

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

Faculté de Génie de la Construction

Département Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER ACADÉMIQUE .

EN GÉNIE MÉCANIQUE

OPTION : GENIE DES MATERIAUX

THEME :

"Caractérisation Physico-chimique et Mécanique de la Fonte GG15 DIN1691 utilisé pour le moulage des Carcasses à E.I.AZAZGA".

Présente par :

MEHDI Mohammed El Mehdi .

Lundi : 30/09/2024 à 8h:30.

Encadré par :

Dr BAGUENANE-BENALIA Ghalia (M.C.A).

Co-Encadré Par :

Mr BENACER Mohend Ouamer (E.I AZAZGA).

Mr BENALIA Kamel (Doctorant).

Promotion 2023/2024

Remerciements

D'abord je tiens à remercier en premier lieu le bon « Dieu » de m'avoir donné, santé, courage et la foi pour mener mon travail avec volonté et beaucoup de patience.

*J'adresse mes sincères remerciements à **Dr BAGUENANE-BENALIA, G .**, **Maître de Conférence A** au département Génie Mécanique à l'U.M.M.T.O., d'avoir accepté de m'encadrer, m'orienter tout au long de ce travail, pour l'aide compétente qu'elle m'a apportée, pour sa patience et son encouragement à finir ce travail.*

*J'adresse aussi une mention particulière à mes co-encadreurs **Mr BENACER, M.O.**, (E.I AZAZGA), pour son aide précieuse et ses conseils dans la réalisation de ce travail et **Mr BENALIA, K.**, Doctorant au département Génie Mécanique à l'U.M.M.T.O., d'avoir mis à ma disposition tous les moyens humains et matériels pour la réussite de ma partie expérimentale.*

Je ne manquerai pas, non plus, de dire un grand merci aux membres de jury qui ont accepté, sans réserve, d'évaluer ce travail à sa juste valeur, et de me faire part de leurs remarques sûrement pertinentes qui, avec un peu de recul, contribueront, sans nul doute au perfectionnement du présent travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et reconnaissance à l'équipe de laboratoire physique et chimie E.I AZAZGA ,en leur tête Mr BELABBAS, F., d'avoir mis à ma disposition tous les moyens humains et matériels pour la réussite de ma partie expérimentale.

En fin, nous ne saurons passer sous silence mes parents et à tout qui, de près ou de loin, m'ont soutenu moralement, que tous vous retrouviez ici l'expression de nos sincères gratitude.

Dédicaces

A

Mes chères parents

Mes frères et ma sœur

*A tous ceux qui m'ont soutenue durant la réalisation
du présent travail.*

Liste des équations

(1) Réaction Anodique	23
(2) Réaction Cathodique	23
(3) Point Eutectoïde	27
(4) Point Eutectique d'une fonte blanche	27
(5) Point Eutectique d'une fonte grise	27
(6) Point Péritectoïde	27
(7) Mesure de la densité	28
(8) Mesure de la conductivité thermique	28
(9) Calorimétrie différentielle à Balayage (DSC)	29
(10) Capacité calorifique spécifique	29
(11) Coefficient de Dilatation Thermique	29
(12) Mesure de la Conductivité Électrique	30
(13) Résistivité électrique	30
(14) Mesure des Propriétés Magnétiques	30
(15) Perméabilité magnétique	30
(16) Spectrométrie de Fluorescence des Rayons X (XRF)	32
(17) Spectrométrie d'Émission Atomique avec Plasma à Couplage Inductif (ICP-AES)	34
(18) Intensité du signal d'ion	35
(19) Réaction de combustion (concentration)	36
(20) Analyse par Combustion (Quantité d'élément)	36
(21) Energie de liaison	38
(22) Contrainte-déformation	40
(23) Module d'élasticité	40
(24) Dureté Brinell	42
(25) Dureté Vickers	43
(26) Dureté Knoop	43
(27) Résilience	46
(28) Modèle Empirique de Basquin	49
(29) Modèle Empirique de Basquin (logarithmique)	49
(30) Limite de Fatigue	50
(31) Taux de fluage minimum	51
(32) Durée de vie en fluage	52
(33) Limite de fluage	52
(34) Loi de Bragg	54

Liste des figures

<u>Figure 1</u> : Photos de vues face frontale (a) et face dorsale (b) de la pièce étudiée	05
<u>Figure 2</u> : Diagrammes d'équilibre binaire Fer-Carbone stable et Fer-cémentite Fe ₃ C Fer-Carbone métastable	25
<u>Figure 3</u> : Principe de fonctionnement de XRF	32
<u>Figure 4</u> : Principe de fonctionnement de spectrométrie ICP – AES	33
<u>Figure 5</u> : Principe de fonctionnement (ICP-MS)	34
<u>Figure 6</u> : Principe de fonctionnement de XPS	37
<u>Figure 7</u> : Courbes de traction	41
<u>Figure 8</u> : Fonctionnement de l'essai de Résilience (Mouton de Charpy)	45
<u>Figure 9</u> : Modèle de courbe de Wöhler S-N alliage ferreux	48
<u>Figure 10</u> : Principe de fonctionnement de MEB-EDS	56
<u>Figure 11</u> : Déterminateur de carbone et de soufre ELTRA CS 800 de EI	62
<u>Figure 12</u> : Limailles de fonte	64
<u>Figure 13</u> : Grain de Tungstène (accélérateur de combustion)	64
<u>Figure 14</u> : Creuset en porcelaine	65
<u>Figure 15</u> : Mélange de la fonte GG15 avec le Tungstène après combustion pour analyse.....	65
<u>Figure 16</u> : Tour mécanique Weiler CONDOR VS 1	66
<u>Figure 17</u> : La Polisseuse Buehler ECOMET III de L'E.I.AZZAZGA.....	67
<u>Figure 18</u> : Duromètre WOLPERT DIA TESTOR 2RC	68
<u>Figure 19</u> : Mesure de l'empreinte	68
<u>Figure 20</u> : Microscope optique Union Tokyo Bi-12703	69
<u>Figure 21</u> : Observation microscopique de la fonte GG15 , à grossissement x 300	72
<u>Figure 22</u> : Métallographie de la fonte GG15 selon la norme DIN 1691	72
<u>Figure 23</u> : Observation au MEB de la fonte GG15	74

Liste des tableaux

<u>Tableau 1</u> : Comparaison des propriétés des différentes fontes	20
<u>Tableau 2</u> : Les différents types et principes d'essai de dureté	44
<u>Tableau 3</u> : éléments chimiques de la fonte GG15	60
<u>Tableau 4</u> : Résultat de l'analyse par combustion de la fonte GG15	71
<u>Tableau 5</u> : Résultat d'essai de dureté de la fonte GG15	71
<u>Tableau 6</u> : Résultat de l'analyse spectrométrique	73

Sommaire

Introduction Générale	01
Présentation de l'Entreprise	02
Organigramme de L'EPE/ELECTRO-INDUSTRIES/SPA AZAZGA	03
Résumé	04
Objectif	05

Chapitre I :

Généralités sur les Fontes, le Moulage des Carcasses et la Corrosion

I- Généralités sur les fontes	06
I-1- Historique de la Fonte	06
I-1-1- Les Origines	06
I-1-2- Développement en Europe	06
I-1-3- Évolution et Applications Modernes	06
I-2- Définition de la fonte	07
I-3- Types et Propriétés des Fontes	07
I-3-1- La Fonte Grise	07
I-3-2- La Fonte Blanche	10
I-3-3- La Fonte ductile (ou Nodulaire)	12
I-3-4- La Fonte malléable	15
I-3-5- la Fonte Alliée	18
II- Le moulage des carcasses	20
II- 1- Processus de moulage	20
II- 2- Techniques de moulage	21
II- 3- Matériaux Utilisés	21
II- 4- Applications	22
III- La Corrosion et la Corrosion de la Fonte	22
III- 1- Mécanismes de la Corrosion	23
III- 2- Types de Corrosion Affectant la Fonte	23
III- 3- Prévention de la Corrosion	24

Chapitre II :

Les Principes des Méthodes de Caractérisations utilisées pour notre Fonte

I- Diagramme d'équilibre Fer-Carbone	25
I-1- Représentation du diagramme	26
I-1-1- Axes du Diagramme	26
I-1-2- Principales phases	26
I-1-3- Points et Réactions Clés	27
I-2- Utilisations Pratiques	27
II- Caractérisation Physico-Chimique des Fontes	28
II-1- Caractérisation physique des fontes	28
II-2- Caractérisation chimique des Fontes	31
II-2-1- Principaux éléments de composition des Fontes	31
II-2-2- Méthodes de Caractérisation Chimique	31
III- Caractérisation par les propriétés mécaniques	39
III-1- Essai de Traction	39
III-2- Essai de Dureté	42
III-3- Essai de Résilience (Charpy)	44
III-4- Essai de Fatigue	47
III-5- Essai de Fluage	50
IV- Caractérisation Microstructurale par Diffraction des Rayons X (DRX) et par	53
Microscopie Électronique à Balayage avec Analyse par Dispersion d'Énergie (MEB-EDS)	
IV-1- Diffraction des Rayons X (DRX)	53
IV-2- Microscopie Électronique à Balayage avec Analyse par Dispersion d'Énergie	56
(MEB-EDS)	
IV-3- Comparaison et Complémentarité des Techniques	58

Chapitre III

Les Méthodes et le Matériel utilisés par EI pour la caractérisation de la Fonte GG 15 DIN 1691

1- Le Matériau	60
I-1- Caractéristiques Principales de la fonte GG15	60

I-I-1- Propriétés mécaniques	60
I-I-2- Composition chimique	60
II- La Norme DIN 1691	60
III- Méthodes et Matériels	61
III-1- Analyse par combustion	61
III-1-1- Principe de l'analyse par combustion	61
III-1-2- Déterminateur du carbone et du soufre ELTRA CS-800	61
III-1-3- Préparation de l'échantillon et analyse	63
III-2- Essai de dureté	65
III-2-1- Polissage	66
III-2-2- Le Duromètre	67
III-2-3- Déroulement de l'essai de dureté.....	68
III-3- La microscopie optique	69
III-3-1- Le microscope optique	69
III-4- Analyse de spectrométrie	70
III-5- Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)	70

Chapitre IV

Résultats et Discussions

I- Résultat de l'analyse par combustion	71
II- Résultats de l'essai de dureté	71
III- Résultat de la microscopie optique	71
IV- Résultats de l'analyse spectrométrique	73
V- Résultat de l'observation au Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	73
Conclusion Générale	75

Références bibliographiques

Annexes

Introduction Générale

En tant que matériaux métalliques, les fontes, occupent une place prépondérante dans de nombreux secteurs industriels et domestiques. Ces alliages de fer et de carbone, caractérisés par une teneur en carbone comprise entre 2% et 4%, possèdent des propriétés mécaniques et physiques qui les rendent indispensables pour diverses applications. Leurs capacités à être moulés en formes complexes, leur résistance à l'usure et leur durabilité en font des choix privilégiés pour la fabrication de pièces critiques dans des industries telles que l'automobile, la construction, et l'équipement industriel.

L'utilisation des fontes remonte à plusieurs siècles, avec des preuves de leur utilisation dès le 5^{ème} siècle avant J.-C. en Chine. La révolution industrielle a marqué un tournant significatif dans l'histoire des fontes, avec l'avènement de nouvelles techniques de production et de traitement qui ont permis de diversifier leurs applications et d'améliorer leurs performances. Les développements modernes dans la métallurgie ont encore élargi les possibilités offertes par les fontes, en introduisant des variantes telles que la fonte ductile et la fonte malléable, qui offrent des combinaisons uniques de résistance, de ductilité et de ténacité.

Le présent mémoire vise à explorer la caractérisation physico-chimique et des propriétés mécaniques de la fonte GG15 DIN1691 utilisée pour le moulage des carcasses à E.I.AZAZGA, en mettant l'accent sur sa composition, ses propriétés, ses avantages et inconvénients, ainsi que ses applications spécifiques. L'objectif principal est de fournir une compréhension approfondie de cette fonte et de son utilisation, en se basant sur une analyse détaillée et des études de cas pratiques.

Malgré leur importance et leur utilisation répandue, les fontes restent des matériaux complexes dont les propriétés peuvent varier considérablement en fonction de leur composition et de leur traitement.

Ce mémoire se propose de répondre à plusieurs questions clés :

- Comment les différentes compositions et traitements influencent-ils les propriétés des fontes ?
- Quels sont les critères de sélection des différents types de fontes pour des applications spécifiques ?
- Quels sont les défis actuels et les perspectives futures dans l'utilisation des fontes ?



Présentation de l'Entreprise

Présentation de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES

ELECTRO-INDUSTRIES est implantée dans une zone agricole de 32 hectares, située sur la Route Nationale N° 12, à une distance de 30 Km du chef lieu de la Wilaya de Tizi-Ouzou et de 08 Km chef lieu de la Daïra d'Azazga .

ELECTRO-INDUSTRIES est une société par actions SPA au capital de 4 753 000 000 DA. L'entreprise a été créée sous sa forme actuelle en janvier 1999, après la scission de l'entreprise mère **ENEL (Entreprise National des industries Electrotechniques)**.

Son activité de production remonte à 1986, dans les domaines de fabrication de moteurs électriques, alternateurs et transformateurs de distribution.

L'ELECTRO-INDUSTRIES est composée de deux (02) unités ; toutes situées sur un même site :

- ✓ Unité de fabrication de Transformateurs .
- ✓ Unité de fabrication de Moteurs Electriques et Alternateurs.
- ✓ Unité Prestation Techniques.

Les produits fabriqués par **ELECTRO-INDUSTRIES** sont conformes aux recommandations de CEI (Commission électrotechnique internationale) et aux normes Allemandes DIN/VDE.

La production actuelle **d'ELECTRO-INDUSTRIES** est écoulee sur le marché Algérien et génère un chiffre d'affaire de 1,8 Milliards de Dinars.

La capacité de production de transformateurs **d'ELECTRO-INDUSTRIES** couvre les besoins du marché à 70% environ.

Les ventes des moteurs représentent 30% environ de sa capacité de production. Il est signaler que cette entreprise est le seule fabricant de ces produits en Algérie.

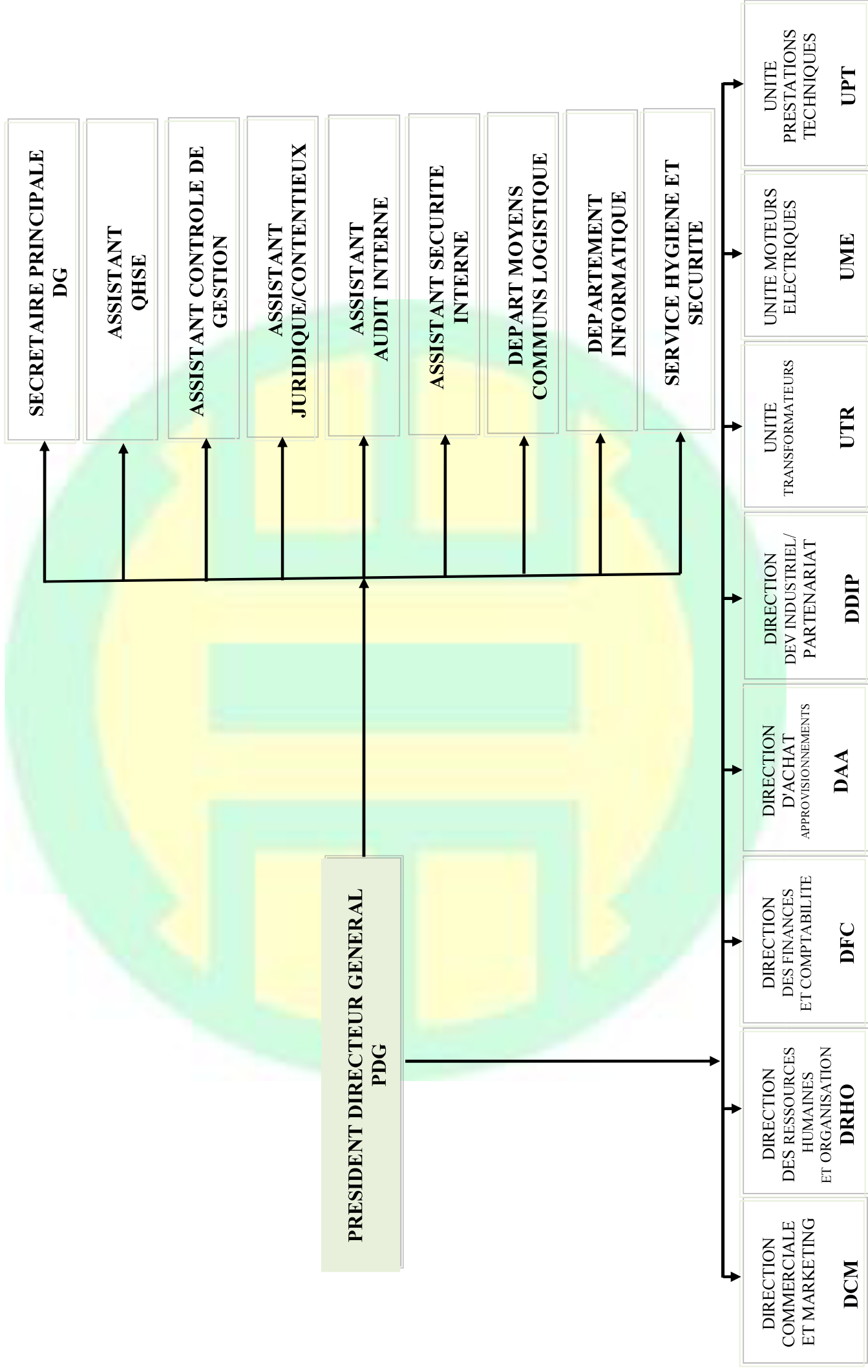
L'entreprise emploie un effectif de 826 travailleurs dont 26% de cadres, 30% de maîtrise et 44% d'exécution .

En matière de qualité **ELECTRO-INDUSTRIES** dispose de ses propres laboratoires d'essai et mesure, de ses produits ainsi pour le contrôle des principaux matériaux utilisés dans sa fabrication. Les différentes valeurs d'essai et de mesures sont consignées sur des procès-verbaux et des cartes de contrôle.

S'agissant du système documentaire, l'entreprise utilise 252 normes internes en plus des normes DIN/VDE et CEI.

L'entreprise a procédé à la mise en place de son système qualité en 2002 et a été certifiée par QMI Canada (Organisme de certification qualité) le 24/07/2004, ISO 9001 version 2000.

ORGANIGRAMME DE L'EPE/ELECTRO-INDUSTRIES/SPA AZAZGA



Résumé

Ce travail de caractérisation de la fonte a été effectué au sein de L'EPE/ELECTRO-INDUSTRIES/SPA AZAZGA.

Afin de fournir une compréhension approfondie de cette fonte et de son utilisation, en se basant sur une analyse détaillée et des études de cas pratiques.

Le présent travail vise à explorer la caractérisation physico-chimique et des propriétés mécanique de la fonte GG15 DIN 1691 utilisé pour le moulage des carcasses à E.I.AZAZGA tels que : l'analyse par combustion; de dureté; la spectrométrie et la microstructure par microscopie optique à défaut du Microscope électronique a balayage (MEB).

Objectif

LES PHOTOS DES VUES FACE FRONTALE (a) ET FACE DORSALE (b) DE LA PIECE EN FONTE GG15 A ETUDIEE

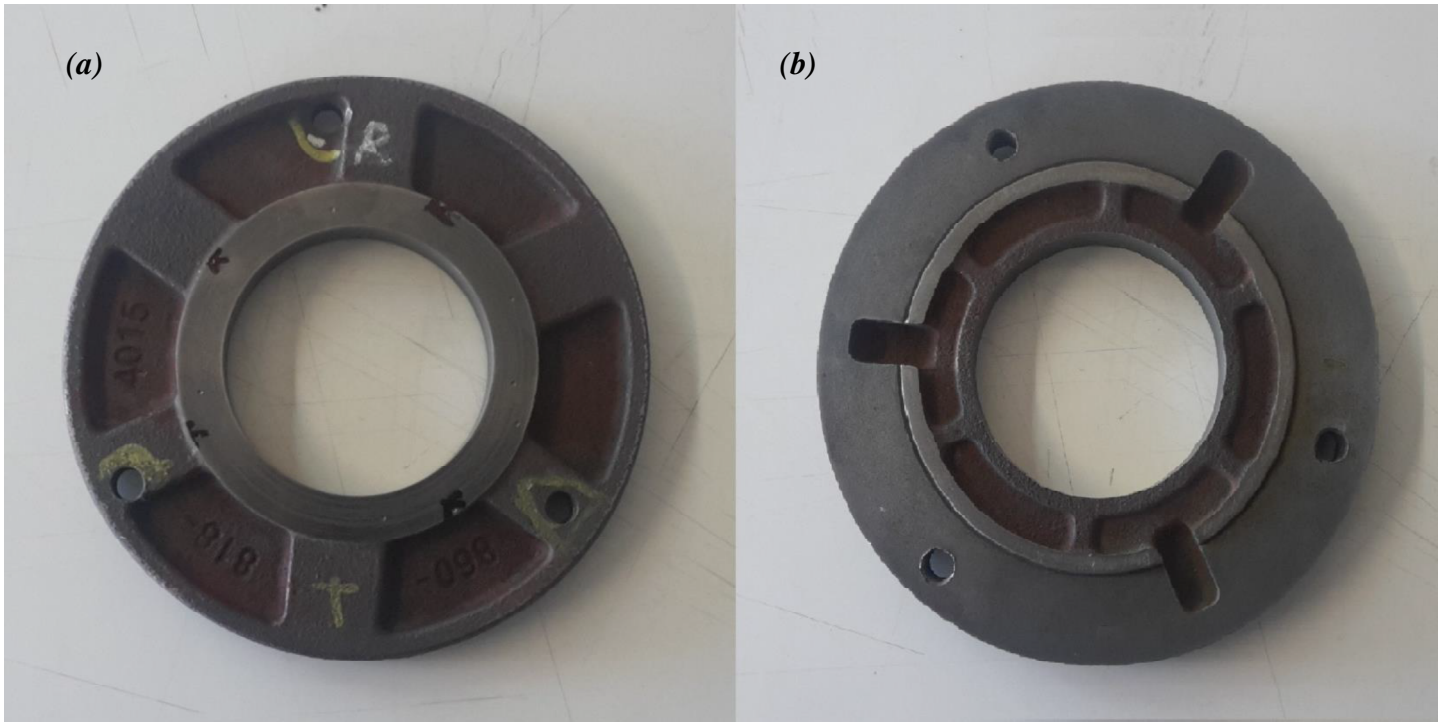


Figure 01 : Photos des vues face frontale (a) et face dorsale (b) de la pièce étudiée

Description de la pièce

Il s'agit d'un support du palier interne d'un moteur électrique moulée d'une fonte GG15 DIN1691 moulé à une température de $T=1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ et refroidis lentement, puis, elle subit ensuite usinage par un Tour mécanique et une Fraiseuse pour quelle ait une bonne finition des surfaces utiles de la pièce. La Figure 10 ci-dessous montre les Photos qu'on a prise des vues recto-verso de la pièce qu'on va étudier.

Chapitre I

*Généralités sur les fontes, le moulage
des carcasses et la corrosion de la
fonte*

I- Généralités sur les fontes

I-1- Historique de la Fonte [1]

I-1-1- Les Origines

La fonte, un alliage de fer et de carbone, a une longue histoire qui remonte à plusieurs millénaires. Selon les chercheurs et les historiens de la métallurgie, les premières traces d'utilisation de la fonte remontent à la Chine ancienne.

- **Chine ancienne** : La fonte a été produite pour la première fois en Chine vers le 5^{ème} siècle avant J.-C. Les anciens Chinois utilisaient des hauts-fourneaux pour fondre le fer et créer de la fonte, principalement utilisée pour fabriquer des outils agricoles, des armes et des ustensiles de cuisine.
- **Dynastie Han (206 av. J.-C. - 220 AP. J.-C.)** : La technologie de la fonte s'est perfectionnée, permettant la production de grandes quantités de fonte pour des projets d'infrastructure comme les ponts et les systèmes d'irrigation.

I-1-2- Développement en Europe

La fonte n'a été utilisée en Europe qu'à partir du Moyen Âge, bien après son développement en Chine.

- **Moyen Âge** : L'Europe a commencé à utiliser la fonte vers le 14^{ème} siècle. Les premiers Hauts-Fourneaux européens apparaissent en Suède et en Allemagne.
- **Révolution industrielle (18^{ème} - 19^{ème} siècles)** : La fonte est devenue un matériau crucial pour la construction des machines, des ponts, des bâtiments et des infrastructures.

La production de fonte a connu une augmentation significative grâce à des innovations comme le four à coke inventé par Abraham DARBY en 1709 en Angleterre.

I-1-3- Évolution et Applications Modernes

La production et les applications de la fonte ont évolué avec le temps, permettant la fabrication de différentes variétés adaptées à des besoins spécifiques.

