

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingénierat
Département : Métallurgie
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Métallurgie.
Spécialité : Génie des Surfaces
Métalliques

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

**Elaboration des Fontes Grises et leurs Caractérisations
Mécaniques et Tribologiques**

Présenté par : ANTEUR MOHAMED

Encadrant : Touhami Mohamed Zine

Grade Professeur

Université Badji-Mokhtar-Annaba

Jury de Soutenance :

BOUDEBANE Said	Professeur	Badji-Mokhtar-Annaba	Président
TOUHAMI Mohamed Zine	Professeur	Badji-Mokhtar-Annaba	Encadrant
MECHACHTI Said	Professeur	Badji-Mokhtar-Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord le bon dieu de m'avoir donné la force, la volonté et le courage pour l'élaboration de ce travail.

Je remercie mon promoteur TOUHAMI MOHAMED ZINE pour avoir bien voulu m'encadrer et pour ses précieux conseils et orientations.

Mes remerciements vont également à tous mes enseignants, particulièrement les enseignants de la spécialité Génie des Surfaces Métalliques, ainsi que tous les responsables et le personnel de la faculté de Sciences de l'Ingénierat

Il m'est particulièrement agréable de remercier aussi tous mes amis du département Métallurgie.

Je dédie ce travail :

*A la mémoire de mon père
A ma mère que dieu la protège
A mes frères
A toute ma grande famille
A tous mes amis.*



Sommaire

INTRODUCTION	9
Chapitre 1. Recherche et analyse bibliographiques sur les fontes	
1.1 Définition	11
1.2 ELABORATION DE LA FONTE.....	11
1.2.1 Description du haut fourneau.....	11
1.2.2 Matières premières.....	11
1.2.3 Le minerai de fer.....	12
1.2.4 Le coke.....	13
1.2.5 Les fondants.....	13
1.2.6 Flux des matières dans une usine métallurgique.....	13
1.2.7 Agglomération.....	14
1.2.8 La cokerie.....	14
1.3. Introduction de la charge dans l'HF.....	15
1.3. 1.Description physico-chimique du haut fourneau.....	16
1.4. Les fontes du Haut Fourneau.....	17
1.4.2. Composition chimique de la fonte.....	18
1.4. 3. Classification industrielle de la fonte	19
1.4.4. Fontes grises.....	19
1.4.5. Fonte grise à graphite lamellaire (GL).....	19
1.4.6. Fontes à graphite sphéroïdal (GS).....	19
1.4. 7. Fontes à graphite vermiculaire (GV).....	20
1.4.8. Fontes blanches et fontes trempées.....	20
1.4.9. Fontes malléables.....	20
1.4.10. La fonte ductile à trempe bainitique (ADI).....	20
1.4.11. Fontes spéciales alliées.....	21
1.5. Fontes grises à graphite sphéroïdal GS (Les fontes ductiles)	18
1.5.1. Élaboration des fontes GS.....	19
1.5.3. Définition desFontes grises à graphite lamellaire (GL)	20
1.6. Les Fontes malléables.....	21
1.6.1. Élaboration des fontes malléables.....	21

1.7. Influence des éléments d'alliage sur les fontes	25
1.7.1. Les éléments normaux	25
1.7.1.1. Le carbone	25
1.7.2.2. Le Silicium	25
1.7.7.3. Influence du silicium sur la vitesse de refroidissement	25
1.7.7.4. Influence du carbone et du silicium	26
1.7.7.5. Le phosphore	26
1.7.7.6. Le soufre	26
1.7.7.7. Le manganèse	26
1.8. Les éléments d'additions	27
1.8.1. Le nickel	27
1.8.2. Le chrome	27
1.8.3. Le molybdène	27
1.8.4. Le cuivre	28
1.8.5. Le Vanadium	28
1.8.6. Le Titane	29
1.8.7. L'Etain	29
1.8.8. L'Aluminium	29
1.8.9. Le Tellure	29
1.9. Influence de la vitesse de refroidissement sur la microstructure et les propriétés mécanique microstructures des fontes	30
1.9.1. Décomposition de l'austénite	30
1.9.2. L'austénite	30
1.9.3. La Cémentite	31
1.9.4. La Perlite	31
1.10. Comportement mécanique	32
1.10.1. Caractéristiques mécaniques des fontes grises lamellaires	32
1.10.2. Facteurs exerçant une influence sur les caractéristiques mécaniques	32

