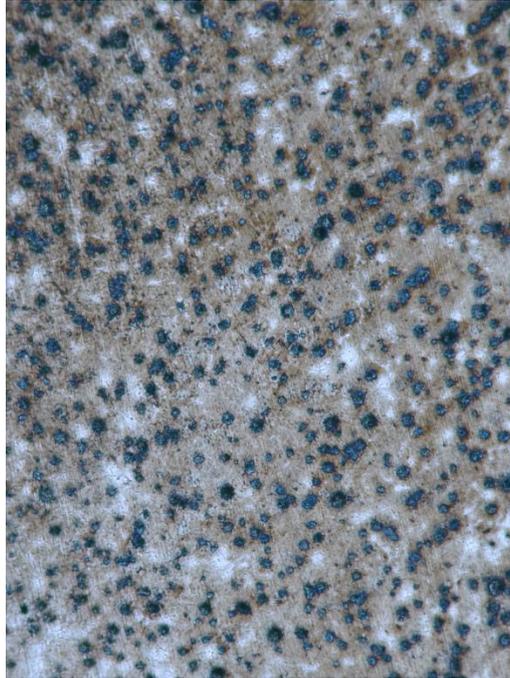
Eléments	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Cr%	Ni%	Cu%	Fe%
Pourcentage massique	3,6	2,3	0.59	0.01	0.014	0.24	0.01	0.7	balance

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 3.60% 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 graphitnant 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 0.59% contribue à la formation de perlite.
- Le cuivre est un élément perlitisant qui favorise la formation de perlite et améliore la résistance à la traction et à la corrosion.
- 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.

### III.6 Microstructure

Les analyses métallographiques ont été réalisées sur des échantillons polis et attaqués pour révéler les constituants de la microstructure. La figure III.17 montre la microstructure du vilebrequin élaboré.



**FigureIII-6:** Observation microstructurale (X 100).

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 perlite apparaît en zones plus sombre.

### **III.7 Dureté**

Afin de compléter la caractérisation du vilebrequin, nous avons effectué un essai de dureté de Brinell (HB). On obtient une dureté de 244 HB.



**Figure III-7 :** 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 ferritiques a tendance à être plus douce, tandis qu'une matrice principalement perlitique à tendance à être plus dure.
- Une dureté de 245 HB est indicative d'une matrice perlitique,

### III.8 Etude comparative

Une étude comparative a été réalisée entre le vilebrequin référentiel et le vilebrequin 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 vilebrequins.

#### III.8.1 Composition chimique

**Tableau III-2:** Résultats de la composition chimique du vilebrequin référentielle et le vilebrequin élaboré.

Eléments	C%	Si%%	Mn%	Cu%	S%	Cr%
Vilebrequin référentiel	<b>0,3</b>	<b>0,25</b>	<b>0.53</b>	<b>0.02</b>	<b>0.009</b>	<b>0,9</b>
Vilebrequin élaboré	<b>3.6</b>	<b>2.3</b>	<b>0.59</b>	<b>0.7</b>	<b>0.01</b>	<b>0,24</b>

Les résultats du tableau comparant les compositions chimiques de deux vilebrequins, le 1er en acier équivalent à 36CrNiMo4, et le 2<sup>em</sup> en fonte GS équivalent à une GS 700/2

### III.8.2 Microstructure

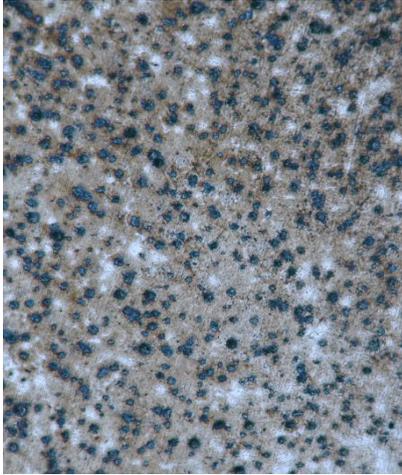


Figure III-8 : Fonte gs perlitique.

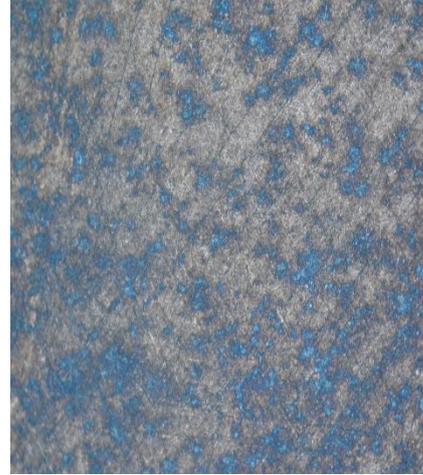


Figure III-9 : Martensite.