- **19^{ème} siècle** : Introduction de la fonte malléable, qui est plus ductile et résistante aux chocs que la fonte grise ou blanche.
- **20^{ème} siècle** : Développement de la fonte ductile (ou nodulaire), offrant une meilleure résistance et une plus grande ductilité.

- **Applications modernes** : Aujourd'hui, la fonte est utilisée dans diverses industries, notamment l'automobile (blocs moteurs, cylindres), la construction (tuyaux, structures), et les équipements industriels (pompes, vannes).

I-2- Définition de la fonte

La fonte est un matériau ferreux dérivé de la fonte brute de coulée, qui est obtenu par la fusion de minerai de Fer avec du Carbone (principalement sous forme de coke) dans un Haut- Fourneau. La fonte est caractérisée par une teneur en carbone généralement supérieure à 2%, ce qui lui confère des propriétés distinctes par rapport à l'acier.

Il existe plusieurs types de fonte, chacun ayant des caractéristiques spécifiques adaptées à diverses applications industrielles.

La composition chimique de la fonte varie, mais elle contient typiquement:

- **Carbone** : 2% à 4% (principalement sous forme de graphite (G) ou de carbure de fer (Fe_3C))
- **Silicium** : 1% à 3%
- **Manganèse** : 0,5% à 1%
- **Soufre** : 0,05% à 0,2%
- **Phosphore** : 0,05% à 1%

Ces éléments influencent la microstructure et les propriétés mécaniques de la fonte. [2]

I-3- Types et Propriétés des Fontes [3]

I-3-1- La Fonte Grise

La fonte grise est un type de fonte largement utilisée en raison de ses propriétés mécaniques et de son coût relativement bas. Sa caractéristique distinctive est la présence de graphite sous forme de lamelles, ce qui lui donne une apparence grise à la rupture, d'où son nom. Elle peut être ainsi classée en différentes catégories basées sur sa microstructure et ses propriétés mécaniques :

- a) **Fonte Grise Perlitique** : Contient principalement de la perlite dans la matrice métallique, offrant une meilleure Résistance Mécanique.
- b) **Fonte Grise Ferritique**: Contient principalement de la ferrite, offrant une meilleure ductilité mais une Résistance Mécanique plus faible.

- c) **Fonte Grise Martensitique** : Contient principalement de la martensite, obtenue par des Traitements Thermiques spécifiques, offrant une dureté et une résistance à l'usure élevée.

✓ **Composition chimique de la Fonte Grise**

La fonte grise est principalement composée de Fer, de Carbone (entre 2,5% et 4,0%) et de Silicium (entre 1,0% et 3,0%). D'autres éléments peuvent être présents en petites quantités, tels que le manganèse, le soufre et le phosphore. Le carbone dans la Fonte Grise est présent principalement sous forme de graphite lamellaire, ce qui influence ses propriétés mécaniques et physiques.

✓ **Propriétés de la Fonte Grise**

a) **Propriétés Mécaniques**

- **Résistance à la traction** : La fonte grise a une résistance à la traction relativement basse par rapport aux autres fontes, généralement entre (150 et 400 MPa).
- **Dureté** : La dureté de la fonte Grise varie en fonction de sa composition et le traitement thermique subi, est généralement mesurée entre (150 et 300 HB) (dureté Brinell).
- **Module d'Elasticité** : Environ 100 GPa, ce qui est inférieur à celui de l'acier, donnant à la fonte grise une certaine flexibilité sous charge.

b) **Propriétés Physiques**

- **Densité**: La densité typique de la fonte grise est d'environ 7,1 g/cm³.
- **Conductivité Thermique** : La fonte grise a une bonne conductivité thermique, environ (36-55 W/m K), ce qui la rend appropriée pour des applications nécessitant une dissipation thermique.
- **Coefficient de Dilatation Thermique** : Environ (10 à 12 x 10⁻⁶ /°C), ce qui est relativement bas, réduisant les risques de déformation thermique.

- c) **Propriétés d'Usinabilité** : La fonte grise est connue pour sa bonne usinabilité, grâce à la présence de graphite lamellaire qui agit comme un lubrifiant naturel pendant l'usinage. Cela permet de réduire l'usure des outils et d'améliorer la qualité de la surface usinée.

✓ **Applications de la Fonte Grise****1. Industrie Automobile**

- **Blocs-Moteur** : Grâce à sa bonne conductivité thermique et à sa capacité d'absorption des vibrations.
- **Disques de Frein**: La fonte grise est couramment utilisée en raison de sa stabilité dimensionnelle et de sa résistance à l'usure.

2. Construction de Machines

- **Bâti de Machines-Outils** : La capacité de la fonte grise à absorber les vibrations améliore la précision des machines-outils.
- **Raccords et Tuyaux** : Utilisés dans les systèmes de plomberie et de drainage pour leur résistance à la corrosion et leur durabilité.

3. Industrie des Équipements Domestiques

- **Cuisinières et Fours**: En raison de sa capacité à répartir uniformément la chaleur.
- **Radiateurs**: La bonne conductivité thermique de la fonte grise en fait un matériau idéal pour les Radiateurs.

✓ **Avantages et Inconvénients de la Fonte Grise****a) Avantages**

- **Coût**: La Fonte Grise est relativement économique à produire.
- **Usinabilité**: Excellente usinabilité en raison de la présence de graphite.
- **Absorption des Vibrations**: Capacité à absorber les vibrations et les chocs, réduisant le bruit et augmentant la durée de vie des machines.

b) Inconvénients

- **Fragilité**: La fonte grise est plus fragile que les autres types de fonte, comme la fonte ductile.
- **Résistance à la traction**: Résistance à la traction inférieure à celle de l'acier et d'autres fontes.
- **Corrosion**: Moins résistante à la corrosion que certains autres matériaux, bien que des Traitements de surface puissent améliorer cette propriété.

La fonte grise est un matériau polyvalent et économique, largement utilisé dans diverses industries pour ses propriétés mécaniques et thermiques. La compréhension de ses caractéristiques physico-chimiques est essentielle pour optimiser son utilisation et garantir la performance des produits fabriqués.

I-3-2- La Fonte Blanche

La Fonte Blanche est un type de fonte caractérisée par l'absence de graphite libre, avec du carbone présent, principalement sous forme de carbures de fer (Fe_3C appelée cémentite). Cette microstructure lui confère une apparence blanche brillante à la rupture, d'où son nom. La fonte blanche est connue pour sa dureté élevée et sa résistance à l'usure, mais elle est également très fragile.

✓ Composition Chimique

La composition chimique de la fonte blanche est similaire à celle des autres fontes, avec une teneur en carbone généralement comprise entre (2,0 % et 3,5%) et une teneur en silicium entre 0,5% et 1,5%. Cependant, la solidification rapide et la faible teneur en silicium favorisent la formation de cémentite plutôt que de graphite

✓ Propriétés de la Fonte Blanche

1. Propriétés Mécaniques

- **Dureté:** La fonte blanche est très dure, avec une dureté Brinell typique entre (400 et 600 HB). Cette dureté élevée est due à la présence de cémentite, un composé très dur.
- **Résistance à l'Usure:** Excellente résistance à l'usure en raison de la dureté de la cémentite, ce qui en fait un matériau idéal pour les applications où l'abrasion est un facteur critique.
- **Fragilité:** La fonte blanche est très fragile, avec une Résistance à la Traction relativement faible (environ 150-300 MPa) et une quasi-absence de ductilité. Elle se casse sans déformation significative sous charge.

2. Propriétés Physiques

- **Densité:** La densité de la fonte blanche est d'environ ($7,6 \text{ g/cm}^3$), légèrement plus élevée que celle des autres types de fonte en raison de la teneur en cémentite.

- **Conductivité thermique:** La conductivité thermique est inférieure à celle de la fonte grise, environ (20-40 W/m ·K), en raison de la structure dense et de la cémentite.
- **Coefficient de dilatation thermique:** Relativement faible, environ (10×10^{-6} /°C), ce qui réduit les risques de déformation thermique.

✓ **Méthodes de Production**

La fonte blanche est souvent produite par solidification rapide de la fonte liquide, qui empêche la formation de graphite et favorise la formation de cémentite. Les méthodes de refroidissement contrôlé ou le traitement thermique peuvent également être utilisés pour transformer la fonte grise en fonte blanche.

✓ **Applications de la Fonte Blanche**

1. Industrie Minière et Extraction

- **Broyeurs et Concasseurs:** Utilisée pour les pièces de machines soumises à des conditions d'abrasion sévère, telles que les mâchoires de concasseur et les doublures de broyeur.
- **Tuyaux et Équipements de Forage:** Employée pour sa résistance à l'usure et sa capacité à résister aux environnements abrasifs

2. Industrie de la Fabrication de Ciment

- **Broyeurs à Boulets:** Les doublures et les billes de broyage en fonte blanche sont couramment utilisées en raison de leur durabilité et de leur résistance à l'usure.
- **Vis d'Archimède et Pièces d'Usure:** Utilisées dans les équipements de manutention de matériaux abrasifs.

3. Industrie de la Transformation

- **Moules de Fonderie:** Utilisés pour leur capacité à résister aux hautes températures et à l'usure, tout en maintenant une bonne précision dimensionnelle.
- **Cylindres de Laminoir:** Les cylindres en fonte blanche sont utilisés dans les laminoirs pour leur résistance à l'usure et à la déformation.

✓ Avantages et Inconvénients de la Fonte Blanche

1. Avantages

- **Haute Dureté et Résistance à l'Usure:** Idéale pour les applications nécessitant une Résistance à l'Abrasion.
- **Stabilité Dimensionnelle:** Conserve ses dimensions sous des charges et des Températures élevées.
- **Résistance à la Corrosion:** Relativement bonne en raison de la structure dense.

2. Inconvénients

- **Fragilité:** Très fragile, ce qui limite son utilisation dans des Applications où des chocs ou des charges dynamiques sont présents.
- **Usinabilité:** Difficile à usiner en raison de sa dureté élevée, nécessitant des outils de coupe spéciaux.
- **Coût de Production:** Peut-être plus coûteuse à produire en raison des méthodes de solidification rapide et des traitements thermiques nécessaires.

La Fonte Blanche est un matériau spécialisé utilisé dans des applications où la résistance à l'usure et la dureté sont essentielles. Sa fragilité limite cependant son utilisation à des situations où les charges dynamiques et les chocs sont minimaux. La compréhension de ses propriétés physico-chimiques et des méthodes de production permet d'optimiser son utilisation dans divers secteurs industriels

I-3-3- La Fonte ductile (ou Nodulaire)

La fonte ductile, également connue sous le nom de fonte nodulaire ou fonte à graphite Sphéroïdal, est un type de fonte innovante qui se distingue par ses propriétés mécaniques améliorées grâce à la présence de graphite en forme sphérique plutôt qu'en lamelles. Cette microstructure unique confère à la fonte ductile une combinaison exceptionnelle de ductilité, de résistance et de ténacité, la rendant adaptée à une large gamme d'applications industrielles. Elle peut-être classée en plusieurs grades, en fonction de ses propriétés mécaniques spécifiques et de sa microstructure. Les principaux types sont :

1. **Fonte Ductile Ferritique:** Caractérisée par une matrice ferritique, offrant une bonneductilité et ténacité, avec une Résistance à la Traction modérée.

2. **Fonte Ductile Perlitique:** Contient une matrice perlitique, offrant une Résistance à la Traction et une dureté plus élevées, mais avec une ductilité légèrement réduite.
3. **Fonte Ductile Ferrito-Perlitique:** Composée d'une matrice mixte de ferrite et de perlite, équilibrant résistance et ductilité.

✓ **Composition chimique de la Fonte ductile**

La composition chimique de la fonte ductile est similaire à celle des autres fontes, avec une teneur en carbone généralement comprise entre (3,0% et 4,0%) et une teneur en Silicium entre (2,0% et 3,0%). Les éléments de traitement comme le magnésium ou le cérium sont ajoutés pour modifier la structure du graphite, favorisant la formation de nodules sphériques plutôt que de lamelles.

✓ **Propriétés de la Fonte ductile**

1. Propriétés Mécaniques

- **Résistance à la Traction:** La fonte ductile présente une résistance à la traction élevée, généralement comprise entre (400 et 800 MPa), comparable à celle de certains aciers.
- **Allongement à la Rupture:** L'allongement à la rupture peut varier de (3% à 18%), indiquant une bonne ductilité et capacité à déformation plastique avant la rupture.
- **Dureté:** La dureté de la Fonte ductile est généralement comprise entre (150 et 300 HB) (dureté Brinell), en fonction de sa composition et de son traitement thermique.

2. Propriétés Physiques

- **Densité:** La densité typique de la fonte ductile est d'environ (7,1 g/cm³).
- **Conductivité Thermique:** La conductivité thermique est légèrement inférieure à celle de la Fonte Grise, environ (30 à 50 W/m· K).
- **Coefficient de Dilatation Thermique:** Environ (11 x 10⁻⁶ /°C), similaire à celle de la fonte grise, réduisant les risques de déformation thermique.

3. Propriétés de Fatigue et de Résilience

- **Résistance à la Fatigue:** La structure sphéroïdale du graphite améliore la Résistance à la Fatigue par rapport à la Fonte Grise, ce qui en fait un matériau de choix pour des composants soumis à des charges cycliques.

- **Résilience:** La Fonte ductile présente une résilience élevée, la rendant capable d'absorber les chocs et les vibrations sans se fissurer.

✓ Applications de la Fonte Ductile

1. Industrie Automobile

- **Paliers et Arbres de Transmission:** Utilisés pour leur haute résistance et capacité à absorber les chocs.
- **Carter de Moteur et Boîtes de Vitesse:** Grâce à leur combinaison de Résistance, ductilité et capacité de dissipation thermique.

2. Infrastructure

- **Tuyaux et Raccords:** Utilisés dans les systèmes d'eau potable et d'égouts pour leur durabilité, résistance à la corrosion et facilité d'installation.
- **Couvercles de Regard et Grilles:** Leur résistance mécanique et leur capacité à supporter des charges lourdes en font des choix idéaux pour les infrastructures routières.

3. Machinerie lourde

- **Composants de Machines-Outils:** Utilisés pour leur capacité à absorber les vibrations, améliorant la précision des machines.
- **Équipements Miniers:** Pour leur résistance à l'usure et capacité à résister aux conditions abrasives.

✓ Avantages et inconvénients de la Fonte ductile

1. Avantages

- **Ductilité et Résistance:** Combine une haute résistance à la traction avec une bonne ductilité, permettant des conceptions plus flexibles et résistantes.
- **Résistance à la Fatigue et Résilience:** Excellente résistance à la fatigue et capacité à absorber les chocs, ce qui prolonge la durée de vie des composants.
- **Usinabilité:** Bien que plus difficile à usiner que la Fonte Grise, la Fonte ductile est toujours plus usinable que de nombreux aciers, avec des performances d'usinage améliorées par rapport à d'autres Fontes dures.

2. Inconvénients

- **Coût:** La production de fonte ductile peut -être plus coûteuse que celle de la Fonte Grise, en raison des éléments d'alliage supplémentaires et des contrôles de processus plus stricts nécessaires pour garantir la formation correcte des nodules.
- **Sensibilité aux Traitements Thermiques:** Les propriétés de la Fonte ductile peuvent être sensibles aux variations des conditions de Traitement Thermique, nécessitant des contrôles rigoureux pour maintenir les propriétés désirées.

La fonte ductile est un matériau polyvalent et performant, combinant les avantages de la résistance à la traction et de la ductilité, ce qui la rend adaptée à une large gamme d'applications industrielles. La compréhension de ses propriétés physico-chimiques et des méthodes de production permet d'optimiser son utilisation pour répondre aux exigences spécifiques des différentes industries.

I-3-4- La Fonte malléable

La fonte malléable est un type de fonte traitée thermiquement pour améliorer sa ductilité et sa ténacité. Contrairement à la fonte grise et à la fonte blanche, la fonte malléable est conçue pour être malléable, ce qui signifie qu'elle peut être déformée plastiquement sans se casser. Ce matériau est largement utilisé dans des applications nécessitant une bonne résistance à la traction et une certaine capacité de déformation. Elle est classée en deux (02) types principaux en fonction de sa structure métallurgique :

1. **Fonte Malléable à Cœur Noir :** Contient une matrice ferritique ou ferrito-perlitique avec des nodules de graphite, offrant une bonne ductilité et ténacité.
2. **Fonte Malléable à Cœur Blanc :** Contient une matrice principalement perlitique, offrant une Résistance Mécanique plus élevée, mais avec une ductilité légèrement réduite.

✓ **Composition chimique de la Fonte malléable**

La composition chimique de la fonte malléable est similaire à celle des autres fontes, avec une teneur en carbone généralement comprise entre (2,2% et 2,8%) et une teneur en Silicium entre (0,9% et 1,9%). Des éléments comme le manganèse, le soufre et le phosphore peuvent également être présents en petites quantités.

✓ Traitement Thermique

La Fonte malléable est produite à partir de fonte blanche par un traitement Thermique en plusieurs étapes, appelé recuit, qui transforme la structure du matériau :

1. **Recuit de Graphitisation** : La fonte blanche est chauffée à une température élevée (environ 900 à 950°C) pendant une période prolongée pour décomposer la cémentite en graphite nodulaire et en ferrite.
2. **Refroidissement Lent** : La pièce est ensuite refroidie lentement pour permettre la formation de graphite nodulaire sphéroïdal, ce qui améliore la ductilité et la ténacité.

✓ Propriétés de la Fonte malléable**1. Propriétés Mécaniques**

- **Résistance à la Traction**: La fonte malléable a une résistance à la traction typiquement comprise entre (350 et 550 MPa).
- **Allongement à la Rupture**: L'allongement à la rupture est généralement compris entre (5% et 12%,) indiquant une bonne capacité de déformation plastique.
- **Dureté**: La dureté de la fonte malléable varie entre (130 et 180 HB) (dureté Brinell), en fonction de sa composition et de son Traitement Thermique.

2. Propriétés Physiques

- **Densité**: La densité typique de la fonte malléable est d'environ (7,2 g/cm³).
- **Conductivité Thermique**: La conductivité thermique est de l'ordre de (35 à 45W/m· K).
- **Coefficient de Dilatation Thermique**: Environ (11 x 10⁻⁶ /°C), similaire à celle des autres fontes.

3. Propriétés de Résilience

- **Résilience**: La fonte malléable présente une bonne résilience, ce qui lui permet d'absorber les chocs sans se fissurer.

✓ Applications de la Fonte malléable**1. Industrie Automobile**

- **Composants de Suspension:** Utilisés pour leur combinaison de résistance et ductilité, capables de supporter des charges dynamiques et des chocs.
- **Systèmes de Freinage:** Certaines pièces de frein sont fabriquées en fonte malléable pour leur capacité à résister à des contraintes mécaniques élevées.

2. Infrastructures

- **Raccords de Tuyauterie:** Utilisés dans les systèmes de plomberie et de gaz en raison de leur résistance et de leur capacité à être fileté et soudé.
- **Ferrures de Construction:** Employées dans les structures de bâtiment pour leur capacité à supporter des charges lourdes et à résister à la corrosion.

3. Machinerie et Outillage

- **Engrenages et Pignons:** Fabriqués en fonte malléable pour leur résistance à l'usure et leur capacité à supporter des contraintes cycliques.
- **Outils Agricoles:** Utilisés pour leur durabilité et leur capacité à résister aux conditions de travail difficiles.

✓ Avantages et inconvénients de la fonte malléable**1. Avantages**

- **Ductilité et Résilience:** Offre une bonne ductilité et résilience, permettant une déformation plastique sans rupture.
- **Résistance à la Fatigue:** Bonne résistance à la fatigue grâce à la structure nodulaire du graphite.
- **Usinabilité:** Relativement facile à usiner par rapport à d'autres fontes, permettant des fabrications précises.

2. Inconvénients

- **Coût de Production:** Le Traitement Thermique nécessaire pour produire la fonte malléable peut augmenter les coûts de production par rapport à la fonte grise.

- **Sensibilité aux Impuretés:** La présence d'impuretés comme le soufre et le phosphore peut affecter négativement les propriétés mécaniques et la qualité du produit final.
- **Limites de Taille:** Les pièces de grande taille peuvent présenter des difficultés lors du Traitement Thermique, limitant l'utilisation de la fonte malléable pour des composants de taille modérée.

La fonte malléable est un matériau polyvalent et performant, offrant une combinaison unique de résistance, ductilité et résilience. Son traitement thermique spécifique permet de transformer la fonte blanche en un matériau aux propriétés mécaniques améliorées, adapté à de nombreuses applications industrielles. La compréhension de ses propriétés physico- chimiques et des méthodes de production permet d'optimiser son utilisation dans divers secteurs.

I-3-5- la Fonte Alliée

La fonte alliée est une catégorie de fontes enrichie avec divers éléments d'alliage pour améliorer certaines propriétés telles que la résistance à la corrosion, la dureté, la résistance à l'usure et la stabilité à haute température. Les éléments d'alliage couramment ajoutés incluent le nickel, le chrome, le molybdène, le cuivre et le vanadium. Elle contient généralement :

- **Carbone** : 2-4 %
- **Silicium** : 1-3 %
- **Éléments d'alliage** : Les quantités et types varient en fonction des propriétés souhaitées. Par exemple :
 - **Nickel** : Améliore la dureté et la résistance à la corrosion.
 - **Chrome** : Augmente la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion.
 - **Molybdène** : Améliore la résistance à haute température et la résistance à la corrosion.
 - **Cuivre** : Améliore la résistance à la corrosion et la ductilité.

Les fontes alliées peuvent être classées en plusieurs types, en fonction de ses propriétés et de sa microstructure. Les principaux types sont :

1. **Fonte à haute teneur en chrome** : Utilisée pour ses excellentes propriétés de résistance à l'usure et à la corrosion. Les applications typiques incluent les revêtements de broyeurs et les tuyaux de transport de matières abrasives.
2. **Fonte à haute teneur en nickel** : Offre une résistance améliorée à la corrosion et une bonne ténacité à basse température. Utilisée dans les applications marines et les environnements corrosifs.
3. **Fonte au molybdène** : Conçue pour les environnements à haute température, elle est utilisée dans les chaudières et les pièces de four.
4. **Fonte au cuivre** : Utilisée pour améliorer la résistance à la corrosion et la ductilité. Employée dans les tuyaux et les raccords pour les systèmes de distribution d'eau.

✓ Propriétés de la Fonte Alliée

Les propriétés spécifiques des fontes alliées dépendent des éléments d'alliage ajoutés et de leurs concentrations. Les caractéristiques générales incluent :

- **Résistance à la corrosion** : Significativement améliorée par l'ajout de chrome, nickel, et cuivre.
- **Dureté et résistance à l'usure** : Améliorées avec l'ajout de chrome et de molybdène.
- **Stabilité à haute température** : Augmentée par le molybdène et le chrome, rendant ces fontes idéales pour les applications à haute température.
- **Ductilité et ténacité** : Souvent améliorées par le nickel et le cuivre, bien que cela dépende de la composition exacte.

✓ Applications de la Fonte Alliée

Les fontes alliées sont utilisées dans diverses industries et applications en raison de leurs propriétés améliorées :

- **Industrie minière** : Utilisation dans les équipements de broyage et de transport de matériaux abrasifs.
- **Industrie pétrolière et gazière** : Composants de tuyauterie et de pompes résistants à la corrosion.
- **Industrie maritime** : Hélices, vannes et autres composants exposés à l'eau de mer.
- **Industrie de la construction** : Tuyaux, raccords et composants structurels soumis à des conditions corrosives.

Le Tableau 1, ci dessous, regroupe une comparaison entre des propriétés des différentes fontes :

Tableau 1: Comparaison des propriétés des différentes fontes

Propriété	Fonte Grise	Fonte Blanche	Fonte Ductile	Fonte Malléable	Fonte Alliée
Ductilité	Faible	Très faible	Élevée	Bonne	Variable
Résistance à la Traction	Moyenne	Moyenne	Élevée	Moyenne à élevée	Variable
Résistance à l'usure	Moyenne	Très élevée	Moyenne à élevée	Moyenne	Améliorée
Usinabilité	Excellente	Faible	Bonne	Moyenne	Variable
Capacité d'amortissement	Excellente	Faible	Bonne	Bonne	Variable
Résistance aux chocs	Faible	Faible	Bonne	Excellente	Variable
Résistance à la corrosion	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Améliorée
Stabilité à haute température	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Bonne

II- Le moulage des carcasses

Le moulage des carcasses est une technique essentielle dans de nombreux secteurs industriels et artistiques. Il permet de reproduire des objets avec précision en utilisant divers matériaux et méthodes de moulage.

II- 1- Processus de moulage

Le moulage des carcasses implique la création de pièces moulées en métal, souvent utilisées dans les machines et les structures industrielles. Les étapes typiques incluent :

1. **Conception du modèle** : Création d'un modèle de la pièce à mouler.
2. **Fabrication du moule** : Utilisation de sable, de céramique ou de métal pour créer le moule.
3. **Fusion du métal** : Fonte du métal pour obtenir une matière liquide.