1.10.2.1.	Composition chimique.....	32
1.10.2.2.	Microstructure.....	32
1.10.2.3.	Influence de l'épaisseur.....	33
1.10.2.4.	Caractéristiques mécaniques fondamentales.....	33
1.10.2.5.	Résistance à la traction.....	33
1.10.2.6.	Dureté des fontes.....	34
1.10.2.7.	Module d'élasticité.....	35
1.11.	Comportement tribologique	36
1.11.1.	Evaluation de la résistance à l'usure.....	36
1.11.2.	Usure due aux impacts et aux fluides.....	37
1.11.3.	Usure due au frottement entre corps solides.....	37
1.11.4.	Principe de l'usure abrasive.....	37
1.11.5.	Influence de la dureté de l'abrasif.....	38
1.11.6.	Influence de la vitesse.....	38
1.11.7.	Influence de la microstructure.....	39
1.11.8.	Phénomènes de surface dans l'usure des Fontes.....	39
1.11.9.	Les couches d'oxydes.....	39
1.11.10.	Les films de graphite.....	40
1.12.	Comportement électrochimique.....	40
1.12.1.	Résistance de polarisation.....	40
1.13.	DIFFERENTS TYPES DE CORROSION.....	43
1.13.1.	Corrosion générale.....	43
1.13.2.	Corrosion galvanique.....	43
1.13.3.	Corrosion localisée.....	43
1.13.4.	Corrosion par piqûres.....	44
1.13.5.	Corrosion intergranulaire.....	44
1.13.6.	Corrosion par crevasse.....	44
1.13.7.	Autres formes de corrosion.....	44

1.13.7.1. Corrosion-Erosion.....	44
1.13.7.2. Corrosion-cavitation.....	44
1.13.7.3. Corrosion sous contrainte.....	45
1.14. FACTEURS INFLUENCANTS LA CORROSION	45
Chapitre 2. Présentation de quelques résultats expérimentaux inspirés de la littérature	
Comportement tribologique de la fonte GS	46
2.1. Usure par abrasion.....	46
2.2. Coefficient de frottement des fontes GS.....	47
3. Conclusions.....	48

Liste des figures

Figure 1: Schéma d'ensemble (gauche) et une photographie (droite) d'un haut fourneau	11
Figure 2 : Photographie d'une roche de minerai de fer (Hématite)	13
Figure 3 : Photographie d'une roche de coke.....	13
Figure 4 : Représentation schématique d'une usine d'agglomération.....	14
Figure 5 : Schéma d'une cokerie.....	15
Figure 6 : Création et circulation de CO et CO ₂ entre les couches de coke et de minerai.....	16
Figure07: Micrographie d'une fonte à graphite Sphéroïdal à matrice Ferritique.....	22
Figure 08 : Fonte grise lamellaire sans attaque.....	24
Figure 09: Influence du Si sur la vitesse de refroidissement.....	26
Figure 10 : Structure d'une fonte GS à matrice ferritique.....	29
Figure 11 : Influence de quelques éléments sur la dureté de la ferrite.....	30
Figure 12: Diagramme d'équilibre métastable Fe - Fe ₃ C.....	30
Figure 13 : Structure d'une fonte GS à matrice austénitique	31
Figure 14 : Répartition de la perlite dans les fontes grises.....	32
Figure 15: Les différents modes d'usure	38
Figure 16: Evolution de l'usure en fonction du rapport Ha / Hm	39
Figure 17 : Courbes élémentaires anodiques et cathodique et courbe globale de polarisation.....	41
Figure 18 : Courbe $\log I = f(E)$ et droites de Tafel.....	42
Figure 19 : Représentation schématique d'un système de corrosion	42
Figure 20: Interface métal/électrolyte.....	42
Figure 21: Courbe de polarisation anodique caractéristique d'un métal passivable.....	43
Figure 22: Définitions du potentiel de piqûres et du potentiel de repassivation.....	43
Figure 23 : Variation de la perte de masse en fonction du temps de glissement de la fonte GS.....	47
Figure 24: Variation du coefficient de frottement en fonction de la microstructure.....	48