Les nodules de graphite sphéroïdal sont bien distribués dans La microstructures. Pour le vilebrequin élaboré, la matrice environnante est principalement perlitique, ce qui est visible par la structure relativement uniforme et claire autour des nodules de graphite. La perlite offre des propriétés de résistance très élevé et un allongement très petit.

Pour le vilebrequin référentiel la matrice présente une combinaison de martensite (zones claires)

### III.8.3 Dureté

*Tableau III-7 : Comparaison de dureté entre les deux collecteurs.*

Vilebrequin	Référentiel	Elaboré
Dureté (HB)	244	256

Les données indiquent une différence significative dans les propriétés des deux types de vilebrequin.

### III.8.4 Poids et dimension

- ✓ Les dimensions du vilebrequin élaboré sont légèrement différentes de celles du vilebrequin référentiel.
- ✓ Le poids aussi est es légèrement différent.
- ✓ Cela explique qui le vilebrequin élaboré n'a pas encore été usine pour arrive à la cotation fin

# **Conclusion**

## **Conclusion générale**

L'objectif de notre travail de PFE s'insérait dans le contexte de recherche de nouveaux outils intégrés et de nouvelles méthodes pouvant améliorer la maîtrise de la phase de conception et redonner l'avantage aux fonderies à haut niveau de technicité. L'apport constituera une base dans le processus de prise de décisions de l'entreprise GRALCOME par rapport aux produits demandés des différents secteurs, constituant ainsi, une meilleure prise en charge des problèmes techniques des entreprises locales et contribuant à l'intégration de la technologie de fonderie pour la réalisation de pièces automobiles.

A l'issue de notre étude nous pouvons dégager les éléments suivants :

- Les étapes de conception sur solidworks nous ont permis de mieux cerner le choix des paramètres de simulation intégrant les éléments essentiels du système de remplissage, à savoir ; l'entonnoir, la descente de coulée, le chenal et les attaques. Nous avons considéré dans notre étude des modèles avec et sans système de masselottes ;
- La rétro conception du vilebrequin en FGS a permis d'élaborer un modèle optimisé en termes de dimensions et de matériaux ;
- Le modèle conçu sur SolidWorks a intégré les paramètres critiques nécessaires pour une performance optimale et une durabilité accrue du vilebrequin.
- Le modèle a été créé en utilisant SolidWorks pour définir précisément les dimensions et les caractéristiques nécessaires à la fabrication du vilebrequin, assurant une correspondance fidèle avec les spécifications techniques
- La simulation réalisée avec le logiciel ESI ProCast a permis de vérifier et d'optimiser le système de remplissage et de solidification du vilebrequin.
- Les résultats de la simulation ont montré une répartition uniforme du graphite sphéroïdal et une minimisation des défauts de coulée, assurant ainsi la qualité du produit final

Nous avons tenu à respecter les étapes de réalisation des moules et de boîtes à noyau, le choix des sables de moulage et le paramétrage des machines dans la chaîne de moulage. La coulée de la fonte après traitement de graphitisation dans la poche de coulée a donné, après solidification, des pièces conformes au tracé optimum après simulation. Elles présentent les mêmes défauts enregistrés sur la simulation ;

### *Conclusion générale*

- Les tests de dureté et d'analyse spectrométrique ont confirmé que le vilebrequin fabriqué possède les propriétés mécaniques souhaitées.
- Les analyses microstructurales ont révélé une distribution homogène des nodules de graphite dans la matrice métallique ferrito-perlitique, assurant ainsi une bonne combinaison de dureté et de ductilité.
- Les comparaisons de dureté et de poids entre le vilebrequin élaboré et le vilebrequin référentiel ont mis en évidence la similitude dimensionnelle significative pouvant être améliorée par une approche expérimentale complémentaire.

*En perspectives*, nous pouvons proposer les suggestions suivantes :

1. Intégrer le scanner 3D dans l'étape de construction des dessins de définition du collecteur. Ceci permettra de réduire les erreurs de cotation et améliorer la détermination des tolérances en prenant en considération les retraits réels de solidification des nuances perlitique.
2. Corriger le tracé du système de masselottes pour éviter l'apparition des défauts de solidification.
3. Revoir le bilan matière en intégrant une charge favorisant la solidification d'une fonte GS perlitique.