4. **Coulée** : Verser le métal liquide dans le moule.
5. **Solidification** : Laisser le métal se solidifier dans le moule.
6. **Démoulage** : Extraction de la pièce moulée du moule.
7. **Finition** : Usinage, polissage et autres traitements pour obtenir les dimensions et les propriétés finales.

II- 2- Techniques de moulage

1. **Moulage au Sable** : Est couramment utilisé dans la fonderie pour la production de pièces métalliques. Le sable, mélangé à un liant, est compacté autour d'un modèle pour créer une empreinte. Le métal en fusion est ensuite coulé dans cette empreinte pour former la pièce.
2. **Moulage par Injection** : Utilisé principalement pour les plastiques, le moulage par injection consiste à injecter du matériau fondu dans un moule sous haute pression. Ce processus est rapide et permet la production en série de pièces complexes avec une grande précision.
3. **Moulage par Coulée** : Cette technique implique de verser un matériau liquide, comme du plâtre, de la résine ou du métal, dans un moule. Une fois le matériau solidifié, le moule est retiré pour révéler la pièce moulée. C'est une méthode courante pour la création de sculptures et de prototypes.
4. **Moulage sous Vide** : Est utilisé pour créer des pièces en plastique légères. Un film plastique est chauffé jusqu'à devenir souple, puis étiré sur un moule tout en appliquant un vide pour qu'il épouse les contours du moule. Cette méthode est souvent utilisée pour les emballages et les pièces automobiles.

II- 3- Matériaux Utilisés

1. **Métaux**: Les métaux comme l'aluminium, le bronze et l'acier sont couramment utilisés dans le moulage des carcasses pour leur durabilité et leurs propriétés mécaniques. Les pièces moulées en métal sont souvent utilisées dans l'industrie automobile, l'aérospatiale et la construction.
2. **Plastiques** : Les plastiques comme le polyéthylène, le polypropylène et le polyuréthane sont populaires pour le moulage par injection et le moulage sous vide.

Ils offrent une grande flexibilité de conception et sont économiques pour la production en série.

3. **Plâtres et Résines** : Utilisés principalement dans les arts et l'artisanat, les plâtres et résines permettent de réaliser des détails fins et des finitions de haute qualité. Ces matériaux sont également utilisés pour les prototypes et les pièces de théâtre.

II- 4- Applications

1. **Industrie Automobile** : Le moulage des carcasses est essentiel dans la production de pièces automobiles, comme les châssis, les moteurs et les composants intérieurs. Les techniques de moulage garantissent des pièces précises et durables.
2. **Aérospatiale** : Dans l'industrie aérosapatale, le moulage des carcasses est utilisé pour fabriquer des composants légers et résistants, comme les pales de turbine et les structures de fuselage.
3. **Art et Sculpture** : Les artistes utilisent le moulage pour créer des sculptures détaillées et des répliques. Les moules permettent de reproduire fidèlement des formes complexes et de travailler avec une variété de matériaux.
4. **Prototypage** : Le moulage est une étape clé dans le prototypage rapide, permettant de tester et de peaufiner des conceptions avant la production en série. Les prototypes moulés peuvent être réalisés rapidement et à moindre coût.

Le moulage est une technique polyvalente et indispensable dans de nombreux secteurs. Que ce soit pour la production industrielle ou la création artistique, le moulage permet de reproduire des formes complexes avec précision et efficacité. Grâce aux avancées technologiques, les méthodes de moulage continuent d'évoluer, offrant de nouvelles possibilités pour les concepteurs et les fabricants.

III- La Corrosion et la Corrosion de la Fonte

La corrosion est un processus naturel qui dégrade les matériaux métalliques en raison de réactions chimiques avec leur environnement. La fonte, un alliage de fer et de carbone, est particulièrement sujette à la corrosion, ce qui peut affecter sa durabilité et ses performances. Dans ce chapitre, on va essayer de définir les mécanismes de la corrosion, les types de corrosion affectant la fonte et les méthodes de prévention.

III- 1- Mécanismes de la Corrosion

La corrosion se produit principalement à travers des réactions électrochimiques entre le métal et les agents corrosifs présents dans l'environnement, tels que l'oxygène, l'eau, les acides et les sels. Le processus de corrosion comprend généralement deux (02) réactions simultanées :

1. **Réaction Anodique** : Le métal se dissout en libérant des ions métalliques et des électrons. Par exemple : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (1)

2. **Réaction Cathodique** : Les électrons libérés par la réaction anodique sont consommés par un agent oxydant, comme l'oxygène dissous dans l'eau :



Ces réactions créent une cellule galvanique, conduisant à la formation de rouille (oxyde de ferhydraté) sur la surface du métal [4].

III- 2- Types de Corrosion Affectant la Fonte [4,5].

1. **Corrosion Uniforme** : La corrosion uniforme se caractérise par une attaque homogène de la surface de la fonte. Elle se produit lorsque la totalité de la surface métallique est exposée à des conditions corrosives uniformes, entraînant une perte de matériau régulière [2].

2. **Corrosion Localisée** : La corrosion localisée inclut des formes telles que la piqûration, la corrosion par crevasses et la corrosion intergranulaire :

- **Corrosion par Piqûre** : Formation de petites cavités ou "piqûres" sur la surface métallique.
- **Corrosion par Crevasses** : Se produit dans les zones étroites et confinées où l'accès des agents corrosifs est limité.
- **Corrosion Intergranulaire** : Affecte les limites des grains dans les alliages métalliques, souvent en raison de la ségrégation d'impuretés ou de la formation de phases secondaires.

3. **Corrosion Galvanique** : La corrosion galvanique se produit lorsque deux métaux dissimilaires sont en contact électrique dans un électrolyte. Le métal le moins noble (anode) se corrode plus rapidement que le métal noble (cathode) [4].

4. **Corrosion sous Tension** : La corrosion sous tension résulte de la combinaison d'un environnement corrosif et de contraintes mécaniques. Cela peut provoquer des

fissures dans la fonte, compromettant sa résistance structurelle

III- 3- Prévention de la Corrosion [5].

1. **Revêtements Protecteurs:** L'application de revêtements tels que les peintures, les enduits époxy et les galvanisations protège la surface de la fonte contre l'exposition aux agents corrosifs
2. **Inhibiteurs de Corrosion:** Les inhibiteurs de corrosion sont des substances chimiques ajoutées à l'environnement corrosif pour réduire la vitesse de corrosion. Ils agissent en formant une couche protectrice sur la surface métallique ou en neutralisant les agents corrosifs .
3. **Conception et Matériaux:** L'utilisation de matériaux résistants à la corrosion et la conception appropriée des structures métalliques (par exemple, en évitant les crevasses et les zones de rétention d'humidité) peuvent minimiser les risques de corrosion.
4. **Contrôle Cathodique:** Le contrôle cathodique est une technique de protection où un courant électrique est appliqué pour rendre la surface métallique cathodique, empêchant ainsi la réaction anodique de dissolution du métal .

La corrosion de la fonte est un problème significatif dans de nombreux secteurs industriels. Comprendre les mécanismes et les types de corrosion, ainsi que les méthodes de prévention, est essentiel pour prolonger la durée de vie des structures en fonte et garantir leur performance. Des mesures adéquates de protection contre la corrosion peuvent réduire les coûts de maintenance et améliorer la sécurité et la fiabilité des infrastructures métalliques.

Chapitre II

Les Principes des Méthodes de Caractérisations utilisées pour la Fonte GG15

Introduction

La caractérisation des matériaux est un ensemble de techniques utilisées pour interpréter les résultats obtenus après analyse des différentes propriétés physiques, chimiques et mécaniques des matériaux exigée par la norme. Ces méthodes permettent de déterminer la composition, la structure, les propriétés mécaniques, thermiques et électriques, entre autres, des matériaux. Ces techniques sont essentielles pour la recherche et le développement de nouveaux matériaux, ainsi que pour le contrôle de la qualité dans la production industrielle.

I- Diagramme d'équilibre Fer-Carbone [6-9 ,11]

Egalement appelé diagramme de phase Fer-Carbone, est un graphique qui représente les différentes phases d'un matériau en fonction de certaines variables, comme la température, la pression et la composition chimique. est cruciale en métallurgie car il décrit les phases des alliages de fer et de carbone (comme l'acier et la fonte) en fonction de la composition en carbone et de la température. Ce diagramme est une introduction à la caractérisation des matériaux pour comprendre le comportement des matériaux sous différentes conditions et sont largement utilisés dans la science des matériaux, la métallurgie, et d'autres domaines.

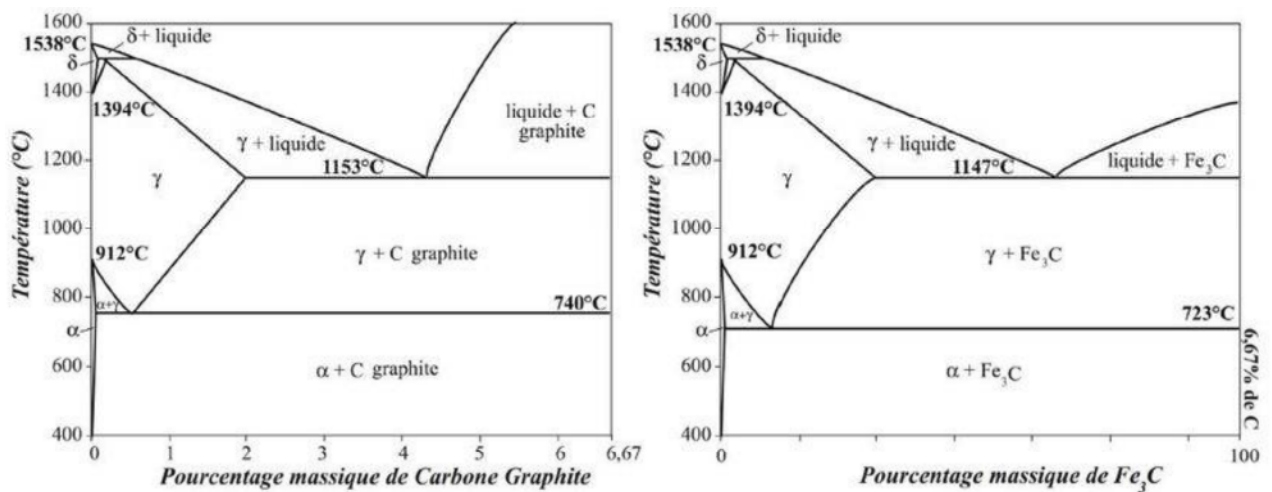


Figure 2 : Diagrammes d'équilibre binaire Fer-Carbone stable et Fer-cémentite Fe_3C

Fer-Carbone métastable

I-1- Représentation du diagramme

I-1-1- Axes du Diagramme

- **Axe horizontal (x):** Composition en carbone (% de C en poids, allant de 0 à 6,67%)
- **Axe vertical (y):** Température (°C, allant de la température ambiante à environ 1600°C)

I-1-2- Principales phases

a. Ferrite (α)

- Phase stable à basse température jusqu'à 912 °C.
- Structure cristalline cubique centrée (CC).
- Très faible solubilité du carbone (jusqu'à 0,022 % à 727 °C).

b. Austénite (γ)

- Phase stable entre 727 °C et 1394 °C.
- Structure cristalline cubique à faces centrées (CFC).
- Solubilité maximale du carbone de 2,1 % à 1147 °C.

c. Cémentite (Fe_3C)

- Composé intermétallique de fer et de carbone.
- Très dur et fragile, contenant 6,67 % de carbone.

d. Liquéfaction (Liquide)

- Phase liquide au-dessus de la température de fusion de l'alliage.

e. Lédéburite

- Mélange eutectique de cémentite et de ferrite, formé à 1147 °C pour une teneur en carbone de 4,3 %.

f. Perlite

- Mélange eutectoïde de ferrite et de cémentite, formé à 727 °C pour une teneur en carbone de 0,8 %.

g. Bainite

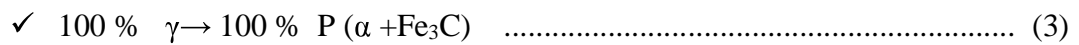
- Structure formée à des températures intermédiaires, constituée de ferrite et de cémentite.

h. Martensite

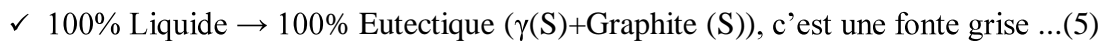
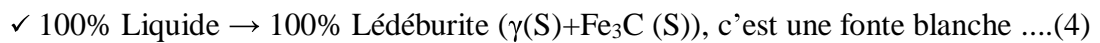
- Phase dure et fragile formée par trempe rapide de l'austénite.
- Structure cristalline tétragonale.

I-1-3- Points et Réactions Clés

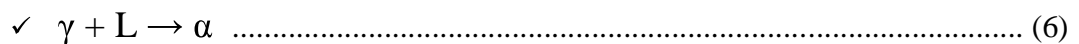
1. **Point Eutectoïde (0,76 % C, 727 °C) :** À environ 0,76 % de carbone et 727 °C, où l'austénite se transforme en perlite lors du refroidissement. (ferrite + cémentite).



2. **Point Eutectique (4,3 % C, 1147 °C) :** À environ 4,3 % de carbone et 1147 °C, où le liquide se transforme en austénite et en cémentite. (ferrite + cémentite).



3. **Point Péritectoïde (0,16 % C, 1394 °C) :** À environ 0.16 % de carbone et 1394 °C, où L'austénite se transforme en ferrite.

**4. Solidus et Liquidus****a- Ligne de Liquidus**

- **Composition en Carbone :** La ligne de liquidus commence à 0 % de carbone (fer pur) s'étend jusqu'à 6,67 % de carbone (fer, Fe₃C), et s'étend jusqu'à environ 100 % de carbone (fer, Graphite).
- **Température :** Elle varie de 1538 °C pour le fer pur à environ 1147 °C pour le point eutectique, et continue de descendre jusqu'à la température de fusion de Fe₃C.

b- Ligne de Solidus

- **Composition en Carbone :** La ligne de solidus commence également à 0 % de carbone (fer pur) et s'étend jusqu'à environ 6,67 % de carbone (Fe₃C).
- **Température :** La température varie de 1538 °C pour le fer pur et descend jusqu'à environ 727 °C au point eutectoïde, puis continue de descendre jusqu'à la température de fusion de Fe₃C.

I-2- Utilisations Pratiques

- **Traitement thermique des aciers :** Pour obtenir des propriétés mécaniques désirées, comme la dureté, la résistance et la ductilité.
- **Conception d'alliages :** Pour déterminer les proportions optimales de fer et de carbone pour des applications spécifiques.
- **Analyse de la microstructure :** Pour comprendre et prédire les transformations de phase et les propriétés des matériaux.

•

II- Caractérisation Physico-Chimique des Fontes

La caractérisation physico-chimique des matériaux consiste à étudier leurs propriétés physiques et chimiques afin de mieux comprendre leur comportement, leur structure, et leur composition.

II-1- Caractérisation physique des fontes

La caractérisation physique des fontes implique l'évaluation de leurs propriétés physiques, qui sont essentielles pour comprendre leur comportement en service et leur adéquation pour diverses applications. Les propriétés physiques des fontes dépendent de leur composition chimique, de leur microstructure et des traitements thermiques qu'elles ont subis. Voici un aperçu des principales propriétés physiques des fontes et des méthodes de caractérisation :

1. Mesure de la densité

- **Méthode de l'Immersion** : Un échantillon est pesé dans l'air et dans l'eau, et la densité est calculée en utilisant la différence de poids et le principe d'Archimède.
- **Pycnomètre** : Utilisation d'un pycnomètre pour mesurer la densité des poudres et des liquides.

Elle est définie mathématiquement par la relation suivante :

$$D = \frac{\rho_{\text{Substance}}}{\rho_{\text{reference}}} \dots\dots\dots (7)$$

Où :

- $\rho_{\text{substance}}$: La masse volumique du corps considéré .
- $\rho_{\text{référence}}$: La masse volumique du corps de référence .

2. Mesure de la conductivité thermique

- **Méthode du Fil Chaud** : Un fil chauffant est inséré dans le matériau, et la conductivité thermique est calculée à partir de la dissipation de la chaleur.
- **Méthode du Flash Laser** : Un laser pulse chauffe un échantillon, et la réponse thermique est mesurée pour déterminer la conductivité thermique.

Elle est définie mathématiquement par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{Q.d}{A.t.\Delta T} \dots\dots\dots (8)$$

Où :

- **Conductivité thermique (λ)** : Watts par mètre-kelvin (W/m·K).
- **Quantité de chaleur (Q)** : Joules (J) ou Watts (W).
- **Surface (A)** : Mètres carrés (m²).
- **Épaisseur (d)** : Mètres (m).
- **Temps (t)** : Secondes (s).
- **Différence de température (ΔT)** : Kelvin (K) ou degrés Celsius (°C).

3. Mesure de la capacité calorifique

- **Calorimétrie différentielle à Balayage (DSC)** : Mesure de la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un échantillon par rapport à un matériau de référence. Elle est définie mathématiquement par la relation suivante :

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \dots\dots\dots (9).$$

Où :

- **Q** : Quantité de chaleur fournie, en Joules (J).
- **ΔT** : Variation de température, en degrés Celsius (°C) ou Kelvin (K).

- **Capacité calorifique spécifique**

$$C = \frac{c}{m} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \dots\dots\dots (10).$$

Où :

- **m** : Masse de la substance, en kilogrammes (kg).
- **c** : Capacité calorifique spécifique, en joules par kilogramme-kelvin (J/kg· K).

4. Mesure du Coefficient de Dilatation Thermique

- **Dilatométrie** : Mesure des variations dimensionnelles d'un échantillon en fonction de la température. Elle est définie mathématiquement par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T} \dots\dots\dots (11).$$

Où :

- **ΔL** : Variation de longueur, en mètres (m).
- **L** : Longueur initiale, en mètres (m).
- **ΔT** : Variation de température, en degrés Celsius (°C) ou Kelvin (K).
- **α** : Coefficient de dilatation linéaire, en m/(K ou °C)

5. Mesure de la Conductivité Électrique

- **Quatre Points de Sonde** : Technique où quatre sondes sont placées sur un matériau, et la résistivité électrique est mesurée en appliquant un courant et en mesurant la tension.

Elle est définie mathématiquement par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \dots\dots\dots (12).$$

Où :

- σ : Conductivité électrique, en siemens par mètre (S/m).
- ρ : Résistivité électrique du matériau, en ohm-mètre (Ω/m).

Dont la résistivité (ρ) elle-même est donnée par la formule :

$$\rho = \frac{R.A}{L} \dots\dots\dots (13).$$

Où :

- R : Résistance électrique du matériau, en ohms (Ω).
- A : Section transversale du matériau, en mètres carrés (m^2).
- L : Longueur du matériau, en mètres (m).

6. Mesure des Propriétés Magnétiques

- **Magnétomètre** : Mesure des propriétés magnétiques, telles que la susceptibilité magnétique et l'aimantation qui mesure la façon dont un matériau devient magnétisé en réponse à un champ magnétique appliqué. Elle est donnée par :

$$\chi = \frac{M}{H} \dots\dots\dots (14).$$

- M : Aimantation du matériau, en ampères par mètre (A/m).
- H : Champ magnétique, en ampères par mètre (A/m).

Ou par la Perméabilité magnétique qui indique la capacité d'un matériau à soutenir la formation d'un champ magnétique en son sein. Elle est définie par la relation :

$$\mu = \frac{H}{B} \dots\dots\dots (15).$$

- B : Induction magnétique ou densité de flux magnétique, en teslas (T).
- H : Champ magnétique, en ampères par mètre (A/m).
- μ : Perméabilité magnétique, en Henry par mètre (H/m).

La caractérisation physique des fontes est cruciale pour déterminer leur adéquation pour diverses applications. La compréhension des propriétés physiques telles que la densité, la conductivité thermique, la capacité calorifique, le coefficient de dilatation thermique, la conductivité électrique et les propriétés magnétiques permet de sélectionner les matériaux appropriés et de concevoir des composants optimisés pour des performances spécifiques. Les méthodes de caractérisation décrites ci-dessus fournissent des informations essentielles pour le développement, l'optimisation et l'utilisation des fontes dans divers domaines industriels [4,5].

II-2- Caractérisation chimique des Fontes [4,5].

La caractérisation chimique des fontes est cruciale pour comprendre leur composition, leurs propriétés et leur comportement dans différentes applications. Les fontes sont des alliages de fer avec une teneur en carbone généralement comprise entre (2 % et 4 %). Elles contiennent également d'autres éléments d'alliage qui influencent leurs propriétés mécaniques et physiques. Voici un aperçu sur les méthodes de caractérisation chimique des fontes :

II-2-1- Principaux éléments de composition des Fontes

- a. **Carbone (C)** : Influence la dureté et la résistance à l'usure. Le carbone peut se présenter sous forme de graphite ou de carbure de fer (cémentite).
- b. **Silicium (Si)** : Améliore la fluidité et la solidification des fontes. Favorise la formation de graphite.
- c. **Manganèse (Mn)** : Améliore la trempabilité et la résistance à l'usure.
- d. **Soufre (S)** : Généralement indésirable car il peut former des inclusions fragilisantes (sulfures).
- e. **Phosphore (P)** : Peut améliorer la fluidité, mais en excès, il peut rendre la fonte cassante.
- f. **Autres éléments d'alliage (Cr, Ni, Mo,... etc.)** : Utilisés pour conférer des propriétés spécifiques telles que la résistance à la corrosion et à l'usure.

II-2-2- Méthodes de Caractérisation Chimique [12,13]

1. Spectrométrie de Fluorescence des Rayons X (XRF)

La spectrométrie XRF est utilisée dans de nombreuses applications, notamment l'analyse des matériaux, la géologie, la métallurgie, l'environnement, et même l'art et

l'archéologie, en raison de sa capacité à fournir des analyses rapides, précises, et non destructives des compositions élémentaires.

- **Principe** : Mesure des rayons X fluorescents émis par un échantillon lorsqu'il est excité par une source de rayons X.

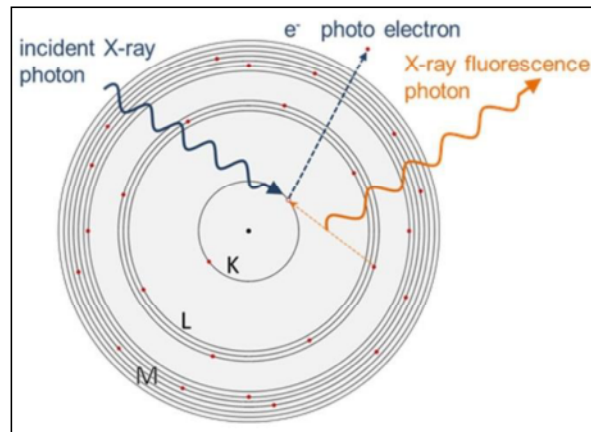


Figure 3 : Principe de fonctionnement de XRF. [12,13]

- **Applications** : Analyse quantitative des éléments majeurs et mineurs dans les fontes. on utilise généralement des courbes d'étalonnage. Celles-ci sont établies en mesurant des échantillons standards avec des concentrations connues d'éléments. Les intensités mesurées sont ensuite comparées à celles des échantillons inconnus pour déterminer leurs concentrations. pour cet analyse, on donne le formule suivante :

$$C_i = \frac{I_i}{K \left(\frac{\mu_i}{\rho} (1 - e^{-\mu_i t}) \right)} \dots\dots\dots (16)$$

2. Spectrométrie d'Émission Atomique avec Plasma à Couplage Inductif (ICP-AES)

La spectrométrie d'émission atomique avec plasma à couplage inductif (ICP-AES, également appelée ICP-OES pour Optical Emission Spectrometry) est une technique analytique puissante utilisée pour déterminer la composition élémentaire des échantillons. Elle repose sur l'excitation des atomes dans un plasma de haute température, suivi de la détection de la lumière émise lorsque ces atomes excités retournent à leur état fondamental [12,13].

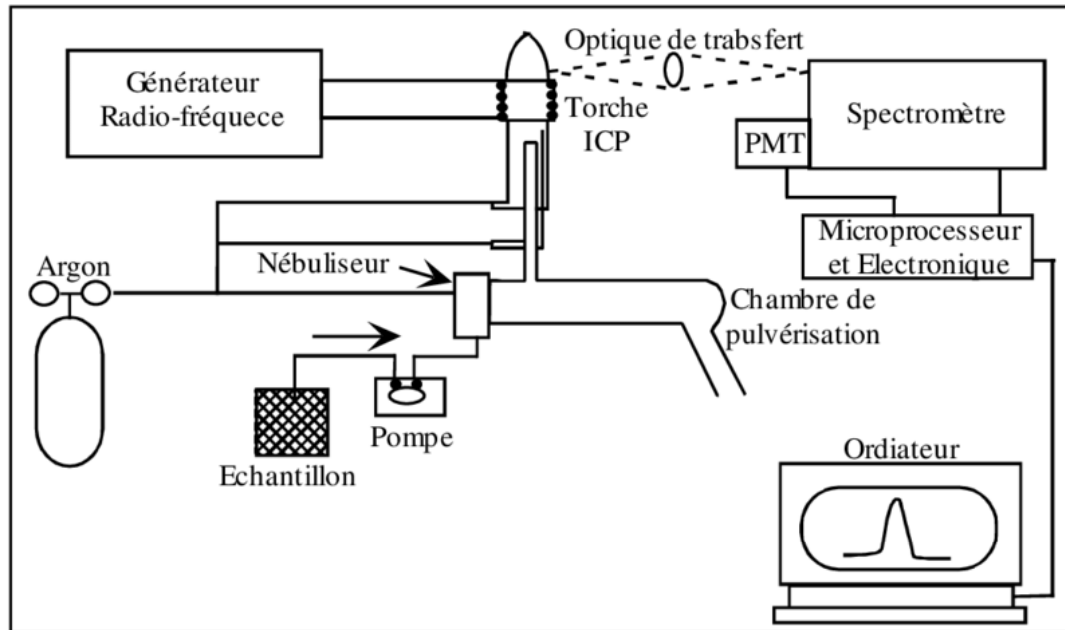


Figure 4 : Principe de fonctionnement de spectrométrie ICP – AES [12,13].

○ Principe

- ✓ **Introduction de l'échantillon :** L'échantillon est généralement introduit sous forme de solution liquide, souvent après digestion acide. Cette solution est nébulisée en fines gouttelettes et transportée dans le plasma par un gaz porteur, typiquement de l'Argon.
- ✓ **Formation du plasma :** Le plasma est créé en appliquant une puissance radiofréquence (RF) à une bobine entourant un gaz inerte (Argon). Cela génère un plasma de haute température (environ 6000 à 10000 K), suffisant pour exciter les atomes des éléments présents dans l'échantillon.
- ✓ **Excitation des atomes :** Dans le plasma, les atomes et ions de l'échantillon sont excités à des niveaux d'énergie plus élevés. En retournant à leur état fondamental, ils émettent de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques.
- ✓ **Détection de l'émission :** La lumière émise est collectée par un spectromètre, qui sépare les longueurs d'onde en fonction de leur énergie. Chaque élément a un ensemble unique de longueurs d'onde d'émission, permettant ainsi leur identification.
- ✓ **Analyse quantitative :** L'intensité des raies d'émission est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon. En utilisant des étalons de concentration connue, on peut quantifier la concentration des éléments présents dans l'échantillon.

La relation mathématique fondamentale dans l'ICP-AES est liée à l'intensité de l'émission lumineuse, qui est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon:

$$I = k \cdot C \cdot I \dots\dots\dots (17)$$

Où :

- **I**: Intensité de la raie d'émission pour un élément donné.
- **k**: Constante de proportionnalité, qui dépend de l'efficacité de la nébulisation, du transfert de l'échantillon, des conditions du plasma, et des caractéristiques du détecteur.
- **C**: Concentration de l'élément dans l'échantillon.

- **Applications** : Analyse précise des éléments traces dans les fontes.

3. Spectrométrie de Masse avec Plasma à Couplage Inductif (ICP-MS) [13]

La spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS) est une technique analytique avancée qui combine l'efficacité d'un plasma à couplage inductif (ICP) pour atomiser et ioniser les éléments présents dans un échantillon avec la haute sensibilité et la précision d'un spectromètre de masse pour la détection des ions. Cette méthode est extrêmement puissante pour la détection et la quantification des éléments en traces et ultra-traces dans divers types d'échantillons.

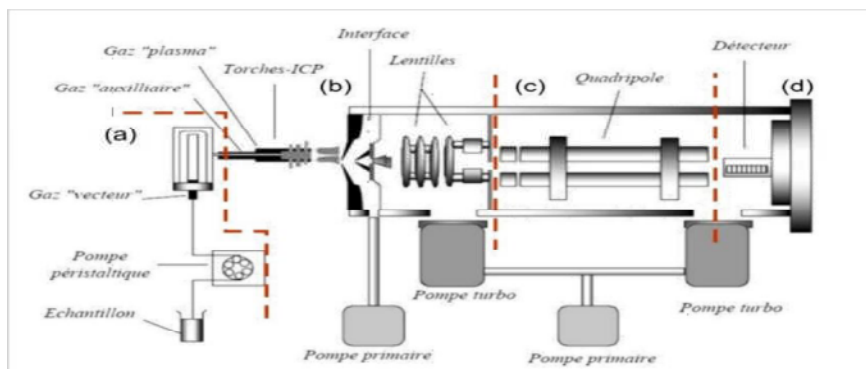


Figure 5 : Principe de fonctionnement (ICP-MS) [13]

- **Principe**
- ✓ **Introduction de l'échantillon** : L'échantillon, généralement sous forme liquide, est nébulisé en fines gouttelettes à l'aide d'un nébuliseur. Ces gouttelettes sont ensuite transportées par un gaz porteur, typiquement de l'Argon, dans un plasma de haute température.

- ✓ **Formation du plasma** : Un plasma d'Argon est généré par un champ radio fréquence (RF) appliqué à une bobine entourant le gaz. Le plasma atteint des températures de l'ordre de (6000 à 10000 K), suffisamment élevées pour atomiser et ioniser les éléments présents dans l'échantillon.
- ✓ **Ionisation des éléments** : Dans le plasma, les atomes sont ionisés, formant principalement des ions mono positifs (M^+). Ces ions sont ensuite dirigés vers l'orifice du spectromètre de masse.
- ✓ **Séparation et détection des ions**
 - Les ions passent à travers un système de lentilles électrostatiques, qui les focalise dans l'analyseur de masse, souvent un quadripôle. L'analyseur sépare les ions en fonction de leur rapport masse/charge (m/z).
 - Les ions séparés sont détectés par un détecteur, généralement un multiplicateur d'électrons, qui mesure l'intensité des ions arrivant, permettant ainsi de quantifier les éléments présents dans l'échantillon.

La relation mathématique clé dans l'ICP-MS repose sur l'intensité du signal ionique détecté, qui est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon.

$$IM^+ = k \cdot C_M \dots\dots\dots (18)$$

Où :

- IM^+ : Intensité du signal du ion M^+ (nombre d'ions détectés par unité de temps).
- k : Facteur de sensibilité qui dépend de l'efficacité de la nébulisation, de l'ionisation, et de la détection.
- C_M : Concentration de l'élément M dans l'échantillon.

- **Applications** : Analyse ultra-trace des éléments dans les fontes.

4. Analyse par Combustion

Elle est également connue sous le nom d'analyse élémentaire par combustion, est une technique utilisée pour déterminer la composition en éléments tels que le carbone (C), l'hydrogène (H), l'azote (N), le soufre (S), et parfois l'oxygène (O) dans des échantillons organiques et inorganiques. Cette méthode est couramment utilisée en chimie organique, en biochimie, et dans l'industrie pour analyser les composés organiques, les polymères, les combustibles, et les matériaux.

- **Principe** : L'analyse par combustion repose sur l'oxydation complète de l'échantillon pour convertir les éléments en gaz qui peuvent ensuite être mesurés. Le procédé se déroule généralement en plusieurs étapes :
- **Combustion**
 - ✓ L'échantillon est d'abord pesé avec précision, puis introduit dans un four où il est chauffé à haute température (généralement entre 900°C et 1200°C) en présence d'un excès d'oxygène.
 - ✓ Pendant la combustion, les éléments du matériau sont oxydés pour former des gaz simples : le carbone est converti en dioxyde de carbone (CO₂), l'hydrogène en eau (H₂O), l'azote en monoxyde d'azote (NO), et le soufre en dioxyde de soufre (SO₂).
- **Détection et Quantification**
 - ✓ Les gaz produits sont ensuite transportés par un flux de gaz porteur (souvent de l'hélium) vers des détecteurs spécifiques.
 - ✓ Le dioxyde de carbone est généralement détecté par un détecteur infrarouge (IR), l'eau par un détecteur de conductivité après avoir été convertie en vapeur, et les oxydes d'azote et de soufre par d'autres méthodes spécifiques, comme la chimiluminescence pour l'azote.
- **Calcul des concentrations**
 - ✓ Les quantités de gaz mesurées sont directement proportionnelles aux quantités des éléments correspondants dans l'échantillon. À partir des mesures, la composition élémentaire du matériau en termes de pourcentage massique de chaque élément est calculée.

La relation mathématique fondamentale dans l'analyse par combustion est basée sur la stœchiométrie de la réaction de combustion et la loi des gaz parfaits. Par exemple, pour le carbone :



L'intensité du signal du dioxyde de carbone (CO₂) détecté est proportionnelle à la quantité de carbone, initialement présente dans l'échantillon. La quantité de chaque élément est calculée à partir de l'équation :

$$\text{Masse de l'élément} = \frac{m(\text{gaz détecté})}{M(\text{gaz})} \times M(\text{élément}) \dots\dots\dots (20)$$

Où :

- m (gaz détecté) : Masse du gaz détecté (CO_2 , H_2O , NO , SO_2).
- M (gaz) : Masse molaire du gaz détecté.
- M (élément) : Masse molaire de l'élément correspondant (C, H, N, S).

- **Applications** : Détermination de la teneur en carbone et en soufre dans les fontes.

5. Spectroscopie de Photoélectrons X (XPS) [12 ,13]

Aussi connue sous le nom de spectroscopie ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis), est une technique analytique utilisée pour étudier la composition chimique des surfaces et les états électroniques des éléments présents dans un matériau. Elle repose sur l'effet photoélectrique, où les photons de rayons X excitent les électrons des couches internes des atomes, les éjectant du matériau. L'énergie cinétique de ces électrons éjectés est ensuite mesurée, permettant de déterminer l'énergie de liaison des électrons dans le matériau, ce qui donne des informations sur les éléments présents et leurs environnements chimiques.

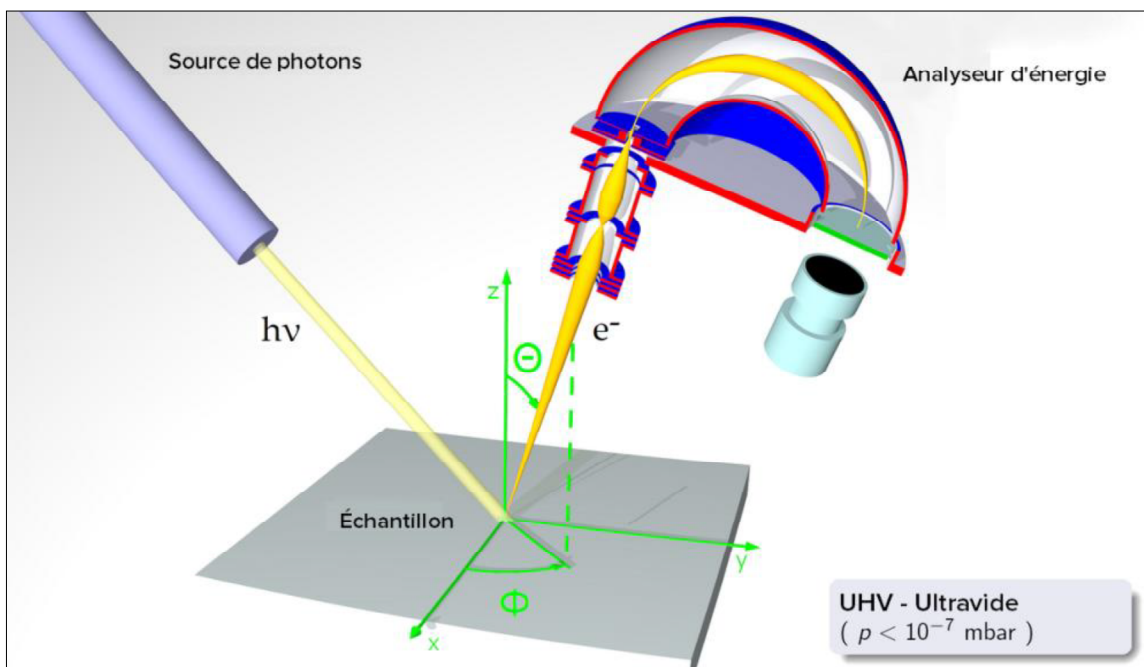


Figure 6: Principe de fonctionnement de XPS. [12 ,13].

○ **Principe**

✓ **Excitation par rayons X**

- Un faisceau de rayons X, généralement issu d'une source de rayons X à aluminium (Al $K\alpha$, 1486.6 eV) ou à magnésium (Mg $K\alpha$, 1253.6 eV), est dirigé vers la surface de l'échantillon.
- Les photons X ont suffisamment d'énergie pour éjecter des électrons des couches internes (comme la couche 1s ou 2p) des atomes présents dans la surface de l'échantillon.

✓ **Émission de photoélectrons**

- Lorsqu'un photon X est absorbé par un atome, il peut éjecter un électron des couches internes de l'atome. Cet électron est appelé photoélectron.
- L'énergie cinétique (E_k) de l'électron éjecté est mesurée par un analyseur d'énergie.

✓ **Calcul de l'énergie de liaison**

- L'énergie de liaison (E_b) de l'électron dans l'atome peut être calculée à partir de l'énergie du photon incident ($h\nu$) et de l'énergie cinétique mesurée (E_k) selon la relation suivante :

$$E_b = h\nu - E_k - \phi \dots\dots\dots (21)$$

Où :

- $h\nu$: Énergie du photon incident (dépend de la source de rayons X utilisée).
- E_k : Énergie cinétique du photoélectron mesurée.
- ϕ : Fonction de travail du spectromètre (énergie nécessaire pour extraire un électron du détecteur).

✓ **Spectre XPS**

- Un spectre XPS est obtenu en traçant l'intensité des photoélectrons en fonction de leur énergie de liaison. Chaque pic dans le spectre correspond à un électron éjecté d'une couche électronique spécifique d'un élément particulier.
- Les positions des pics (énergies de liaison) sont caractéristiques des éléments présents, et les formes des pics peuvent fournir des informations sur les états chimiques (comme l'oxydation ou l'environnement chimique).

- **Applications** : Analyse de la composition élémentaire et des états d'oxydation à la surface des fontes.

La caractérisation chimique des fontes est une étape essentielle pour comprendre et optimiser leurs propriétés et leurs performances. Les méthodes de caractérisation chimique décrites ci-dessus fournissent des informations précieuses sur la composition élémentaire des fontes, permettant ainsi de garantir leur qualité, de développer de nouveaux alliages et d'améliorer leur comportement dans diverses applications industrielles.

III- Caractérisation par les propriétés mécaniques [7-11 ,14]

La caractérisation des matériaux par leurs propriétés mécaniques est essentielle pour comprendre leur comportement sous différentes conditions de charge et pour assurer leur performance dans des applications spécifiques. Voici, une description détaillée des principales propriétés mécaniques et des méthodes pour leurs évaluations :

III-1- Essai de Traction

Les essais de traction sont des tests mécaniques utilisés pour déterminer les propriétés de résistance et de déformation des matériaux. Ce type d'essai est fondamental pour évaluer la performance des matériaux dans diverses applications industrielles, allant des métaux et alliages aux polymères, céramiques, composites, et matériaux biologiques. L'essai de traction permet de caractériser des propriétés mécaniques telles que la limite d'élasticité, la résistance à la traction ultime, le module d'élasticité, l'allongement à la rupture, et bien d'autres.

- **Équipements** : Machine de traction, extensomètre.
- **Principe de fonctionnement**
 - a. **Préparation de l'échantillon** : Un échantillon standardisé est préparé selon les spécifications de la norme applicable (par exemple, ASTM, ISO). Les dimensions de l'échantillon (longueur, diamètre ou largeur, épaisseur) sont mesurées avec précision.
 - b. **Montage dans la machine d'essai** : L'échantillon est fixé dans une machine d'essai de traction entre deux mâchoires, l'une fixe et l'autre mobile. La machine applique une force de traction croissante sur l'échantillon en l'étirant jusqu'à sa rupture.
 - c. **Application de la force** : Une force de traction est appliquée progressivement à une vitesse contrôlée. La force exercée (F) et l'allongement de l'échantillon (ΔL) sont mesurés en continu pendant l'essai.

- d. **Enregistrement des données** : Les données de la force et de la déformation sont enregistrées pour créer un graphique de la contrainte en fonction de la déformation (ou de la contrainte-déformation). La contrainte (σ) est calculée en divisant la force par la section initiale de l'échantillon (A_0), et la déformation (ε) est calculée comme le rapport de l'allongement (ΔL) à la longueur initiale (L_0).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots (22)$$

- e. **Rupture de l'échantillon** : L'essai se poursuit jusqu'à ce que l'échantillon se rompe. Les valeurs de la force et de l'allongement maximales au moment de la rupture sont enregistrées.

Caractéristiques et Propriétés Déterminées

1. Limite d'élasticité (σ_e)

- La contrainte maximale que le matériau peut supporter sans déformation plastique permanente. Jusqu'à ce point, le matériau se déforme de manière élastique et revient à sa forme initiale une fois la charge retirée.

2. Résistance à la traction ultime (σ_m)

- La contrainte maximale que le matériau peut supporter avant de commencer à se déformer de manière significative ou de se rompre. Elle est mesurée au point le plus haut du graphique contrainte-déformation.

3. Module d'élasticité (E)

- La pente de la partie linéaire initiale du graphique contrainte-déformation, qui représente la rigidité du matériau. Il est donné par :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots (23)$$

4. Allongement à la rupture (ε_r)

- La déformation totale du matériau au moment de la rupture, exprimée en pourcentage de la longueur initiale de l'échantillon.

5. Réduction de section

- Le pourcentage de diminution de la section transversale de l'échantillon au point de rupture, indiquant la ductilité du matériau.

Interprétation du Graphe Contrainte-Déformation

- **Région élastique**
 - La portion initiale du graphe où la relation entre la contrainte et la déformation est linéaire. Dans cette région, le matériau se comporte de manière élastique.
- **Région plastique**
 - Au-delà de la limite d'élasticité, le matériau entre dans la région plastique, où des déformations permanentes se produisent. Le matériau peut s'allonger de manière significative sans augmentation importante de la contrainte.
- **Point de rupture**
 - Le point où l'échantillon se rompt, marquant la fin de l'essai. Les propriétés à ce point, comme la contrainte ultime et l'allongement à la rupture, sont des indicateurs clés de la résistance et de la ductilité du matériau.
 - **Applications:** Sélection des matériaux, Contrôle de qualité, Recherche et développement, Étude de la rupture.

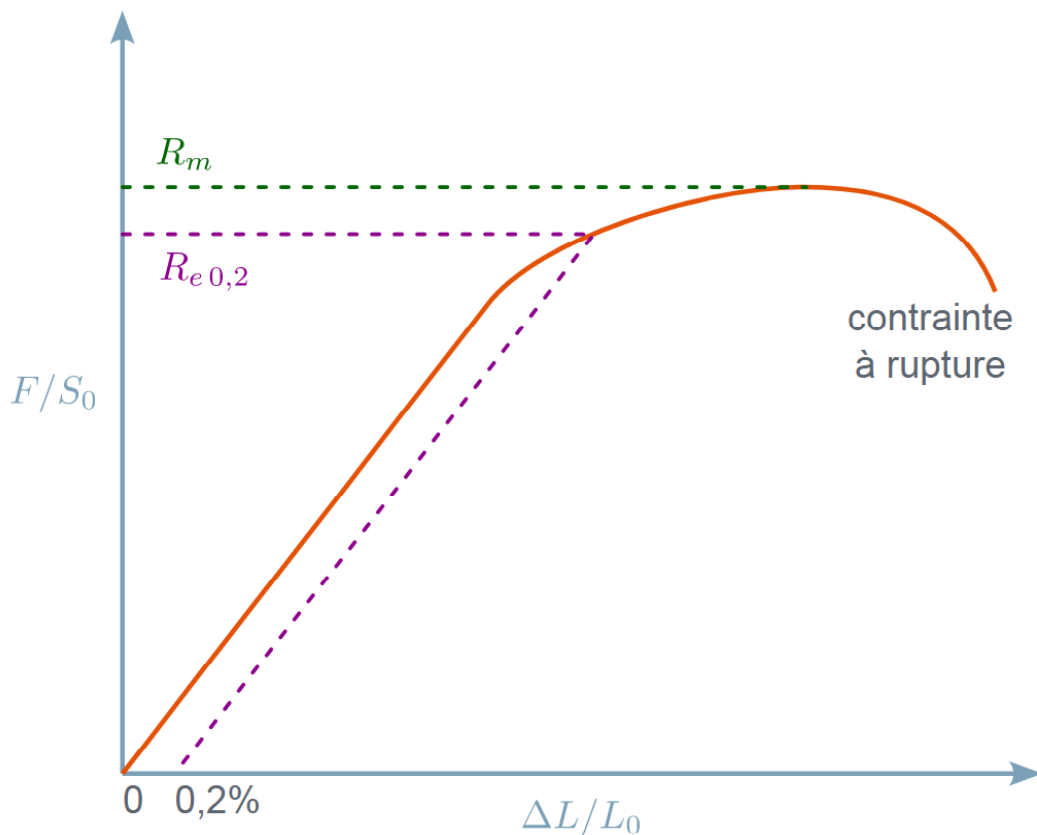


Figure 7 : Courbes de traction .

III-2- Essai de Dureté

L'essai de dureté est une méthode couramment utilisée pour évaluer la résistance d'un matériau à la déformation permanente ou à l'indentation. Contrairement à d'autres essais mécaniques comme l'essai de traction, l'essai de dureté est relativement simple, rapide et non destructif. Il est utilisé pour évaluer la dureté des métaux, des alliages, des plastiques, des céramiques, et d'autres matériaux. La dureté est souvent corrélée à d'autres propriétés mécaniques, comme la résistance à la traction, bien qu'elle ne fournisse pas une mesure directe de ces propriétés.

- **Principe et méthodes des essais de dureté:** Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la dureté, chacune adaptée à différents types de matériaux et de conditions d'essai. Les méthodes les plus courantes incluent les essais de dureté Brinell, Vickers, Rockwell, et Knoop.

1. Essai de Dureté Brinell

- **Principe :** Un indenteur sphérique (bille) en acier trempé ou en carbure de tungstène est pressé contre la surface du matériau avec une force constante. Le diamètre de l'empreinte laissée par l'indenteur est mesuré après l'application de la charge.
- **Calcul :** La dureté Brinell (HB) est calculée en divisant la charge appliquée (F) par la surface de l'empreinte (A). ou lue directement sur la machine d'essai en fonction de la profondeur d'enfoncement.

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots (24)$$

Où :

- **F:** Charge appliquée (en kilogrammes-force).
- **D :** Diamètre de l'indenteur (en millimètres).
- **d :** Diamètre de l'empreinte (en millimètres).
- **Applications :** Utilisé pour les matériaux métalliques plus doux comme les aciers doux, les fontes, et les alliages non ferreux.

2. Essai de Dureté Vickers

- **Principe :** Un indenteur pyramidal en diamant est pressé contre la surface du matériau. L'empreinte a une forme carrée, et ses diagonales sont mesurées après l'application de la charge.

- **Calcul** : La dureté Vickers (HV) est calculée à partir de la charge appliquée (F) et de la surface de l'empreinte (A), qui est fonction de la moyenne des diagonales de l'empreinte. ou lue directement sur la machine d'essai en fonction de la profondeur d'enfoncement.

$$HV = \frac{1,857 \times F}{d^2} \dots\dots\dots (25)$$

Où :

- **F** : Charge appliquée (en kilogrammes-force).
- **d** : Moyenne des diagonales de l'empreinte (en millimètres).
- **Applications** : Adapté à une large gamme de matériaux, des métaux durs aux céramiques et matériaux composites.

3. Essai de Dureté Rockwell

- **Principe** : Un indenteur sphérique (en acier ou en carbure de tungstène) ou conique (en diamant) est pressé contre la surface du matériau. La profondeur d'enfoncement de l'indenteur sous une charge mineure suivie d'une charge majeure est mesurée directement.
- **Échelles Rockwell** : Différentes échelles sont utilisées en fonction du type de matériau et de l'indenteur (ex. : HRB pour les matériaux plus doux avec un indenteur sphérique, HRC pour les matériaux durs avec un indenteur conique en diamant).
- **Calcul** : La dureté Rockwell est lue directement sur la machine d'essai en fonction de la profondeur d'enfoncement.
- **Applications** : Très couramment utilisé dans l'industrie pour les métaux, en raison de sa rapidité et de sa simplicité.