## **Référence bibliographiques**

- [1] Magazine MISC - n°7, Hors-Série, Le guide du reverse engineering, 2019.
- [2] Matériaux métallique, 97.
- [3] William D, Callister Jr, Sciences et génie des matériaux,
- [4] Mercier Jean P, Zambelli Gérald et Wilfried Kurz, Introduction à la science des matériaux,
- [5] Michel Colombié et coll, Matériaux métallique, 307- 317.
- [6] Thibault FOURCADE, Technique de l'ingénieur, 2023.
- [7]<https://metalblog.ctif.com/2021/04/19/les-nouvelles-fontes-gs-a-matrice-ferritique-renforcee-font-le-show/>, (20/04/2024).
- [8] Laboratoire SARL GRALCOM.
- [9] Si Ahmed, Expertise et Contrôle des matériaux, USTHB, 2022/2023.
- [10] Jean-Paul et Jean-Marie, des matériaux, 3<sup>e</sup> édition.
- [11] RAWEN JDAY, Caractérisation microstructurale du graphite sphéroïdal formé lors de la solidification et à l'état solide, 2017.
- [12] RÉMY Alex, Technique de l'ingénieur, Matériaux | Mise en forme des métaux et fonderie Fontes à graphite sphéroïdal, 2021.
- [13] Effet des traitements thermique sur les fontes à graphite sphéroïdales alliées, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 2017/2018.
- [14] Jacques JAULT, Technique de l'ingénieur, Matériaux,| Étude et propriétés des métaux Fontes à graphite sphéroïdal - Propriétés d'utilisation, 2001.
- [15] CETIM, Manuel industriel de l'usure et du grippage, Edition Science et Industrie.
- [16] H.BRETON, Manuel des fontes moulées, 227-232, 1966.
- [17] LACAZE J, Formation des structures dans les fontes ferrito-perlitiques à graphite sphéroïdal : approches expérimentales, modélisation et simulations numériques, Métallurgie – CIT / Science et Génie des Matériaux, vol. 93, n°5, p 641-655, 1996.
- [18] BROQUET pierre, Précis de fonderie, tome 2, 99-104.

# Annexes

## **Annexes**

### ***Montage de la nouvelle sablerie***

L'industrie de la fonderie a connu une transformation radicale au cours des dernières décennies, marquée par l'introduction de technologies de pointe qui ont révolutionné les processus traditionnels. À la recherche d'une efficacité accrue, d'une réduction des coûts énergétiques et de la minimisation de l'empreinte carbone, la SARL GRALCOM, une fonderie visionnaire, se tourne vers des innovations scientifiques pour façonner l'avenir de la métallurgie.

Dans cette étude, nous explorerons en détail les composantes clés de cette nouvelle technologie au sein de la SARL GRALCOM, scrutant les avancées en matière de modélisation numérique, de contrôle de la qualité en temps réel, et d'analyse de données massives. De plus, nous évaluerons les implications économiques, environnementales et sociales de cette transition technologique au sein de la SARL GRALCOM, démontrant ainsi la pertinence de cette démarche dans le paysage actuel de l'industrie métallurgique.

### ***Sélection des équipements***

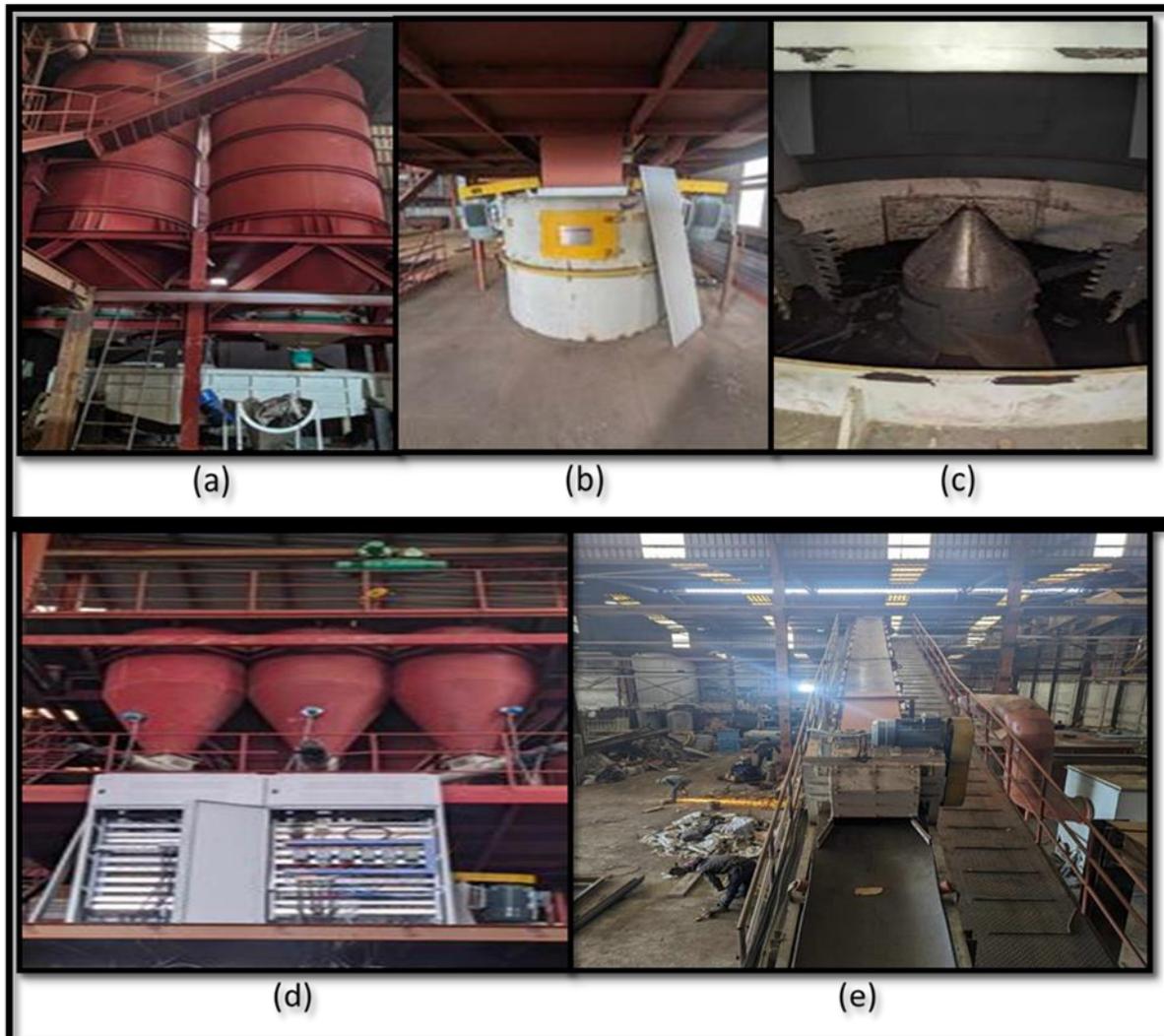
La sélection des équipements pour une nouvelle fonderie est une étape cruciale qui influencera directement la qualité de la production, l'efficacité opérationnelle et les coûts. Voici quelques étapes et considérations le processus de sélection des équipements :

### ***Sablerie***

La sablerie est un secteur stratégique au sein de la fonderie, centré sur la transformation du sable brut en un matériau de moulage de qualité. C'est ici que le sable, également connu sous le nom de sable de fonderie, est traité pour garantir des propriétés optimales de coulabilité et de solidification lors du moulage

- À l'intérieur de la sablerie, deux silos imposants, chacun d'une capacité de 70 tonnes, servent de réservoirs verticaux robustes pour stocker le sable. Ils assurent une gestion efficace des matières premières.
- Un malaxeur de pointe, avec une capacité de 2 tonnes par minute, est en place pour mélanger le sable avec d'autres composants nécessaires, tels que des liants chimiques. Cela permet d'obtenir une composition homogène adaptée au processus de moulage.

- L'équipement est complété par un élévateur à godets, assurant le déplacement vertical du sable au sein de la sablerie. Cet élévateur à godets facilite le transfert efficace du sable des silos au malaxeur, maintenant ainsi un flux de production continu.