4. Essai de Dureté Knoop

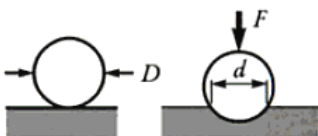




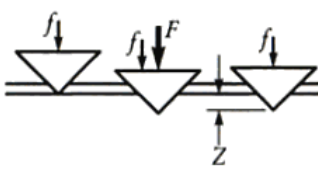
- **Principe** : Un indenteur en diamant en forme de pyramide allongée est pressé contre la surface du matériau. L'empreinte a une forme asymétrique, avec une longue et une courte diagonale.
- **Calcul** : La dureté Knoop (HK) est déterminée en fonction de la longueur de la diagonale longue de l'empreinte.

$$HK = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (26)$$

Où :

- **F** : Charge appliquée.
- **A** : Surface projetée de l'empreinte, calculée à partir de la longueur de la diagonale longue.
- **Applications** : Principalement utilisé pour les matériaux fragiles, les films minces, et les échantillons très petits.

Tableau 2 : Les différents types et principes d'essai de dureté.

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	500 ou 3000 kgf		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136° 	5 à 100 kgf (microdureté: 5 à 1000 gf)		Diagonale de l'empreinte (d) 	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant d'angle au sommet de 120° 	Précharge f de 10 kgf; $F = 150$ kgf		Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRC = f(Z)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge f de 10 kgf; $F = 100$ kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRB = f(Z)$

III-3- Essai de Résilience (Charpy)

L'essai de résilience est un test mécanique qui mesure la capacité d'un matériau à absorber l'énergie lorsqu'il est soumis à un choc, avant de se rompre. La résilience est un indicateur important de la ténacité d'un matériau, c'est-à-dire sa capacité à résister aux chocs sans se fracturer. Cet essai est couramment utilisé pour évaluer la fragilité ou la ductilité des matériaux, notamment dans les industries où les matériaux sont susceptibles de subir des impacts, comme l'automobile, l'aéronautique, et la construction.

- **Équipements** : Pendule de résilience Charpy.

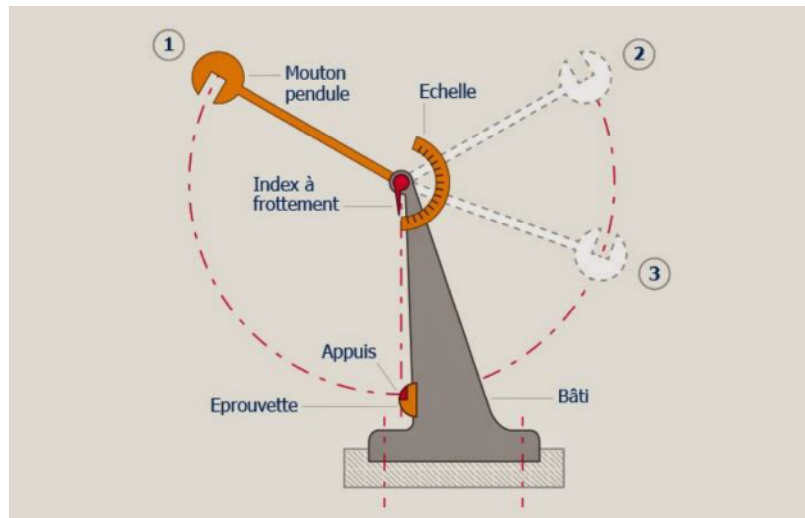


Figure 8: Fonctionnement de l'essai de Résilience (Mouton de Charpy).

- **Principes** : L'essai de résilience le plus commun est l'essai Charpy, bien que l'essai Izod soit également utilisé. Le principe de base est similaire pour les deux types d'essais.

1. Essai de Résilience Charpy

- **Préparation de l'échantillon** : Un échantillon rectangulaire standardisé (généralement 55 mm de longueur) est préparé avec une encoche en forme de V ou de U au centre, sur l'une des faces du spécimen. L'encoche sert de concentrateur de contrainte, facilitant la rupture lors de l'impact.
- **Montage dans la machine d'essai** : L'échantillon est placé horizontalement sur deux supports dans une machine d'essai Charpy. L'encoche est positionnée du côté opposé à la direction de l'impact.
- **Application de l'impact** : Un pendule lourd est lâché d'une hauteur déterminée, de manière à frapper l'échantillon en son centre, directement en face de l'encoche. Le pendule continue son mouvement après avoir brisé l'échantillon, et la hauteur atteinte après l'impact est mesurée.
- **Mesure de l'énergie absorbée** : L'énergie absorbée par l'échantillon pour se rompre est calculée en mesurant la différence entre l'énergie potentielle initiale du pendule

(avant l'impact) et l'énergie restante après avoir brisé l'échantillon. Cette énergie est exprimée en Joules (J).

2. Essai de Résilience Izod

- **Préparation de l'échantillon** : Un échantillon similaire à celui de l'essai Charpy est utilisé, mais il est monté verticalement, avec l'encoche dirigée vers le pendule.
- **Montage dans la machine d'essai** : L'échantillon est fixé verticalement, avec une extrémité serrée dans un étau et l'autre libre. Le pendule frappe le côté encoche de l'échantillon.
- **Application de l'impact** : Le pendule est lâché pour frapper l'extrémité libre de l'échantillon, et la mesure de l'énergie absorbée est effectuée de manière similaire à celle de l'essai Charpy.

Caractéristiques Mesurées

1. Résilience (K)

- La résilience est définie comme l'énergie absorbée par l'échantillon au moment de la rupture, exprimée en joules (J) ou en joules par centimètre carré (J/cm²) en fonction de la section transversale de l'échantillon. Elle est donnée par la formule suivante :

$$K = \frac{E}{A} \quad \text{avec} \quad A = b \times h \dots\dots\dots (27)$$

Où :

- **E** : Énergie absorbée par l'échantillon lors de la rupture, exprimée en joules (J).
- **A** : Surface de la section transversale de l'échantillon au niveau de l'encoche, exprimée en centimètres carrés (cm²).
- **b** : Largeur de l'échantillon (en cm).
- **h** : Hauteur de l'échantillon (en cm).

2. **Transition ductile-fragile** : L'essai de résilience peut être effectué à différentes températures pour déterminer la température de transition ductile-fragile d'un matériau. À des températures élevées, les matériaux sont plus ductiles et absorbent plus d'énergie, tandis qu'à des températures basses, ils deviennent fragiles et absorbent moins d'énergie.

III-4-Essai de Fatigue [14]

L'essai de fatigue est une méthode d'évaluation des propriétés mécaniques d'un matériau sous des charges cycliques répétées, souvent bien inférieures à sa limite élastique. Cet essai est essentiel pour comprendre comment un matériau se comporte sous des conditions de service réelles où il est soumis à des cycles de charge, tels que dans les structures aéronautiques, automobiles, et dans diverses autres applications mécaniques.

- **Équipements** : Machine de fatigue, capteurs de contrainte.
- **Principes** : L'essai de fatigue consiste à appliquer une charge cyclique (alternée, répétée ou variable) sur un échantillon jusqu'à ce qu'il se fissure ou se casse. Le nombre de cycles que le matériau peut supporter avant la rupture est enregistré pour déterminer sa résistance à la fatigue.

Types de Charge Cyclique

1. **Charge en flexion** : L'échantillon est soumis à une flexion alternée ou répétée.
2. **Charge en traction-compression** : L'échantillon est soumis à des cycles de traction et de compression.
3. **Charge en torsion** : L'échantillon est soumis à une torsion alternée.

Phases de l'Essai de Fatigue

1. **Préparation de l'échantillon**
2. L'échantillon est généralement préparé sous une forme standardisée (comme une barre ou une plaque) et soumis à un traitement de surface spécifique pour éviter l'effet des défauts superficiels.
3. **Application de la charge cyclique**
 - Une machine de fatigue applique une charge cyclique au matériau à une fréquence définie. Cette charge peut être sinusoïdale, carrée, ou triangulaire en fonction de l'essai.
 - La charge peut être appliquée en tension-compression, flexion, ou torsion.
4. **Enregistrement des cycles jusqu'à la rupture**
 - Le nombre de cycles appliqués avant la rupture du matériau est enregistrée. La machine peut s'arrêter automatiquement dès que l'échantillon se fissure ou se casse.

5. Analyse des résultats

- Les résultats sont analysés pour déterminer la courbe S-N (Stress-Number) du matériau, qui représente la contrainte appliquée (S) en fonction du nombre de cycles de charge (N) avant rupture.

Courbe S-N (courbe de Wöhler)

- La courbe S-N est tracée en plaçant le nombre de cycles à la rupture sur l'axe horizontal (N) et la contrainte appliquée sur l'axe vertical (S).
- Cette courbe montre généralement que pour des contraintes élevées, le nombre de cycles que le matériau peut supporter est faible. À mesure que la contrainte diminue, le nombre de cycles augmente, jusqu'à atteindre un plateau appelé **limite de fatigue**.
- La **limite de fatigue** est la contrainte maximale en dessous de laquelle le matériau peut théoriquement supporter un nombre infini de cycles sans se casser. Cette valeur est cruciale dans la conception de structures soumises à des charges cycliques.

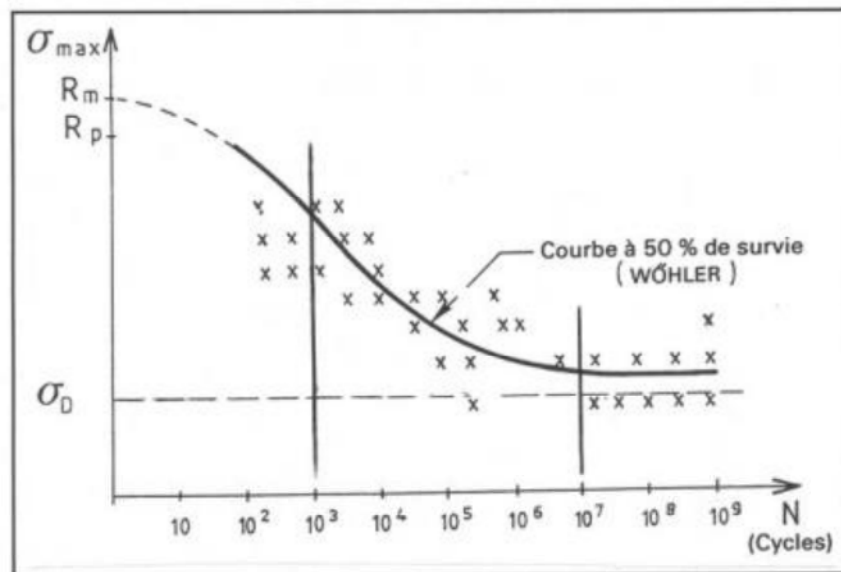


Figure 9: Modèle de courbe de Wöhler S-N alliage ferreux.

Facteurs Influant sur la Fatigue

1. **Amplitude de la charge** : Une amplitude de charge plus élevée conduit généralement à une durée de vie plus courte du matériau.
2. **Environnement** : La corrosion, les températures extrêmes, et l'humidité peuvent réduire la résistance à la fatigue du matériau.

3. **Traitement de surface** : Les défauts de surface tels que les rayures, les entailles, ou les défauts de fabrication peuvent servir de points de concentration de contrainte et réduire la résistance à la fatigue.
4. **Type de matériau** : Différents matériaux ont des comportements de fatigue différents. Par exemple, les aciers ont souvent une limite de fatigue bien définie, tandis que les alliages d'aluminium n'en ont pas clairement.

La Durée de Vie en Fatigue (N)

Les essais de fatigues nous permettent de déterminer la durée de vie en fatigue (N) pour une contrainte cyclique donnée (σ) peut être déterminée à partir de la courbe S-N obtenue expérimentalement.

Ou par le :

Modèle Empirique de Basquin

Un modèle fréquemment utilisé pour décrire la courbe S-N est le modèle de Basquin, exprimé par :

$$\sigma = \sigma'_f (2N)^b \dots\dots\dots (28)$$

Où :

- σ : Contrainte cyclique appliquée (amplitude de la contrainte).
- σ'_f : Résistance en fatigue du matériau (valeur de la contrainte pour un cycle).
- N: Nombre de cycles jusqu'à la rupture.
- b : Exposant de la fatigue (lié à la pente de la courbe S-N en échelle logarithmique).

Note : Les valeurs de σ'_f et de b sont obtenues à partir des essais expérimentaux et varient pour chaque matériau.

2. Calcul de la Contrainte pour un Nombre de Cycles Donné

Si l'on souhaite calculer la contrainte maximale que le matériau peut supporter pour une durée de vie en cycles spécifique, on réarrange la formule de Basquin, ou en termes logarithmiques :

$$\log(\sigma) = \log(\sigma'_f) + b \cdot \log(2N) \dots\dots\dots (29)$$

3. Calcul de la Limite de Fatigue

La limite de fatigue (σ_f) est la contrainte maximale que le matériau peut supporter indéfiniment sans rupture. Cette valeur est déterminée expérimentalement, mais approximations ou modèles peuvent être utilisés pour estimer cette limite.

Pour certains matériaux, comme les aciers, la limite de fatigue est souvent approximativement 0,5 fois la limite d'élasticité (σ_e).

$$\sigma_f \approx 0,5 \cdot \sigma_e \dots\dots\dots (30)$$

III-5-Essai de Fluage

L'essai de fluage est une méthode d'évaluation des propriétés mécaniques d'un matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte constante pendant une longue période, souvent à une température élevée. Cet essai est crucial pour les matériaux utilisés dans des environnements où ils sont exposés à des charges constantes et à des températures élevées, comme dans les turbines à gaz, les centrales nucléaires, ou les composants de moteurs d'avions.

- **Équipements** : Four de fluage, dispositif de chargement constant.
- **Principes** : Le fluage est la déformation progressive et irréversible d'un matériau sous l'effet d'une contrainte constante au fil du temps. Lors d'un essai de fluage, un échantillon est soumis à une charge constante à une température spécifiée, et la déformation est mesurée en fonction du temps.

Phases de l'Essai de Fluage

1. Préparation de l'échantillon

- Un échantillon standardisé (souvent en forme de cylindre ou de barre) est préparé. La taille, la forme, et le matériau de l'échantillon doivent respecter des normes spécifiques pour garantir des résultats comparables.

2. Application de la charge constante

- L'échantillon est placé dans une machine de fluage, qui applique une contrainte constante tout en maintenant la température spécifiée. La contrainte est maintenue constante tout au long de l'essai.

3. Mesure de la déformation

- La déformation de l'échantillon est mesurée à intervalles réguliers. Cette déformation augmente avec le temps, montrant comment le matériau se déforme progressivement sous la contrainte appliquée.

4. Analyse des résultats

- Les données recueillies permettent de tracer une courbe fluage-temps, qui montre l'évolution de la déformation en fonction du temps.

Phases du Fluage

L'essai de fluage révèle généralement trois phases distinctes de déformation :

1. Phase primaire (fluage transitoire)

- La déformation se produit rapidement au début, mais le taux de déformation diminue avec le temps. Cette phase est caractérisée par un taux de fluage décroissant.

2. Phase secondaire (fluage stationnaire)

- Le taux de déformation devient constant. Cette phase est la plus longue et souvent utilisée pour caractériser le matériau, car elle permet de définir le taux de fluage minimum ($\dot{\epsilon}$).

3. Phase tertiaire (fluage accéléré)

- Le taux de déformation augmente rapidement jusqu'à ce que l'échantillon se rompe. Cette phase est due à des mécanismes de rupture internes, comme la formation de fissures.

Courbe Fluage-Temps : La courbe typique de fluage-temps montre la déformation (ϵ) en fonction du temps (t). Elle est composée de trois parties correspondant aux phases primaire, secondaire et tertiaire.

Analyse des Résultats : Les résultats d'un essai de fluage permettent de déterminer plusieurs propriétés importantes :

1. Taux de fluage minimum ($\dot{\epsilon}$)

Il est mesuré pendant la phase secondaire et représente le taux de déformation constant du matériau. C'est un paramètre clé pour évaluer la durabilité du matériau sous contrainte. Ce taux est généralement exprimé par la loi de Norton :

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots (31)$$

Où :

- $\dot{\epsilon}$: Taux de fluage (déformation par unité de temps, souvent en s^{-1})
- σ : Contrainte appliquée (MPa ou Pa)
- A : Constante de matériel (dépend du matériau)
- n : Exposant de la contrainte (dépend du matériau)
- Q : Énergie d'activation pour le fluage (J/mol)
- R : Constante universelle des gaz (8.314J/mol K)
- T : Température absolue en Kelvin (K)

2. Durée de vie en fluage

C'est le temps total avant la rupture de l'échantillon sous la contrainte appliquée. Cela aide à prédire la durée de vie des matériaux dans des conditions de service spécifiques. Elle peut être estimée en utilisant une version modifiée de la loi de Monkman-Grant :

$$\dot{\epsilon} \cdot t_f = C \dots\dots\dots (32)$$

Où :

- C : Constante de Monkman-Grant, spécifique au matériau.
- t_f : Durée de vie en fluage.

3. Limite de fluage

Pour certaines applications, la contrainte est définie pour un certain taux de fluage ou une certaine durée de vie. On indique la contrainte maximale pour laquelle le matériau ne subira pas plus de déformation. Pour un taux de fluage constant (pendant la phase secondaire):

$$\epsilon = \dot{\epsilon} \cdot t \dots\dots\dots (33)$$

Où :

- ϵ : Déformation cumulée.
- t : Temps sous contrainte.

Importance de la Caractérisation Mécanique

1. Optimisation des Matériaux

- Permet de sélectionner et de développer des matériaux avec des propriétés adaptées aux exigences spécifiques des applications.

2. Assurance Qualité

- Garantit que les matériaux répondent aux Normes et spécifications requises pour leur utilisation prévue.

3. Conception et Ingénierie

- Fournit les données nécessaires pour les calculs de conception et les simulations mécaniques, assurant la sécurité et la fiabilité des structures et des composants.

4. Prédiction de la Durée de Vie

- Permet de prévoir la durée de vie et le comportement des matériaux sous des conditions de service réelles, notamment en ce qui concerne la fatigue et le fluage.

5. Détection des Défaillances

- Identifie les mécanismes de défaillance potentiels et permet de prendre des mesures correctives pour améliorer la performance des matériaux.

La caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux est donc une étape essentielle dans le développement, la sélection et l'utilisation de matériaux dans divers domaines industriels, tels que l'aérospatiale, l'automobile, la construction, et bien d'autres.

IV Caractérisation Microstructurale par Diffraction des Rayons X (DRX) et par Microscopie Électronique à Balayage avec Analyse par Dispersion d'Énergie (MEB-EDS) [11-13 ,15]

La caractérisation microstructurale des matériaux est essentielle pour comprendre leur structure interne, la distribution des phases, la nature des inclusions et les éventuels défauts. Deux techniques couramment utilisées pour cette caractérisation sont la diffraction des Rayons X (DRX) et la microscopie électronique à balayage avec analyse par dispersion d'énergie (MEB-EDS).

IV-1- Diffraction des Rayons X (DRX)

La Diffraction des Rayons X (DRX) est une technique analytique utilisée pour déterminer la structure cristalline des matériaux. Elle repose sur le phénomène de diffraction des rayons X lorsqu'ils interagissent avec les atomes dans un cristal. La DRX est largement utilisée dans les domaines de la science des matériaux, de la chimie, et de la physique pour analyser les structures internes des solides.

Principe

Lorsqu'un faisceau de rayons X frappe un échantillon cristallin, les rayons X sont diffractés par les plans atomiques du cristal. La diffraction se produit à des angles spécifiques selon la loi de Bragg, ce qui permet d'obtenir des informations sur la structure du cristal.

Loi de Bragg

La loi de Bragg décrit la condition nécessaire pour que la diffraction des rayons X soit observée. Elle est exprimée par l'équation :

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta \quad \dots\dots\dots (34)$$

Où :

- **n** : Ordre de diffraction (un entier positif, souvent $n=1$ pour le premier ordre)
- **λ** : Longueur d'onde des rayons X
- **d** : Distance entre les plans atomiques dans le cristal (interplanar spacing)
- **θ** : Angle de diffraction

Cette équation montre que la diffraction se produit lorsque la différence de chemin optique entre les rayons X diffractés par deux plans atomiques est égale à un nombre entier de longueurs d'onde.

Équipement de DRX

1. **Source de Rayons X** : Génère un faisceau de rayons X de longueur d'onde bien définie.
2. **Échantillon** : Le matériau cristallin à analyser.
3. **Détecteur** : Capte les rayons X diffractés et mesure leur intensité et leur angle.
4. **Goniomètre** : Permet de faire varier l'angle d'incidence des rayons X et mesure les angles de diffraction.

Étapes de l'Analyse DRX

1. **Préparation de l'Échantillon**
 - L'échantillon doit être préparé sous forme de poudre fine ou de monocristal, selon l'application.

2. Collecte des Données

- Les rayons X sont dirigés vers l'échantillon, et les rayons diffractés sont mesurés à différents angles. Cette collecte produit un diagramme de diffraction.

3. Analyse du Diagramme de Diffraction

- Le diagramme montre des pics de diffraction qui correspondent à des angles spécifiques. L'emplacement et l'intensité de ces pics fournissent des informations sur la structure du cristal.

4. Identification et Interprétation

- Les positions des pics (angles de diffraction) sont comparées à des bases de données pour identifier les phases cristallines présentes dans l'échantillon. La largeur et l'intensité des pics fournissent des informations sur la taille des cristallites et les défauts dans le cristal.

Interprétation des Données

1. Diagramme de Diffraction

- Le diagramme de diffraction (ou spectre) montre des pics correspondant aux angles de diffraction où la diffraction constructive se produit. Chaque pic est lié à un plan cristallin spécifique dans le matériau.

2. Paramètres de Maille

- Les positions des pics permettent de calculer les paramètres de la maille cristalline, qui incluent les dimensions et les angles des cellules unitaires du cristal.

3. Largeur des Pics

- La largeur des pics peut être utilisée pour estimer la taille des cristallites et la présence de micro-contraintes ou de défauts.

Applications de la DRX

1. Identification des Phases Cristallines

- Permet de déterminer les phases présentes dans un matériau.
- Utilisée pour analyser les alliages métalliques, les céramiques, les polymères cristallins, etc.

2. Analyse Quantitative

- Évaluation de la proportion relative des différentes phases dans un échantillon.

3. Détermination des Paramètres de Réseau

- Mesure des paramètres de la maille cristalline (dimensions des cellules unitaires).

4. Étude des Textures Cristallines

- Analyse des orientations préférentielles des grains dans un matériau polycristallin.

5. Analyse des Contraintes Résiduelles

- Évaluation des contraintes internes dans les matériaux.

IV-2- Microscopie Électronique à Balayage avec Analyse par Dispersion d'Énergie (MEB-EDS)

La microscopie électronique à balayage (MEB), combinée à l'analyse par dispersion d'énergie (EDS), est une technique puissante utilisée pour examiner la morphologie, la topographie, et la composition élémentaire des échantillons à une échelle microscopique. Cette méthode est largement utilisée en science des matériaux, en physique, en chimie, en biologie, et dans de nombreuses industries pour obtenir des images Hautes- Résolution des surfaces et pour effectuer une analyse chimique qualitative et semi-quantitative.

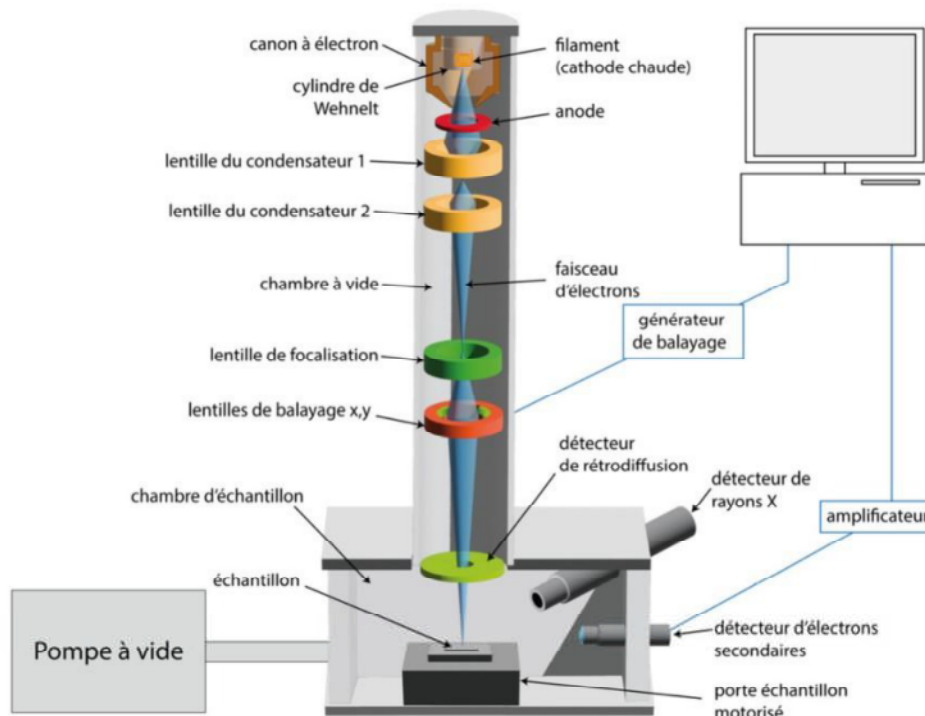


Figure 10 : Principe de fonctionnement de MEB-EDS.

- **Principe** : Sert au Bombardement de la surface d'un matériau par des électrons et analyse des rayons X caractéristiques émis suivant les étapes suivante.

1 - Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

- **Génération du faisceau d'électrons** : Un faisceau d'électrons est généré par un canon à électrons, généralement à partir d'une cathode à Tungstène ou d'une source à émission de champ.
- **Balayage de l'échantillon** : Ce faisceau est focalisé en un fin faisceau de haute énergie (1 à 30 keV) qui balaye la surface de l'échantillon point par point.
- **Interaction faisceau-échantillon** : Lorsqu'il interagit avec l'échantillon, le faisceau d'électrons produit différents signaux, notamment des électrons secondaires (SE) et des électrons rétrodiffusés (BSE). Ces signaux sont collectés pour former une image haute résolution de la surface de l'échantillon.
- **Image par électrons secondaires (SE)** : Les électrons secondaires sont émis des couches superficielles de l'échantillon, fournissant des images de haute résolution qui révèlent la topographie de la surface.
- **Image par électrons rétrodiffusés (BSE)** : Les électrons rétrodiffusés proviennent de plus grandes profondeurs et sont sensibles à la masse atomique. Ils fournissent des images contrastées en fonction de la composition chimique, les régions contenant des éléments lourds apparaissant plus brillantes.

2- Analyse par Dispersion d'Énergie (EDS)

- **Production de Rayons X caractéristiques** : Lorsque le faisceau d'électrons interagit avec les atomes de l'échantillon, il peut éjecter des électrons des couches internes, créant des vacants qui sont comblés par des électrons d'une couche supérieure. Ce processus émet des Rayons X caractéristiques dont l'énergie est spécifique à chaque élément.
- **Détection des Rayons X** : Les rayons X émis sont détectés par un détecteur EDS, qui mesure l'énergie des Rayons X et les classe en fonction de leur énergie.
- **Spectre EDS** : Le détecteur génère un spectre où chaque pic correspond à un élément présent dans l'échantillon, permettant une identification qualitative des éléments et une estimation de leur concentration relative.

- **Applications** : Cartographie de la composition élémentaire et analyse des inclusions dans les Fontes.

Importance de la Caractérisation Chimique des Fontes

1. Contrôle de la Qualité

- Assure que les Fontes respectent les spécifications requises pour leur utilisation prévue.
- Détecte les impuretés et les éléments indésirables qui pourraient affecter les propriétés des Fontes.

2. Optimisation des Propriétés

- Permet d'ajuster la composition chimique pour obtenir les propriétés mécaniques et physiques souhaitées.
- Aide à améliorer la résistance à la corrosion, la dureté, la résistance à l'usure, ...etc.

3. Développement de Nouveaux Alliages

- Facilite la recherche et le développement de nouvelles Fontes avec des compositions chimiques innovantes.
- Permet de créer des matériaux avec des propriétés spécifiques adaptées à des applications particulières.

4. Analyse des Défaillances

- Aide à identifier les causes des défaillances des composants en service.
- Permet de prendre des mesures correctives pour améliorer la performance et la durabilité des Fontes.

IV-3-Comparaison et Complémentarité des Techniques

DRX

- Idéal pour l'identification des phases cristallines et l'analyse des structures à grande échelle.
- Complémentaire à MEB-EDS pour fournir des informations sur la structure cristalline que le MEB ne peut pas obtenir.

MEB-EDS

- Excellente Technique pour l'analyse de la microstructure et la composition élémentaire à Haute- Résolution.

- Complémentaire à DRX pour fournir des informations détaillées sur la morphologie et la distribution des éléments dans des régions spécifiques de l'échantillon.

La combinaison de la diffraction des Rayons X et de la microscopie électronique à balayage avec analyse par dispersion d'énergie offre une approche complète pour la caractérisation microstructurale des matériaux. La DRX fournit des informations sur les phases cristallines et les paramètres de réseau, tandis que le MEB-EDS permet une observation détaillée de la microstructure et une analyse élémentaire précise. Ensemble, ces techniques permettent une compréhension approfondie des matériaux, essentielle pour le développement, l'optimisation et l'application des matériaux dans divers domaines industriels.

Chapitre III

*Les Méthodes et le Matériel utilisés
par EI pour la caractérisation de la
Fonte GG 15 DIN 1691 .*

1- Le Matériau

La **fonte GG15 (Gusseisen Graphit)** est un type de **fonte grise**, caractérisée par sa teneur en graphite sous forme lamellaire. Elle est classifiée selon la norme DIN 1691, qui spécifie ses propriétés mécaniques, chimiques et ses applications. C'est un matériau très utilisé dans les industries mécaniques pour des pièces nécessitant une bonne usinabilité et une capacité d'absorption des vibrations. (**Annexe 1,2**)

I-1- Caractéristiques Principales de la fonte GG15

I-I-1- Propriétés mécaniques

- **Résistance à la traction** : minimum de 150 N/mm²
- **Dureté Brinell** : 170-220 HB
- **Module d'élasticité** : entre 90 et 140 GPa
- **Densité** : Environ 7,1

I-I-2- Composition chimique

Le Tableau 3 donne la composition chimique de la fonte GG15 donnée par la DIN 1691.

Tableau 3: Eléments chimiques de la fonte GG15 .

Elément	Carbone (C)	Silicium (Si)	Manganèse (Mn)	Phosphore (P)	Soufre (S)
Pourcentage	2,7 à 3,6 %	1,8 à 2,8 %	0,5 à 0,8 %	< 0,15 %	< 0,12 %

II- La Norme DIN 1691

La norme **DIN 1691** est une norme allemande publiée par l'organisme de normalisation allemand **DIN (Deutsches Institut für Normung .)**, qui spécifie les exigences techniques et les classifications pour les **fontes grises**. Les fontes grises sont des alliages à base de fer, où le graphite est présent sous forme lamellaire. Cette norme est un guide important pour la désignation, la composition chimique, les propriétés mécaniques, et les applications des fontes grises. (**Annexe 2**)

III- Méthodes et Matériels

III-1- Analyse par combustion

L'analyse par combustion est une méthode analytique utilisée pour déterminer la composition élémentaire d'un matériau, principalement en ce qui concerne les éléments carbone (C), hydrogène (H), azote (N), soufre (S) et parfois l'oxygène (O). Cette technique est particulièrement employée dans les analyses métallurgiques, notamment pour les fontes et les aciers, afin de mesurer la teneur en carbone, soufre et autres éléments volatils.

III-1-1- Principe de l'analyse par combustion

L'analyse par combustion repose sur l'oxydation complète d'un échantillon dans une atmosphère contrôlée, généralement de l'oxygène pur, à haute température. Lors de cette combustion, les éléments présents dans l'échantillon réagissent avec l'oxygène pour former des composés gazeux qui peuvent être collectés et analysés.

III-1-2- Déterminateur du carbone et du soufre ELTRA CS-800

Est un analyseur de carbone et de soufre particulièrement utilisé pour les échantillons métalliques et non métalliques. Il est conçu pour fournir une mesure précise et rapide de la teneur en carbone et en soufre, permet l'analyse **simultanée** des deux éléments en une seule opération. Cela augmente l'efficacité dans les laboratoires nécessitant une grande cadence de mesure. ce qui en fait un instrument incontournable dans les industries métallurgiques, environnementales, ainsi que dans les laboratoires de recherche. La Figure 11 suivante, nous présente la photos du Déterminateur du Carbone et du Soufre ELTRA CS 800 utilisée par E.I.



Figure 11 : Déterminateur de carbone et de soufre ELTRA CS 800 de EI

a) Fonctionnement du déterminateur de carbone et de soufre ELTRA CS 800

• Principe de la combustion

- L'échantillon à analyser (par exemple, de la fonte GG15) est introduit dans un four où il est soumis à une combustion à haute température sous un flux d'oxygène pur.
- Les éléments présents dans l'échantillon (le carbone et le soufre) réagissent avec l'oxygène pour former des gaz :
 - Le carbone se transforme en **dioxyde de carbone (CO₂)**.
 - Le soufre se transforme en **dioxyde de soufre (SO₂)**.

- **Détection des gaz formés**
 - Les gaz produits sont ensuite dirigés vers des détecteurs spécifiques :
 - Le **CO₂** est mesuré à l'aide d'un **détecteur infrarouge**.
 - Le **SO₂** est également mesuré par un détecteur infrarouge ou par d'autres types de capteurs sensibles à ces gaz.
 - La concentration de ces gaz est directement proportionnelle à la quantité de carbone et de soufre présente dans l'échantillon initial.

- **Analyse des résultats**
 - L'appareil **ELTRA** convertit les données des capteurs en pourcentages de Carbone et de Soufre.
 - Le résultat final est exprimé en pourcentage de masse des éléments présents dans l'échantillon, offrant une analyse rapide et précise de la composition de l'échantillon.

III-1-3- Préparation de l'échantillon et analyse

Dans un creusé d'un poids (P=10 g), fait en porcelaine résistante aux hautes températures, on met (1,5 g) de Tungstène pour accélérer l'analyse et on ajoute entre (0,3-0,5 g) des limailles de la fonte GG15 rincées avec de l'eau pure H₂O, les limailles de la fonte GG15 sont importées des restes des pièces usinées par le tour mécanique et les fraiseuses. Puis on met le creusé dans le support de la chambre de combustion de la machine. À l'aide d'un ordinateur, l'analyse commence et les résultats seront affichés sur l'écran de la machine et de l'ordinateur.

On enregistre le premier résultat, et, on refait la même opération pour un second échantillon. Le deuxième résultat sera affiché et enregistré. On demande au logiciel de nous calculer la moyenne et l'écart type de cette analyse pour avoir les taux du carbone (C) et du Soufre (S).

La Figure 12, nous montre les photos des Limailles de notre fonte GG15 à laquelle, on fera subir cette analyse.

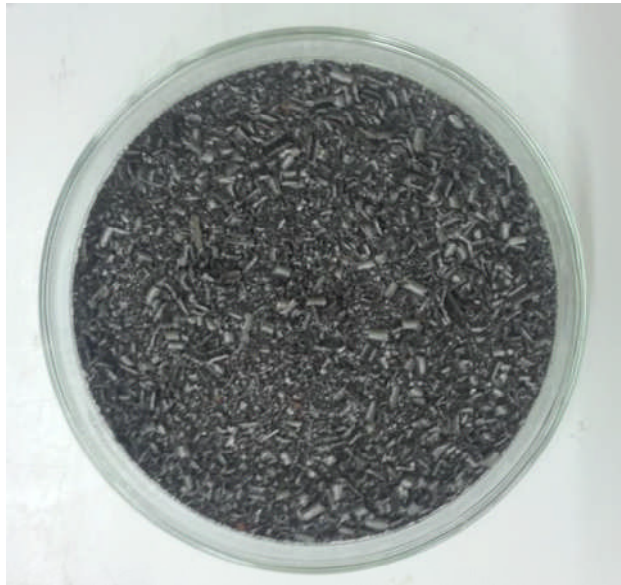


Figure 12 : Limailles de fonte

La Figure 13 ci-dessous montre les Grain de Tungstène qui est utilisé comme accélérateur de combustion pour cette analyse.



Figure 13 : Grain de Tungstène (accélérateur de combustion)

La Figure 14 ci-après, montre la photo qu' on a prise du Creuset en porcelaine utilisé pour cette analyse.



Figure 14 : Creuset en porcelaine

La Figure 15 nous présente la préparation du Mélange de la fonte GG15 avec le Tungstène après combustion exigée pour l'analyse.



Figure 15 : Mélange de la fonte GG15 avec le Tungstène après combustion pour analyse.

III-2- Essai de dureté

La dureté de la fonte GG15 est souvent mesurée à l'aide de méthodes tels que l'échelle Brinell ou l'échelle Rockwell, tout dépend de la précision nécessaire et des conditions du matériau. Pour réaliser ces essais on a utilisé l'échelle Brinell et le matériel suivant :

III-2-1- Polissage

Pour un bon polissage de la pièce on a passé par les deux (02) étapes suivantes :

- **Tour mécanique** : Afin d'obtenir une surface lisse de la pièce, on a adapté le rabotage à l'aide d'un tour mécanique Weiler CONDOR VS 1 de l'unité de fabrication de l'usine E.I.AZAZGA.

La Figure 16 ci-dessous montre la photo du Tour mécanique Weiler CONDOR VS 1 qu' on a utilisé pour la préparation nos échantillons.



Figure 16 : Tour mécanique Weiler CONDOR VS 1

- **Polisseuse** : Après le rabotage de la pièce et pour atteindre un effet miroir de la surface en question et pour avoir un résultat souhaitable de dureté et une bonne vision microscopique on a utilisé la polisseuse de finition Buehler ECOMET III à un seul disque de types « Struers » référence 600 muni d'un dispositif d'arrosage alimentée sous une tension de 220V et d'une puissance de 432W.

La Figure 17 suivante montre la photo qu'on a prise de la Polisseuse Buehler ECOMET III de L'E.I.AZAZGA qu'on a utilisé pour préparer nos échantillons.



Figure 17 : La Polisseuse Buehler ECOMET III de L'E.I.AZAZGA.

III-2-2- Le Duromètre

Le duromètre de type WOLPERT DIA TESTOR 2RC c'est un appareil de mesure de la dureté, il est constitué de deux parties; la première est la partie d'essai, nous permet d'effectuer trois (03) types d'essais : Rockwell, Vickers et Brinell. Cette première partie est muni d'un sélectionneur de charges et d'un plateau ou table sur laquelle les éprouvettes sont posées. La seconde partie, nous permet de mesurer l'empreinte des billes et des pyramides à un grossissement de 70 fois sur l'écran de verre dépoli, ce duromètre est alimenté sous une tension de 220V et d'une fréquence de 50Hz.

La Figure 18 ci-dessus, nous montre le Duromètre WOLPERT DIA TESTOR 2RC d'E.I.AZAZGA qu'on a utilisé pour notre analyse de la dureté de nos échantillons.

La Figure 19, nous présente la photo qu'on a prise lors de la mesure de l'empreinte obtenue sur un de nos échantillons.



Figure 18 : Duromètre WOLPERT DIA TESTOR 2RC

Figure 19 : Mesure de l'empreinte

III-2-3- Déroulement de l'essai de dureté

Notre expérience a été réalisée par une bille de diamètre ($D = 2,5\text{mm}$), sous une charge appliquée de ($F=187.5 \text{ Kg/F}$) sous la norme de mesure ISO 6506-1.

Après le positionnement et la fixation de la pièce sur la table de l'appareil on applique la charge sur un point quelconque de la surface lissée et on retire le pénétrateur après quelques secondes. À l'aide d'une loupe l'empreinte de la bille agrandie 70 fois sera affichée sur le verre lumineux du duromètre. Le diamètre "d" de l'empreinte est mesuré par une échelle compatible au grossissement. La dureté à l'échelle Brinell est donc calculée par la relation suivante :

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots (24) .$$

III-3- La microscopie optique

La microscopie optique est une technique d'observation qui utilise la lumière visible et un système de lentilles pour agrandir l'image d'échantillons microscopiques. C'est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus couramment utilisées pour examiner des structures trop petits pour être vus à l'œil nu.

III-3-1- Le microscope optique

Afin de déterminer la structure microscopique de la fonte GG15 il était nécessaire d'utiliser un microscope optique de laboratoire, utilisé pour des observations en lumière transmise muni d'une caméra reliée à l'ordinateur du modèle Union Tokyo Bi-12703 alimenté par une tension de 220V, avec une fréquence de 50Hz et une puissance de 100 W, son utilisation oculaire monobloc ou binoculaire avec une plage de grossissement autour de 10X. Son système optique a un grossissement courant allant de 40X à 1000X, avec l'utilisation d'objectif de différentes puissances (4X, 10X, 40X, 100X).

L'analyse est effectuée sur la pièce polie précédemment avec une attaque chimique par le Nital (acide nitrique 3% dans l'alcool éthylique) exigée par la Norme.



Figure 20 : Microscope optique Union Tokyo Bi-12703

La Figure 20 ci-dessus, nous donne la photo du Microscope optique Union Tokyo Bi-12703 d'E.I.AZAZGA, qu'on a utilisé pour réaliser les micrographies de nos échantillons.

III-4- Analyse de spectrométrie (Annexe 4)

Cette analyse a été réalisée et fournie par le fournisseur de la fonte au laboratoire OZGUMUS en Turquie le 25/05/2011 et cela sur la demande de département technique de l'unité industrielle de Entreprise.

Cette technique d'analyse est détaillée dans le chapitre II (Voir page 29,33).

III-5- Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)(Annexe 5,6)

Cette analyse a été réalisée par le groupe allemand GMA le 22/03/2017 sur la demande de département technique de l'unité industrielle de Entreprise.

Cette technique d'analyse est définie dans le chapitre II (Voir page 54;56).

Chapitre IV

Résultats et Discussions

I- Résultat de l'analyse par combustion

L'analyse par combustion a été réalisée, les éléments du carbone (C) et du soufre (S) les résultats sont donnés en pourcentage (%) dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4: Résultat de l'analyse par combustion de la fonte GG15 (Annexe 3).

Désignation	Poids (g)	Taux de carbone (C) %	Taux de soufre (S) %
Échantillon 1	3,587	3,4971	0,0446
Échantillon 1	3,695	3,4129	0,0473
Taux moyens	3,641	3,4550	0,0459
Ecart type		0,05954 / 1,72	0,00191 / 4,1
Selon la norme DIN 1691		2,7 à 3,6 %	≤ 0,12

N/B: L'écart type de l'appareil est donné ($\pm 2\%$) pour le carbone et ($\pm 5\%$) pour le Soufre

L'analyse par combustion, nous révèle que le taux de Carbone dans les deux échantillons ainsi le taux moyen est compatible avec les éléments du Tableau 3 et la fiche technique en annexe 3.

II- Résultats de l'essai de dureté

L'essai de dureté réalisé, nous fait ressortir les résultats indiqués dans le tableau 5 ci-dessous :

Tableau 5: Résultat d'essai de dureté réalisé sur notre fonte GG15 selon la norme DIN 1691

Essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Moyenne
Diamètre d (mm)	1,15	1,12	1,12	1,11	1,13	1,15	1,14	1,13
La dureté HB	170,40	180,23	180,23	183,68	176,87	170,4	173,6	176,49

N/B: la dureté de la fonte GG15 selon la norme 1691 HB = 170-220

Selon les résultats obtenus par cet essai, on déduit que notre fonte est dure, ce qui indique que ces résultats sont conforme au donnée de la fiche technique de la fonte GG15 selon la norme DIN 1691 (Voir les annexes 1,2) .

III- Résultat de la microscopie optique

Afin de déterminer la constitution structurale de la fonte et forme du graphite une observation microscopique était faite, comme suite :

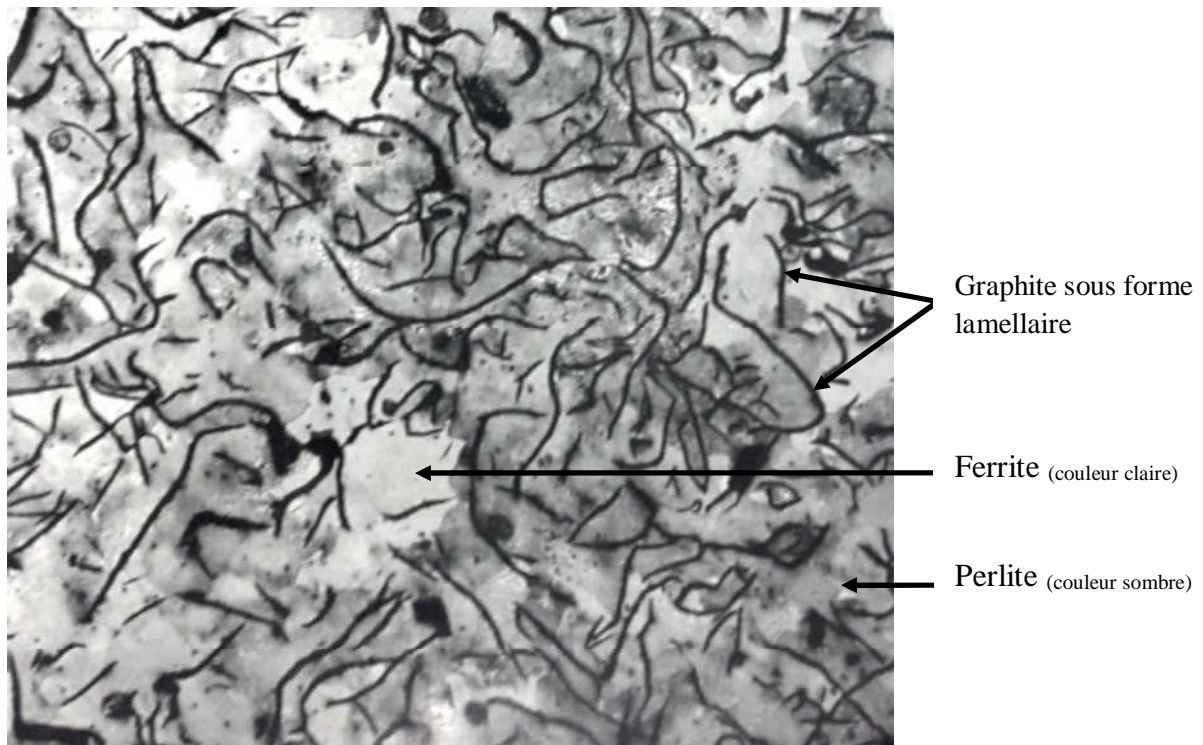


Figure 21: Observation microscopique de la fonte GG15 , à grossissement x 300

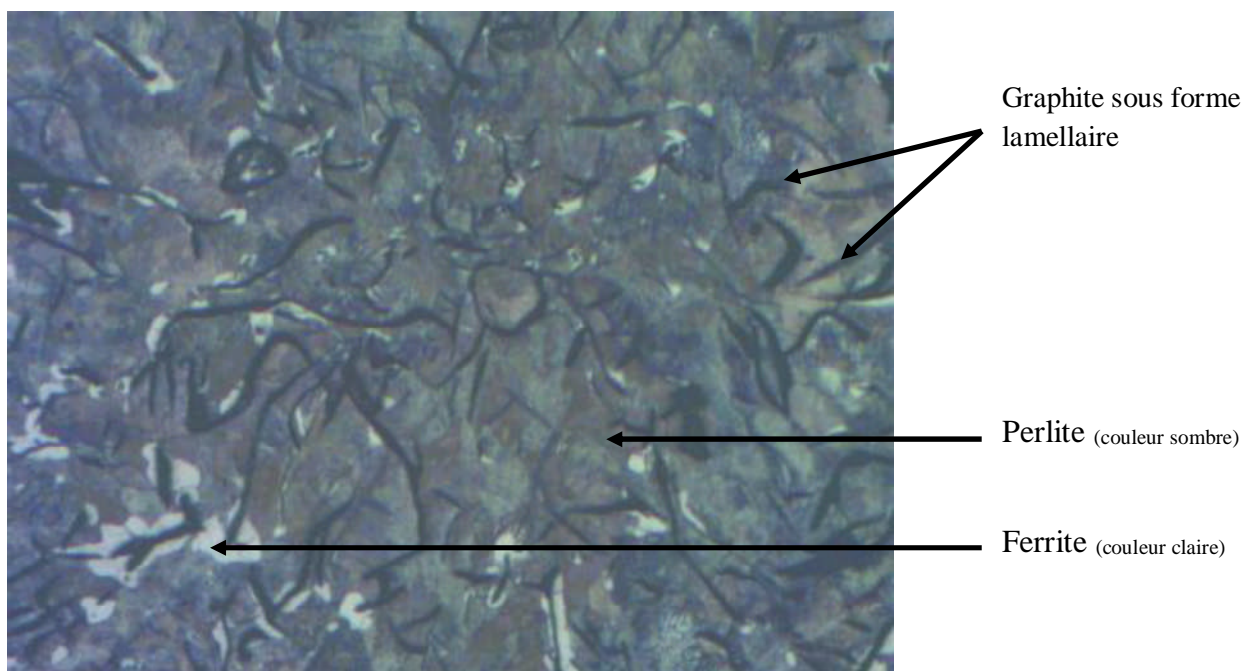


Figure 22: Métallographie de la fonte GG15 selon la norme DIN 1691

L'observation microscopique a révélé une structure ferritique dominante avec de petites quantités de perlite. L'aspect graphite est lamellaire est correspond au matériau utilise fonte GG15 selon la norme 1691

IV- Résultats de l'analyse spectrométrique (Annexe 4)

Le résultat l'analyse spectrométrique de la fonte est ses éléments sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6: Résultat de l'analyse spectrométrique

Élément	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Mg	Nb	Ti	V	Pb	Sn	B	Zr	As	CE	CE
Résultat (%)	92,3000	3,4200	2,2800	0,6330	0,8480	0,0353	0,0657	0,0791	0,0324	0,0095	0,0050	0,0375	0,0020	0,0524	0,0490	0,0403	0,0010	0,0121	0,0046	0,0526	0,0237	3,9500	4,1800
Norme (%)	92-95	2,7 à 4,0	1,8 à 2,8	0,5 à 0,8	< 0,15	< 0,12	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	3,8 <	< 4,2

Les quantités du fer (Fe), du Carbone (C) et l'équivalence en carbone CE déterminées lors de cette analyse affirme que notre fonte est une fonte grise GG15 .