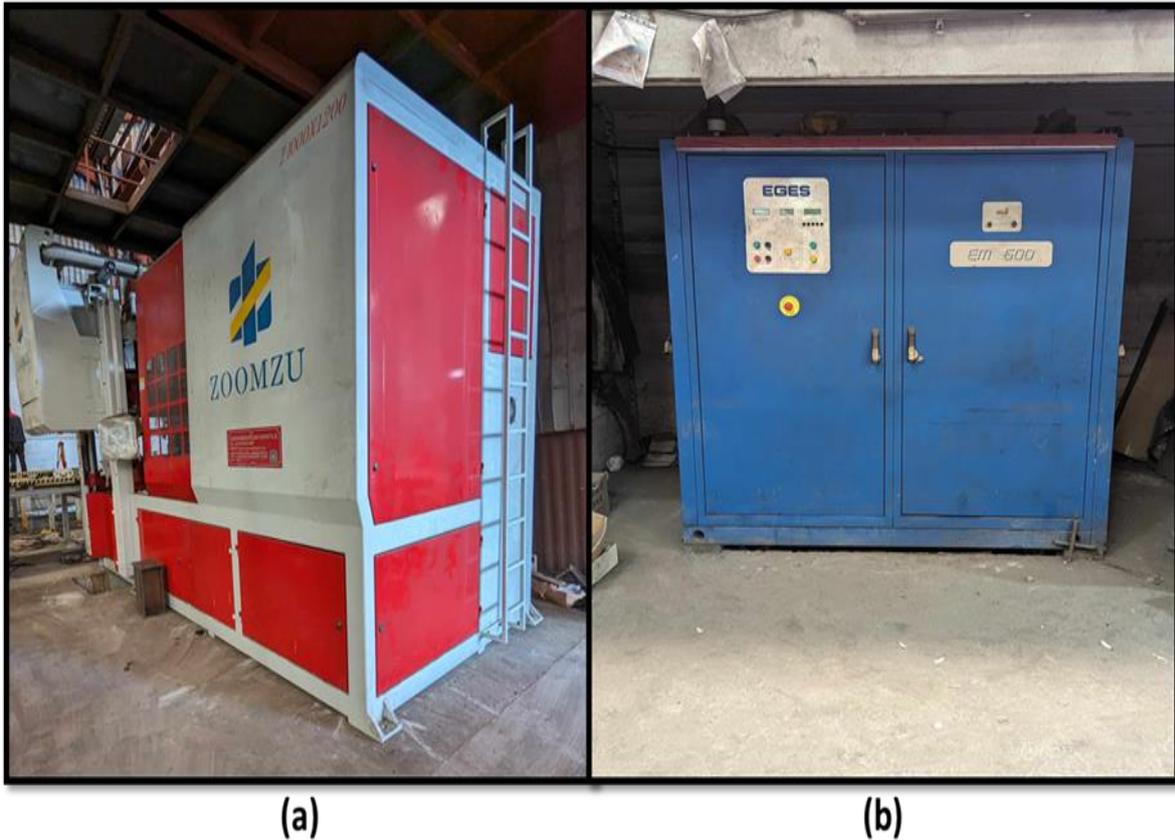


### ***Machine du moulage***

La machine de moulage avancée, dotée d'une capacité impressionnante de 60 châssis par heure, incarne l'apogée de l'efficacité dans le processus de fabrication. Conçue pour répondre aux exigences rigoureuses de la production industrielle, cette machine intègre des fonctionnalités de pointe pour garantir une performance optimale et une productivité inégalée.

### ***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.



### *Décocheuse*

La décocheuse est un outil essentiel dans le processus de finition des pièces moulées en fonderie. Après la coulée du métal en fusion dans le moule, il arrive fréquemment que des résidus de sable adhèrent à la surface de la pièce. La décocheuse, fonctionnant par vibration contrôlée, est spécifiquement conçue pour éliminer efficacement ces résidus.

### *Cabine de grenailage*

C'est l'enceinte fermée où se déroule le processus de grenailage. Elle est équipée d'un système de récupération des abrasifs pour les réutiliser, réduisant ainsi les coûts et l'impact environnemental.



(a)

(b)

### *Tamiseuse*

Pour éliminer les impuretés et garantir une granulométrie uniforme, essentielle pour une coulée de précision.

### *Refroidisseur*

Un refroidisseur est un dispositif ou un système conçu pour abaisser la température de sable.



(a)

(b)

(c)

### *Outils des finitions*

Les outils de finition sont utilisés pour améliorer la qualité et l'apparence des pièces moulées :

- Meuleuses.
- Limes.
- Brosses métalliques.
- Produits chimiques de finition.