V- Résultat de l'observation au Microscopie Electronique à Balayage (MEB) (ANNEXE 5)

L'observation au MEB a montré la structure suivante :

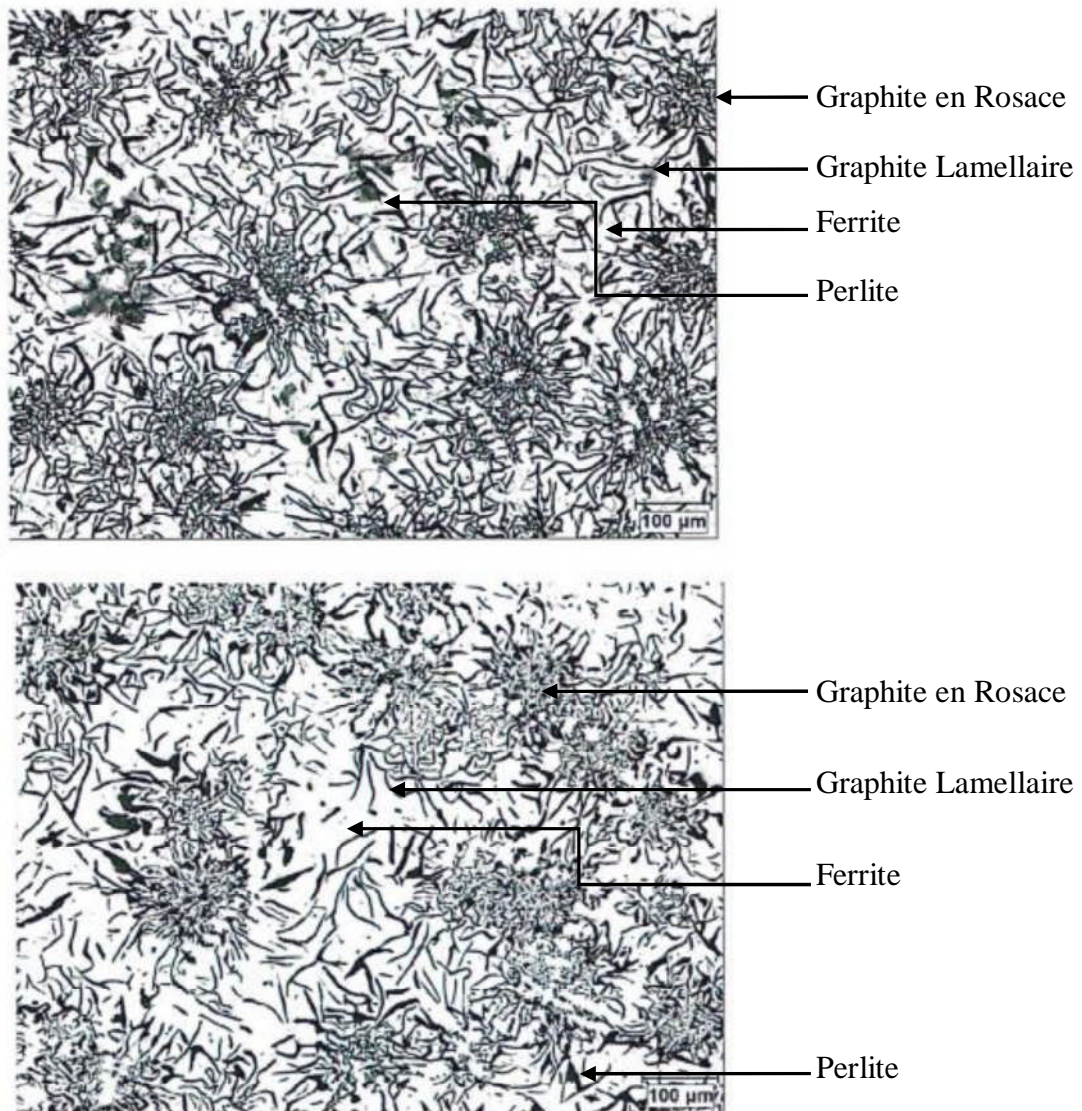


Figure 23 : Observation au MEB de la fonte GG15

On remarque que la structure obtenue est ferritique avec de petites quantités de perlite. L'aspect graphite est lamellaire et des formes en rosace est correspond au matériau utilisé qui est la fonte GG15, selon la Norme 1691.

L'analyse de cette micrographie montre aussi que la matrice ne présente aucune inclusion non métallique significative.

La structure obtenue ; nous permet de dire que la composition chimique et la structure micrographique influent énormément sur les propriétés mécaniques comme le montre la valeur de la dureté HB 2.5/187.5 qu'on a obtenu.

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail est la caractérisation physico-chimique et mécanique de la Fonte GG15 selon la norme utilisé pour le moulage des Carcasses à E.I.AZAZGA.

Les techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation physico-chimique et des propriétés mécaniques de la fonte GG15 selon la norme DIN 1691 révèle que ce matériau est bien adapté pour les applications de moulage, notamment pour la fabrication de carcasses.

Les résultats montrent que cette fonte présente une bonne combinaison de propriétés telles que :

1. Composition chimique

- La teneur élevée en carbone (2,7 % à 4 %) favorise la formation de graphite lamellaire, typique des fontes grises. Cette structure assure de bonnes propriétés d'amortissement des vibrations et une meilleure machinabilité.

2. Dureté

- La dureté typique de la fonte GG15 (170-220 HB) est adaptée aux applications de moulage pour des structures qui ne subissent pas de contraintes mécaniques excessives mais qui doivent être résistantes à l'usure.

3. Structure lamellaire et rosace

- La présence de graphite lamellaire et des rosace homogène dans la structure confère à cette fonte une bonne capacité d'amortissement des vibrations, ce qui est crucial pour des applications dans les carcasses de machines, où l'absorption des vibrations est nécessaire pour réduire les effets des charges cycliques.

4. Propriétés mécaniques

- La présence de graphite lamellaire et la dureté de la fonte GG15 sont suffisantes pour des applications où la résistance aux charges statiques est nécessaire.

La fonte GG15 incluent plusieurs axes d'amélioration et d'optimisation;

Premièrement, l'exploration de traitements thermiques spécifiques tels que le recuit ou la trempe pourrait améliorer la résistance mécanique et réduire la fragilité inhérente de la fonte grise.

Deuxièmement, l'ajout d'éléments d'alliage pourrait accroître la résistance à l'usure et aux chocs, tout en maintenant sa bonne machinabilité.

Troisièmement, une modification de la microstructure pour favoriser la formation de graphite sphéroïdal plutôt que lamellaire permettrait d'améliorer la ductilité et la résistance à la traction, ouvrant ainsi la voie à des applications dans des environnements soumis à des charges dynamiques plus élevées.

Enfin, des études supplémentaires sur la comportement en fatigue et la durabilité à long terme de la fonte GG15 dans des conditions industrielles spécifiques seraient nécessaires pour optimiser son utilisation dans des systèmes de machines plus complexes et à hautes performances.

Perspectives :

D'autres traitements peuvent être réalisés pour d'autres utilisations, par exemple :

- Traitements thermiques,
- Traitements par induction
- Traitement de nitruration .
- Traitements par l'ajout des alliages supplémentaires
- Graphitisation contrôlée (modification de la vitesse de refroidissement) .

*Références
bibliographiques*

- [1] **Smith, C.S., & McKee, J.W. (1990).** *A History of Metallography: The Development of Ideas on the Structure of Metals Before 1890.* The MIT Press.
- [2] **HEINE, LOPER, and ROSENTHAL.** **Composition Chimique:** "*Principles of Metal Casting*".
- [3] **WILLIAM, D., Callister, Jr et all** "*Materials Science and Engineering: An Introduction*"
- [4] **PIERRE, R., ROBERGE. et all** *Corrosion Fundamentals: "Corrosion Engineering: Principles and Practice"*.
- [5] **DENNY, A. Jones.** *Localized Corrosion: "Principles and Prevention of Corrosion"*.
- [6] **BAGUENANE, G (1992).** *Thèse d'Ingénieur "Elaboration de la fonte a graphite sphéroïdal ferritique brute de coulée "* ENP
- [7] **BAGUENANE, G. (1996).**"*Cours de Métallurgie*" ; ENP.
- [8] **BAGUENANE, G. (2014)** *Thèse Doctorat Metallurgie "Etude thermodynamique et microstructurale du vieillissement de l'alliage eutectoïde Cu-Al-Ni à basses températures"* ENP.
- [9] **BAGUENANE, G (2006) :** "*Cours des Matériaux* ". UMMTO.
- [10] **BAGUENANE, G.** "*Cours et TD procédé de fabrication II*". UMMTO
- [11] **Techniques de l'ingénieur,** "*Essais mécaniques des métaux ; Essais de dureté*" ;[M123].
- [12] **BENALIA, K (2022).** *Mémoire de Fin d'étude "Etude comparative des caractéristiques micrographiques et des propriétés mécaniques de la surface au cœur d'un arbre en acier S355J2+N dont le diamètre est $\varnothing = 105\text{mm}$ utilise A E.I.AZAZGA"*. UMMTO.
- [13] **NECHICHE, M .** "*COURS DE SPECTOMETRIE*" .UMMTO .
- [14] **MOHELLEBI, F .** *Cours TP Méthodes expérimentales et contrôle des matériaux* . UMMTO
- [15] **ABERKANE, M.** *Cours fatigue des matériaux* .UMMTO

Annexes

Fiche technique



Fonte à graphite sphéroïdale selon 1561

Caractéristiques mécaniques

numéro des matériaux			EN-JL1020	EN-JL1030	EN-JL1040	EN-JL1050
dénomination			EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250	EN-GJL-300
ancienne norme DIN 1691			GG 15	GG 20	GG 25	GG 30
résistance à traction	R _m	N/mm ²	150 - 250	200 - 300	250 - 350	300 - 400
limite d'élasticité 0.2%	R _{p0.2}	N/mm ²	98 - 165	130 - 195	165 - 228	195 - 260
allongement	A	%	0.8 - 0.3	0.8 - 0.3	0.8 - 0.3	0.8 - 0.3
résistance à la compression	s db	-	600	720	840	960
dureté Brinell	HB 30	-	125 - 205	150 - 230	180 - 250	200 - 275
module d'élasticité	E	kN/mm ²	78 - 103	88 - 113	103 - 118	108 - 137

- Toutes les valeurs indiquées sont des valeurs approximatives, valables pour des éprouvettes coulée séparément
- Elles ne correspondent pas aux valeurs mesurées sur les pièces de fonte
- Vous trouvez les valeurs complètes et exactes dans la norme DIN EN 1561

Caractéristiques technologiques:

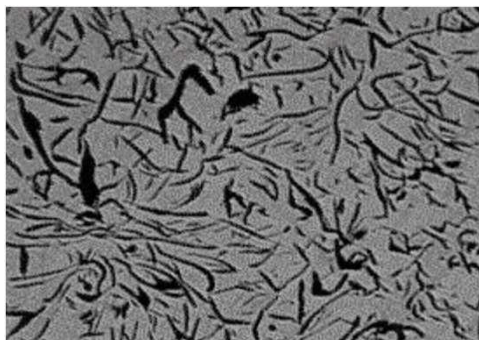
usinabilité	très bonne	très bonne	très bonne	très bonne
résistance à l'usure	moyenne	bonne	très bonne	très bonne
soudabilité	soudabilité é réduite, électrodes spéciales conseillées			

Applications:

matière conseillée pour des pièces dont les parois ne dépassent pas	10 mm	20 mm pompes, armatures	30 mm bâtis, tables de machines-outils, cylindres, pistons	> 300 mm turbines, presses, volants, tables ect.
--	-------	-------------------------	--	--

Structure:

constitution structurelle	ferritique / perlitique	Perlitique
forme de graphite	lamellaire	



sans attaque 1:100

Analyse chimique:

	%C	%Si	%Mn
EN-GJL	2.90 - 3.70	1.70 - 2.50	0.35 - 1.00

pour d'autres renseignements, veuillez vous adresser à nos spécialistes.

Fonderie Hegi SA, CH-3414 Oberburg, Tél.: +41 (0)34 4200 550, E-mail: fonte@hegi.ch

Gußeisen mit Lamellengraphit (Grauguß)

Eigenschaften

DIN
1691

Cast iron with lamellar graphite (grey cast iron); properties
Fonte grise; propriétés

Ersatz für Ausgabe 08.64
und DIN 50 108/01.67

Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, gestattet.

1 Anwendungsbereich

In Verbindung mit den allgemeinen technischen Lieferbedingungen nach DIN 1690 Teil 1 werden in dieser Norm die Eigenschaften von unlegiertem und niedriglegiertem Gußeisen mit Lamellengraphit (Grauguß) in Gußstücken festgelegt, die in Sandformen oder in Formen mit vergleichbarem Wärmediffusionsvermögen hergestellt werden.

Als kennzeichnende Eigenschaften werden unterschieden:

- a) die Zugfestigkeit in getrennt gegossenen oder in angegossenen Probestücken (siehe Tabelle 1), oder
- b) die Härte an Gußstücken (siehe Tabelle 3).

2 Begriffe

2.1 Gußeisen mit Lamellengraphit

Gußeisen mit Lamellengraphit ist ein Eisen-Kohlenstoff-Gußwerkstoff, dessen als Graphit vorliegender Kohlenstoff weitgehend lamellar ausgebildet ist.

2.2 Leichte Gußstücke

Leichte Gußstücke im Sinne dieser Norm sind im allgemeinen Gußstücke mit Gewichten bis 200 kg.

2.3 Mittelschwere Gußstücke

Mittelschwere Gußstücke im Sinne dieser Norm sind im allgemeinen Gußstücke mit Gewichten über 200 bis 1000 kg.

2.4 Schwere Gußstücke

Schwere Gußstücke im Sinne dieser Norm sind im allgemeinen Gußstücke mit Gewichten über 1000 kg.

3 Bezeichnung

3.1 Sortenbezeichnung

Die Sortenbezeichnung von Gußeisen mit Lamellengraphit nach dieser Norm beruht:

- a) auf dem Mindestwert der Zugfestigkeit von Proben, die getrennt gegossenen Probestücken mit einem Rohgußdurchmesser von 30 mm entnommen sind, oder
- b) auf dem Mittelwert der Brinellhärte in einer Wand von 15 mm Dicke, gemessen in einer Tiefe von etwa 2 mm unter der Gußstückoberfläche.

3.2 Normbezeichnung

In Zeichnungen, auf Modellen und bei der Bestellung sind zum Bezeichnen der Gußeisensorte die Werkstoff-Kurzzeichen oder Werkstoff-Nummern für die jeweils kennzeichnende Eigenschaft (siehe Tabellen 1 und 3) wie folgt anzuwenden.

3.2.1 Beispiel für die Zugfestigkeit als kennzeichnende Eigenschaft

Bezeichnung eines Gußeisens mit Lamellengraphit mit einem Mindestwert der Zugfestigkeit von 250 N/mm² im getrennt gegossenem Probestück mit dem Werkstoff-Kurzzeichen GG-25 und der Werkstoff-Nummer 0.6025:

Gußeisen DIN 1691 – GG-25

oder Gußeisen DIN 1691 – 0.6025

3.2.2 Beispiel für die Brinellhärte als kennzeichnende Eigenschaft

Bezeichnung eines Gußeisens mit Lamellengraphit mit einem Mittelwert der Brinellhärte von 190 HB für eine Wanddicke von 15 mm mit dem Werkstoff-Kurzzeichen GG-190 HB und der Werkstoff-Nummer 0.6022:

Gußeisen DIN 1691 – GG-190 HB

oder Gußeisen DIN 1691 – 0.6022

4 Bestellangaben

Zusätzlich zu den Festlegungen in DIN 1690 Teil 1 ist für Gußeisen mit Lamellengraphit zu beachten:

4.1 Kennzeichnende Eigenschaft

Die Bestellung muß eindeutig angeben, ob die Zugfestigkeit oder die Brinellhärte die kennzeichnende Eigenschaft ist, siehe Abschnitte 5.1 und 5.2.

4.2 Nachweis der kennzeichnenden Eigenschaft

Die kennzeichnende Eigenschaft wird nur dann nachgewiesen, wenn dies bei Bestellung vereinbart wird; andernfalls bleibt die Qualitätssicherung dem Hersteller überlassen.

4.2.1 Zugfestigkeit

In der Bestellung ist die Art des Probestückes anzugeben, siehe Abschnitt 5.1, z. B.:

- a) Probe G: für das getrennt gegossene Probestück
- b) Probe A: für das angegossene Probestück, wenn die Form des Probestückes dem Hersteller überlassen bleibt.
- c) Probe K: für Form K des angegossenen Probestückes
- d) Probe H: für Form H des angegossenen Probestückes

4.2.2 Härte

In der Bestellung ist anzugeben, wo die Härte gemessen werden soll, siehe Abschnitt 5.2, z. B.:

- a) direkt in bestimmten Bereichen am Gußstück selbst, oder
- b) an angegossenen Probestücken

Fortsetzung Seite 2 bis 7

Normenausschuß Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

SIEMENS-Vervielfältigung (laut DIN-Merkblatt 3)
Bezugsquelle: ZT TVN oder zuständiges Normenbüro

Tabelle 1. Zugfestigkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit

Sorte		Wanddicken mm		Zugfestigkeit R_m ¹⁾ Einzuhaltende Werte		Erwartungswerte im Gußstück ^{3), 6)}	
				im getrennt gegossenen Probestück ²⁾ N/mm ²	im angegossenen Probestück ³⁾ N/mm ²	Zugfestigkeit ⁴⁾ R_m N/mm ²	Brinellhärte ⁴⁾ HB 30
Kurzzeichen	Werkstoff- Nummer	über	bis		min.	min.	max.
GG-10	0.6010	5 ⁵⁾	40	min. 100	-	-	-
GG-15	0.6015	2,5 ⁵⁾	5	150 bis 250	-	180	270
		5	10		-	155	245
		10	20		-	130	225 ⁷⁾
		20	40		120	110	205
		40	80		110	95	-
		80	150		100	80	-
150	300	90 ⁶⁾	-	-			
GG-20	0.6020	2,5 ⁵⁾	5	200 bis 300	-	230	285
		5	10		-	205	270
		10	20		-	180	250 ⁷⁾
		20	40		170	155	235
		40	80		150	130	-
		80	150		140	115	-
150	300	130 ⁶⁾	-	-			
GG-25	0.6025	5 ⁵⁾	10	250 bis 350	-	250	285
		10	20		-	225	265 ⁷⁾
		20	40		210	195	250
		40	80		190	170	-
		80	150		170	155	-
		150	300		160 ⁶⁾	-	-
GG-30	0.6030	10 ⁵⁾	20	300 bis 400	-	270	285 ⁷⁾
		20	40		250	240	265
		40	80		220	210	-
		80	150		210	195	-
		150	300		190 ⁶⁾	-	-
GG-35	0.6035	10 ⁵⁾	20	350 bis 450	-	315	285 ⁷⁾
		20	40		290	280	275
		40	80		260	250	-
		80	150		230	225	-
		150	300		210 ⁶⁾	-	-

1) Falls bei Bestellung der Nachweis der Zugfestigkeit vereinbart wurde, ist die Art des Probestückes bei Bestellung anzugeben, siehe Abschnitt 4.2.

2) Die Werte beziehen sich auf Probestücke mit 30 mm Rohgußdurchmesser entsprechend einer Wanddicke von 15 mm.

3) Wenn für einen bestimmten Wanddickenbereich keine Festlegungen getroffen werden können, ist dies durch einen Strich gekennzeichnet.

4) Die Werte dienen zur Information, siehe Abschnitt 5.1.3.

5) Dieses Maß ist als untere Grenze des Wanddickenbereiches eingeschlossen.

6) Diese Werte sind Anhaltswerte.

7) Die für den Wanddickenbereich über 10 bis 20 mm genannten Werte umfassen auch Meßergebnisse von getrennt gegossenen Probestücken mit 30 mm Rohgußdurchmesser.

4.3 Weitere Eigenschaften

Falls weitere Eigenschaften zusätzlich zu den kennzeichnenden Eigenschaften eingehalten werden sollen, z. B. Dichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen, so sind diese Eigenschaften, die einzuhaltenden Werte und – falls erforderlich – deren Prüfverfahren bei Bestellung zu vereinbaren, siehe Abschnitt 5.3.

4.4 Zusätzliche Angaben

Falls erforderlich, sind die Gußstückbereiche, an die besondere Anforderungen, z. B. Härte, Zugfestigkeit, gestellt werden, in der Zeichnung und/oder auf dem Modell zu kennzeichnen.

4.5 Prüfbescheinigungen

Die Art der Bescheinigung über Materialprüfungen nach DIN 50 049 ist anzugeben, siehe Abschnitt 10.

5 Anforderungen

Die Wahl des Herstellungsverfahrens und der Zusammensetzung des Werkstoffes bleibt, wenn bei Bestellung nichts anderes vereinbart, dem Gußstückhersteller überlassen.

Hinweise für die Werkstoffwahl durch den Konstrukteur gibt Beiblatt 1 zu DIN 1691.

5.1 Zugfestigkeit als kennzeichnende Eigenschaft

Die Zugfestigkeit wird nur dann durch den Zugversuch nachgewiesen, wenn bei Bestellung angegeben wurde, daß entweder getrennt gegossene oder angegossene Probestücke hergestellt werden sollen, siehe Abschnitt 4.

5.1.1 Zugfestigkeit in getrennt gegossenen Probestücken

Die einzuhaltenden Werte der Zugfestigkeit in getrennt gegossenen Probestücken sind in Tabelle 1 angegeben.

Getrennt gegossene Probestücke werden als Regelprobe für leichte Gußstücke und, falls nicht anders vereinbart, für mittelschwere Gußstücke hergestellt; siehe Abschnitt 2.

5.1.2 Zugfestigkeit in angegossenen Probestücken

Die einzuhaltenden Mindestwerte in angegossenen Probestücken sind in Tabelle 1 angegeben.

Angegossene Probestücke werden als Regelprobe für schwere Gußstücke hergestellt; sie können auch für mittelschwere Gußstücke vereinbart werden.

Bei angegossenen Probestücken wird zwischen den Formen K und H unterschieden; siehe Abschnitt 8.2.

Die Art des Probestückes ist bei Bestellung anzugeben, siehe Abschnitt 4.2.

Durch den engeren Wärmeverbund der Probenform K mit dem Gußstück kommen ihre Eigenschaften denen des Gußstückes näher als die der Probenform H.

Es ist zu beachten, daß für angegossene Probestücke der Mindestwert der Zugfestigkeit einer Gußeisensorte in Abhängigkeit vom Wanddickenbereich niedriger liegt als der Mindestwert für das getrennt gegossene Probestück.

Wenn für mittelschwere und schwere Gußstücke neben der Zugfestigkeit bestimmte Mindestwerte der Brinellhärte in bestimmten Gußstückbereichen eingehalten werden sollen, z. B. wegen erhöhten Verschleißwiderstandes an Gleitbahnen, können die in Tabelle 2 angegebenen Werte vereinbart werden. Wenn zusätzlich auch eine obere Grenze der Brinellhärte gefordert wird, so muß diese aus fertigungs- und prüftechnischen Gründen mindestens 40 Brinell-Einheiten über dem jeweiligen unteren Grenzwert liegen und ebenfalls vereinbart werden. Die Gußstückbereiche, für die die Brinellhärte gefordert wird, sind in der Zeichnung zu kennzeichnen.

Tabelle 2. Mindestwerte der Brinellhärte in gekennzeichneten Bereichen der Gußstücke, z. B. Gleitbahnen, unter Einsatz von Kühlsteinen

Werkstoff-		Mindestwerte der Brinellhärte HB für Wanddicken mm		
		bis 80	über 80 bis 150	über 150 bis (300)
GG-20	0.6020	160	150	–
GG-25	0.6025	180	170	160
GG-30	0.6030	200	190	180
GG-35	0.6035	210	200	190

Wenn das Einhalten von Werten der Brinellhärte in bestimmten Gußstückbereichen vereinbart ist, ist zu beachten, daß die Mindestwerte der Zugfestigkeit im angegossenen Probestück gleichzeitig nicht immer eingehalten werden können.

5.1.3 Zugfestigkeit im Gußstück

Die Hinweise auf die Mindestwerte der Zugfestigkeit und die Höchstwerte der Brinellhärte dienen der Information.

Wenn Werte in bestimmten Bereichen eines Gußstückes eingehalten werden sollen, so sind diese Mindest- bzw. Höchstwerte sowie die Form und Lage der Probestücke, die dem Gußstück entnommen werden sollen, bei Bestellung zu vereinbaren und die jeweiligen Gußstückbereiche in der Zeichnung zu kennzeichnen.

5.2 Die Brinellhärte als kennzeichnende Eigenschaft

Die Brinellhärte wird bevorzugt dann als kennzeichnende Eigenschaft festgelegt, wenn Gußstücke z. B. auf Verschleiß beansprucht werden oder mit hohen Schnittgeschwindigkeiten bearbeitet werden sollen.

Die Bereiche der Brinellhärte an verschiedenen Wanddicken der Gußstücke sind in Tabelle 3 angegeben.

Bei der Bestellung ist zu vereinbaren, in welchen Bereichen der Gußstücke die Brinellhärte nachgewiesen werden soll; im allgemeinen sollen nicht mehr als zwei Prüfstellen vereinbart werden, die jeweils eine weitgehend einheitliche Wanddicke aufweisen. Gußstückbereiche mit großen Querschnittsübergängen oder mit Knotenpunkten sind hierbei auszuschließen. In Zweifelsfällen wird als Wanddicke der doppelte Modul des betreffenden Gußstückbereiches definiert, siehe Beiblatt 1 zu DIN 1691. Die betreffenden Gußstückbereiche sind in der Zeichnung zu kennzeichnen.

Bei der Festlegung der Bereiche der Brinellhärte ist zu berücksichtigen, daß in Tabelle 3 jeweils Wanddickenbereiche zugrunde gelegt wurden, die vereinbarten Prüfstellen am Gußstück aber definierte Wanddicken aufweisen. Es können daher unter Berücksichtigung der vorliegenden Wanddicke engere Bereiche der Brinellhärte, als in Tabelle 3 angegeben, vereinbart werden. Die Breite des zulässigen Härtebereichs sollte jedoch aus fertigungs- und prüftechnischen Gründen nicht weniger als 40 Brinell-Einheiten betragen.

5.3 Weitere Eigenschaften

Weitere mechanische, physikalische und technologische Eigenschaften sind als Anhaltswerte im Beiblatt 1 zu DIN 1691 angegeben.

Wenn neben der Zugfestigkeit und der Brinellhärte weitere Eigenschaften, z. B. Dichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen, in bestimmten Gußstückbereichen eingehalten werden sollen, so sind diese Eigenschaften, die einzuhaltenen Werte sowie die Form und Lage der Probestücke, die dem Gußstück entnommen werden sollen, bei Bestellung zu vereinbaren und die betreffenden Gußstückbereiche in der Zeichnung anzugeben.

Tabelle 3. **Brinellhärte von Gußstücken aus Gußeisen mit Lamellengraphit**

Einzuhaltende Werte an vereinbarten Prüfstellen

Sorte Werkstoff-		Wanddicken mm		Brinellhärte 2) HB 30	
Kurzzeichen 1)	Nummer	über	bis	min.	max.
GG-150 HB	0.6012	2,5	5	-	210
		5	10	-	185
		10	20	-	170
		20	40	-	160
		40	80	-	150
GG-170 HB	0.6017	2,5	5	170	260
		5	10	140	225
		10	20	125	205
		20	40	110	185
		40	80	100	170
GG-190 HB	0.6022	4	5	190	275
		5	10	170	260
		10	20	150	230
		20	40	135	210
		40	80	120	190
GG-220 HB	0.6027	5	10	200	275
		10	20	180	250
		20	40	160	235
		40	80	145	220
GG-240 HB	0.6032	10	20	200	275
		20	40	180	255
		40	80	165	240
GG-260 HB	0.6037	20	40	200	275
		40	80	185	260

1) Die Zahlenangabe im Kurzzeichen entspricht dem Erwartungswert der Brinellhärte in einer Wand von 15 mm Dicke, gerundet auf die nächste Zehnerstelle. Die Sorten GG-170 HB bis GG-260 HB korrespondieren näherungsweise mit den Sorten GG-15 bis GG-35 in Tabelle 1.

2) Die Bereiche der Brinellhärte gelten für den jeweils angegebenen Wanddickenbereich. Da bei einem Gußstück die Wanddicke festliegt, kann aus dem jeweiligen Härtebereich dieser Tabelle ein enger Toleranzbereich der Brinellhärte abgeleitet werden. Der Härtebereich sollte jedoch nicht weniger als 40 Brinell-Einheiten umfassen, siehe Abschnitt 5.2.

5.4 Form und Maße

In Ergänzung zu den allgemeinen Festlegungen in DIN 1690 Teil 1 gelten für Form und Maße von Gußstücken aus Gußeisen mit Lamellengraphit DIN 1680 Teil 1 und Teil 2, sowie insbesondere DIN 1686 Teil 1.

1) Siehe VDG-Merkblatt N 1

Die Schwindung beträgt bei Gußstücken aus Gußeisen mit Lamellengraphit im allgemeinen 1% der Nennmaße. Je nach Gußstückgestalt und Erstarrungsablauf sowie durch Wärmebehandlungen können hiervon Abweichungen auftreten.

6 Fertigungsschweißungen

Fertigungsschweißungen bedürfen der Genehmigung durch den Besteller. Schweißverfahren und Schweißzusätze müssen der bestimmungsgemäßen Verwendung des Gußstückes angepaßt werden.

7 Wärmebehandlung

Die Gußstücke werden im allgemeinen ohne Wärmebehandlung geliefert. Wärmebehandlungen sind bei Bestellung zu vereinbaren, z. B. Wärmebehandlungen zur Verminderung der Eigenspannungen im Gußstück 1), zum Härten und Vergüten sowie zur Verbesserung der Spanbarkeit.

8 Probenahme

Wenn bei Bestellung der Nachweis der Zugfestigkeit vereinbart wurde, werden je nach Art, Größe und Verwendung der Gußstücke für die Zugproben nach DIN 50 109 folgende Probestücke hergestellt, für die die Allgemeintoleranzen nach DIN 1686 Teil 1 gelten.

8.1 Getrennt gegossene Probestücke

Die Probestücke mit 30 mm Rohgußdurchmesser sind aus der gleichen Schmelze und in Formen aus möglichst dem gleichen Formstoff wie das Gußstück zu gießen. Auf ausreichenden Abstand der Probestücke in der Form ist zu achten, um eine gegenseitige Wärmebeeinflussung weitgehend zu vermeiden. Das Probestück ist erst aus der Form zu nehmen, wenn seine Temperatur unter 500 °C gesunken ist.

Für leichte Gußstücke mit Wanddicken unter 10 mm können Probestücke mit Rohgußdurchmessern unter 30 mm vereinbart werden.

8.2 Angegossene Probestücke

Angegossene Probestücke werden in Form der Angußproben K oder H hergestellt, siehe Tabellen 4 und 5 sowie Bilder 1 und 2.

Die angegossenen Probestücke sind vorzugsweise aufrecht an senkrechten Wänden der Gußstücke anzubringen.

8.3 Aus dem Gußstück entnommene Probestücke

Form und Lage der Probestücke, die dem Gußstück entnommen werden sollen, sind bei Bestellung zu vereinbaren und in der Zeichnung anzugeben.

8.4 Wenn Gußstücke wärmebehandelt werden, so müssen im allgemeinen die zugehörigen Probestücke gemeinsam mit diesen wärmebehandelt werden.

8.5 Für Wiederholungsprüfungen ist eine ausreichende Anzahl von Probestücken vorzusehen.

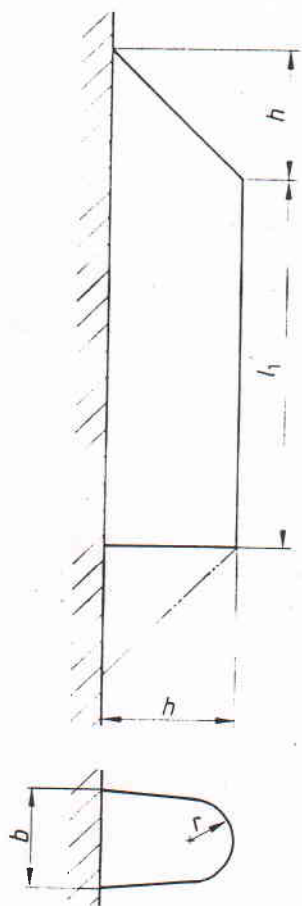


Bild 1. Angußprobe K

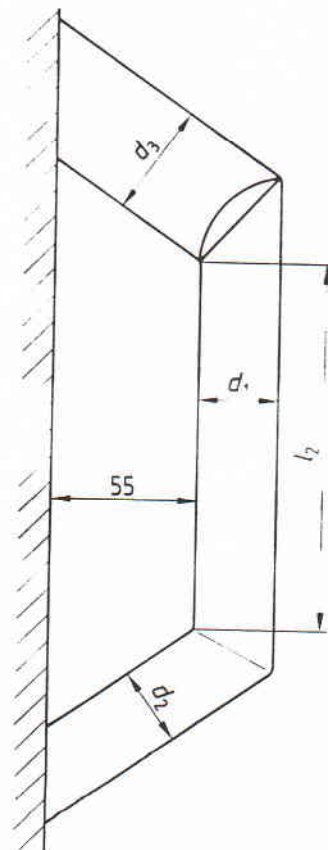


Bild 2. Angußprobe H

Tabelle 4. Angußprobe K

Proben- größe	Maße				Anwendung für Wanddicken mm
	b mm	l_1 mm	r mm	l_1 mm	
K 30	33	50	15	min. 140	bis 80
K 50	53	70	25		über 80

Tabelle 5. Angußprobe H

Proben- größe	Maße				Anwendung für Wanddicken mm
	d_1 mm	d_2 mm	d_3 mm	l_2 mm	
H 30	30	30	50	min. 140	bis 80
H 50	50	50	70		über 80

Tabelle 6. Zugproben

Wanddicken mm		Zugprobe
über	bis	
2,5	10	nach Vereinbarung, z.B. Zugprobe E nach DIN 50 125
10	20	Zugprobe mit Nenndurchmesser 6 mm nach DIN 50 109
20	30	Zugprobe mit Nenndurchmesser 12,5 mm nach DIN 50 109
30	-	Zugprobe mit Nenndurchmesser 20 mm nach DIN 50 109

9 Prüfung

9.1 Prüfverfahren

Prüfungen sind durchzuführen, wenn das Nachweisen der Eigenschaften bei Bestellung vereinbart wurde.

Es gelten folgende Normen:

für den Zugversuch: DIN 50 109 und DIN 50 145.

für die Härteprüfung: DIN 50 351.

Prüfverfahren weiterer Eigenschaften sind zu vereinbaren.

9.2 Zugproben

9.2.1 Aus dem getrennt gegossenen Probestück wird eine Zugprobe nach DIN 50 109 mit einem Nenndurchmesser von 20 mm herausgearbeitet.

9.2.2 Aus dem angegossenen Probestück wird eine Zugprobe nach DIN 50 109 mit einem Nenndurchmesser von 20 oder 32 mm herausgearbeitet.

9.2.3 Aus Probestücken, die dem Gußstück entnommen wurden, werden Zugproben nach Tabelle 6 herausgearbeitet.

9.3 Härteprüfung

9.3.1 Die Härteprüfung nach Brinell wird nach DIN 50 351 mit einem Belastungsgrad von 30 durchgeführt. Je nach Wanddicke sind Durchmesser der Prüfkugeln nach Tabelle 7 zu verwenden.

Tabelle 7. Durchmesser der Prüfkugeln

Wanddicken mm	von 4 bis 6	über 6 bis 12	über 12
Durchmesser der Prüfkugel in mm	2,5	5	10
Prüfkraft in kN	1,839	7,355	29,42

Zur Vorbereitung der Härteprüfung ist die Gußhaut ohne gefügeändernde Wärmeeinwirkung abzutragen.

Die Oberfläche der Proben muß an der Prüffläche metallisch blank, eben, fehlerfrei und so beschaffen sein, daß der Durchmesser des Härteprüfeindrucks einwandfrei gemessen werden kann.

9.3.2 Für mittelschwere und schwere Gußstücke, an denen eine direkte Härteprüfung schwierig ist, können angegossene Probestücke, z. B. nach Bild 3, vereinbart werden.

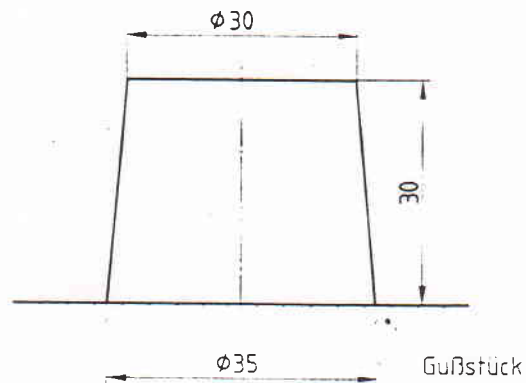


Bild 3. Angegossenes Probestück zur Prüfung der Brinellhärte

Die Angußproben werden gegebenenfalls erst nach einer Wärmebehandlung abgetrennt.

Die Trennfläche wird geschliffen und an ihr die Härte gemessen.

9.3.3 Für Gußstücke, an denen die Brinellhärte nach DIN 50 351 nicht gemessen werden kann, sind ein anderes Härteprüfverfahren und die einzuhaltenden Härtewerte zu vereinbaren.

9.4 Wiederholungsprüfungen

Es gelten die Festlegungen in DIN 1690 Teil 1.

10 Bescheinigungen über Materialprüfungen

Falls über Materialprüfungen eine Bescheinigung nach DIN 50 049 ausgestellt werden soll, ist die Art der Bescheinigung bei Bestellung anzugeben.

Zitierte Normen und andere Unterlagen

DIN 1680 Teil 1	Gußrohreile; Allgmeintoleranzen und Bearbeitungsugaben, Allgemeines
DIN 1680 Teil 2	Gußrohreile; Allgmeintoleranz-System
DIN 1686 Teil 1	Gußrohreile aus Gußeisen mit Lamellengraphit; Allgmeintoleranzen, Bearbeitungsugaben
DIN 1690 Teil 1	Technische Lieferbedingungen für Gußstücke aus metallischen Werkstoffen; Allgemeine Bedingungen
Beiblatt 1 zu DIN 1691	Gußeisen mit Lamellengraphit (Grauguß); Allgemeine Hinweise für die Werkstoffwahl und die Konstruktion, Anhaltswerte der mechanischen und physikalischen Eigenschaften
DIN 50 049	Bescheinigung über Materialprüfungen
DIN 50 109	Prüfung von Gußeisen mit Lamellengraphit (Grauguß); Zugversuch
DIN 50 125	Prüfung metallischer Werkstoffe; Zugproben; Richtlinien für die Herstellung
DIN 50 145	Prüfung metallischer Werkstoffe; Zugversuch
DIN 50 351	Prüfung metallischer Werkstoffe; Härteprüfung nach Brinell
VDG-Merkblatt N 1 *)	Vermeiden und Beseitigung von Eigenspannungen in Gußstücken aus Gußeisen mit Lamellengraphit (Jun: 1961)

Frühere Ausgaben

DIN DVMA 109: 09.33; DIN 50 108: 01.47, 10.50, 01.67; DIN 1691: 04.28, 08.29, 07.33, 08.42, 11.49x, 08.64

Änderungen

Gegenüber der Ausgabe August 1964 und DIN 50 108/01.67 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Die Zugfestigkeit im getrennt gegossenen Probestab wird als Bereich angegeben.
- Es wurden Mindestwerte der Zugfestigkeit im angegossenen Probestab aufgenommen.
- Es wurden Erwartungswerte für Zugfestigkeit und Brinellhärte im Gußstück aufgenommen.
- Es wurden Werte der Brinellhärte für Gußstücke aufgenommen.
- Es wird zwischen Zugfestigkeit und Brinellhärte als kennzeichnender Eigenschaft unterschieden.
- Die Sorte GG-40 sowie die Angaben über die Biegefestigkeit und magnetische Induktion wurden gestrichen.
- Die Angaben über die Probenahme wurden aus DIN 50 108 übernommen.
- Der Text wurde vollständig überarbeitet.

Erläuterungen

Der Zusammenhang mit ISO/DIS 185 – 1983

Grey cast iron – Classification

Fontes grises de moulage – Classification

Grauguß – Sorteneinteilung

kann wie folgt beschrieben werden:

ISO/DIS 185 – 1983 führt die kennzeichnenden Eigenschaften einzeln auf:

- die Zugfestigkeit im getrennt gegossenen Probestück
- die Zugfestigkeit im angegossenen Probestück
- die Brinellhärte, aber als Anhang.

DIN 1691 faßt die Werte der Zugfestigkeit im getrennt gegossenen und angegossenen Probestück in einer Tabelle zusammen und gibt die Werte der Brinellhärte in einer eigenen Tabelle, aber als Bestandteil der Norm an.

Die Werte für Zugfestigkeit und Härte sind in beiden Normen identisch, sie unterscheiden sich lediglich im redaktionellen Aufbau.

Internationale Patentklassifikation

C 22 C 37/00

C 21 D 5/00

G 01 N 33/20

*) Zu beziehen durch VDG-DOK, Postfach 82 25, 4000 Düsseldorf 1

Annexe 3



Désignation du Matériau

Fonte GG15 Pour Moteur

Selon la Norme DIN1691

Analyse :

Date/Heure	Éch	Poids	Résultats
12.09.24 13:45	001	358.7 mg	3.4971%C 2/2 0.0446 % S 3/1 050
12.09.24 13:48	002	369.5 mg	3.4129%C 2/2 0.0473 % S 3/1 050

moyenne pour C : 3.45500

Ecart type : 0.05954 / 1.72%

moyenne pour S : 0.04595

Ecart type : 0.00191 / 4.15%

Annexe 4



OZGUMUS DOKUM SAN. TIC. A.S.
MERSIN YOLU UZERI YESILOBA
ADANA

TEL : (0322) 441 07 07 FAX : (0322) 441 14 14

SPEKTROMETRE ANALİZ SONUÇLARI

Numune No/ sample ID25.05.2011

Malzeme / material :

Müşteri / customer : 02

Boyut / dimension :

Siparis / commission : ARİMEKS

Sarj Materyalleri / filler metals :

Labor Nr. / lab-no. :

Isil İşlem / heat treatment :

Protokol-No. / PTQ-no. :

Ocak No : / heat-no. :

Spektrometre Foundry-MASTER

Kalite / grade : GG15

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	92.3	3.42	L 2.28	0.633	H 0.848	0.0353	0.0657	0.0791
Ort	92.3	3.42	L 2.28	0.633	H 0.848	0.0353	0.0657	0.0791
	Ni	Al	Co	Cu	Mg	Nb	Ti	V
1	0.0324	0.0095	< 0.0050	0.0375	0.0020	0.0524	L 0.0490	L 0.0403
Ort	0.0324	0.0095	< 0.0050	0.0375	0.0020	0.0524	L 0.0490	L 0.0403
	Pb	Sn	B	Zr	As	CE	CE	
1	< 0.0010	0.0121	0.0046	0.0526	0.0237	3.95	4.18	
Ort	< 0.0010	0.0121	0.0046	0.0526	0.0237	3.95	4.18	

Şehir / town

Tarih / date

5/25/2011

Analiz Eden / tester

Mühendis / engineer

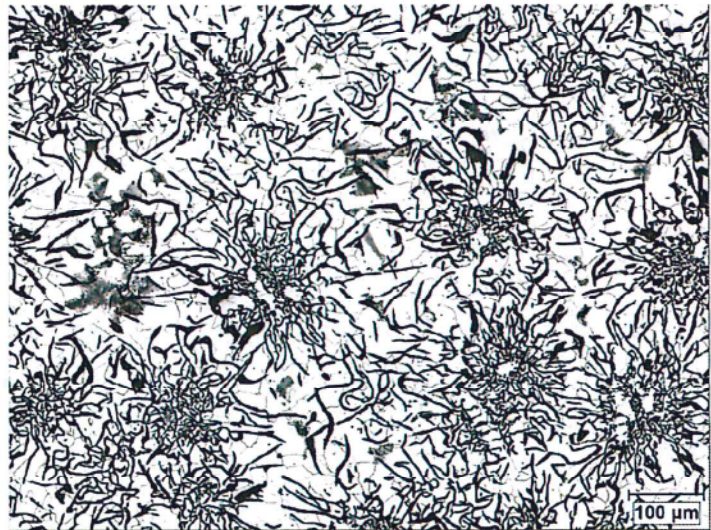
ARİMEKS DİSTİCARET LTD. ŞTİ.
İstiklal Cad. 178 Beyoğlu-İSTANBUL
Tel:0090 212 251 40 80 Fax:251 40 68
Beyoğlu V.S. 078 003 1280

Güney DEMİR
Metalurji ve Malzeme Müh.
Dip. No: 5584 / 01.782

Prüfbericht / Test report	1702184	Teil / Part	-
Besteller / Customer	T+F Tube and Fitting Stahlhandel GmbH Breitscheider Weg 117 40885 Ratingen	Bestell-Nr. / Order-no.	-

Angaben zum Versuch / Information to procedure or practice

Werkstoff / Material	GG 15
Schmelze-Nr. / Heat-no.	-
Proben-Nr. / Specimen-no.	2184
Prüfung / Examination	Gefügebeurteilung
Bild-Nr. / Picture-no.	1
Maßstab / Magnification	100 : 1
Ätzung / Etching	3% Nital



Gefügebeurteilung / Structure evaluation

Es liegt ein ferritisches Grundgefüge mit geringen Anteilen an Perlit vor. Die Graphit-
ausprägung ist lamellar und entspricht dem
eingesetzten Werkstoff.

Ausprägung nach DIN EN ISO 945-1: I B 3/4

Werkstoff / Material	GG 15
Schmelze-Nr. / Heat-no.	-
Proben-Nr. / Specimen-no.	2184
Prüfung / Examination	nichtmetallische Einschl.
Bild-Nr. / Picture-no.	2
Maßstab / Magnification	100 : 1
Ätzung / Etching	ungeätzt



Gefügebeurteilung / Structure evaluation

nichtmetallische Einschl.

Die Matrix wies keine signifikanten
nichtmetallischen Einschlüsse auf.

Härtewerte HBW 2,5 / 187,5

107 HBW / 106 HBW / 113 HBW

Veröffentlichung dieses Teiles dieser Unterlage ohne vorherige Zustimmung - No part of this document may be reproduced without prior permission - GMA

Prüfdatum Date of Examination	22.03.2017	Freigabe / Release GMA Ort/Datum/Name Place/Date/Name	Kunde - TÜO / Client - TAO Ort/Datum/Name Place/Date/Name
Prüfart Place	Dortmund	Dortmund, den 30.03.2017  P. Fever	
Prüfer Examiner	J.Tunkel  	Unterschrift / Signature	Unterschrift / Signature

ERGEBNIS DER WERKSTOFFPRÜFUNG
MATERIAL TEST REPORT

BESTIMMUNG DES GEHALTS AN NICHTMETALLISCHEN EINSCHLÜSSEN
DETERMINATION OF CONTENT OF NONMETALLIC INCLUSIONS

Prüfbericht / Test report	1702184	Teil / Part	-
Besteller / Customer	T+F Tube and Fitting Stahlhandel GmbH Breitscheider Weg 117 40885 Ratingen	Bestell-Nr. / Order-no.	-
		Gegenstand / Article	Bruchstück
		Proben-Nr. / Test-no.	2184
		Chargen-Nr. / Heat-no.	-
		Werkstoff / Material	GG 15

Prüfvorschrift / Examination procedure	DIN 50602 ; Verfahren K1
--	--------------------------

Lfd. Pr.-Nr. Specimen-No.	Ausgewertete Fläche Observed surface [mm²]	Größenkennziffer Various indices	Einschlussart / Inclusion Type										Multiplikation und 1. Zwischensumme			
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	Sulfide	Oxide			
			0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20					
M1	218	SS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		OA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
		OS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
		OG	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,3
M2	140	SS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		OA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
		OS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
		OG	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,1
		SS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		OA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
		OS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
		OG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
Summe / Sum:			358	mm ²												

Ergebnis / Result:			
		Sulfide	Oxide
2. Zwischensumme		0,00	0,40
Summenkennwert	K1	0,00	1,12
Summenkennwert	K2	0,00	0,00
Summenkennwert	K3	0,00	0,00
Summenkennwert	K4	0,00	0,00
Summenkennwert auf 1000 mm ² umgerechnet			
Die gestellten Anforderungen an die Bestellvorschrift sind Requirements of order specification are		<input type="checkbox"/> erfüllt / accepted	<input type="checkbox"/> nicht erfüllt / not accepted

Prüfdatum Date of examination	13.04.2017	Freigabe / Release GMA Ort/Datum/Name Place/Date/Name	Kunde - TÜO / Client - TAO Ort/Datum/Name Place/Date/Name
Prüfart Place	Dortmund	Dortmund, den 13.04.2017	
Prüfer / Bearbeiter Examiner / Originator	B. Steinert	 Unterschrift / Signature	Unterschrift / Signature