Listes des tableaux

Tableau 1. Matières premières introduites dans le Haut Fourneau.....	14
Tableau 2. Composition chimique des différents types de fonte d'HF	18
Tableau 3. Les propriétés mécaniques de la fonte GV	20
Tableau 4 . Classification d'après essai sur barreau coulé à part (Tableau de la norme NF A 32-101 de juin 1987)	34
Tableau 5. Dureté Brinell d'échantillons, à l'état brut de coulée et traités (ferritiques), en fonction du diamètre des barreaux coulés.....	35
Tableau 6. Module d'élasticité obtenu par les méthodes dynamiques et par les méthodes statiques pour les fontes à graphite lamellaire.....	36
Tableau 7. Facteurs de corrosion	45

INTRODUCTION :

Le fer est l'un des métaux le plus employé et lorsqu'il est allié au carbone et à d'autres éléments, il offre une grande variété d'alliage de fontes et d'aciers. La fonte était déjà produite en Chine durant la période des royaumes combattants (17^{ème} siècle av. J.-C.). En Europe, elle n'a fait son apparition qu'au 14^{ème} siècle avec le développement des hauts-fourneaux au charbon [1].

Les propriétés de la fonte se sont améliorées et ceci a permis à ces dernières d'accéder à de nouveaux domaines d'application pour des produits de la vie quotidienne. Avec l'industrialisation, la fonte est devenue un matériau très important [1].

Une fonte, qu'elle soit produite dans une usine sidérurgique pour être transformée en acier ou qu'elle soit élaborée dans une fonderie, afin de couler des pièces dans des moules, peut se définir comme un alliage **à base de fer et de carbone**, dont la teneur en carbone est suffisante pour que la fusion et la solidification se produisent dans un intervalle de température nettement plus bas que le point de fusion du fer et relativement étroit, soit généralement entre 1100 et 1350°C.

Nous pouvons remarquer qu'au-delà d'environ 2 % de carbone, la solidification impliquait la formation directe (vers 1150 °C) d'un **agrégat cristallin** dit « **eutectique** » qui a une importance capitale pour toutes les fontes dont il constitue une partie essentielle de la structure [2].

Une solidification eutectique, se produisant par exemple à 1150 °C pour une teneur de 4,3 % de carbone dans un alliage fer-carbone, permet de couler la fonte avec les plus grandes facilités et d'obtenir des pièces sans défauts. Ceci explique l'importance industrielle Des fontes de composition quasi eutectique, même si leur résistance mécanique nominale n'est pas des plus élevées [2].

La fonte est l'un des alliages destinés à la fonderie. Parmi les nuances de fontes (alliage fer-carbone à haute teneur en carbone 2 à 6%) on distingue : des fontes ordinaires, fonte blanche très dure mais cassante, fonte grise la plus courante des fontes spéciales : fonte GL (à graphite lamellaire), fonte GS (à graphite sphéroïdal) se distinguant par la forme prise par le graphite et donnat des caractéristiques particulières en particulier pour l'usinage [1].

Historiquement et jusqu'à l'heure actuelle, les fontes grises à différentes matrices ferritiques, perlitiques , ferrito- perlitiques présentant différentes morphologies de graphite lamellaire et sphéroïdale trouvent une large application dans différents secteurs comme la construction mécanique et autres.

Les fontes grises à graphite lamellaire (FGL) et sphéroïdale (FGS) se distinguent par deux importantes propriétés spécifiques et mécaniques.

Les propriétés spécifiques à compter sont la **conductivité thermique (W/m·°C)**, la **capacité thermique spécifiques (J/kg °C)**, la **résistivité électrique spécifique (Ω mm²/m)**, la **densité (kg/dm³)**.Cependant les propriétés mécaniques sont le coefficient de Poisson, le module d'élasticité, la limite

d'endurance, l'effort de tension ($R_{p0,2}$ (MPa)), l'effort de rupture (R_m (MPa)), l'allongement (A (%)) et le module d'élasticité (GPa).

La structure finale des fontes GL et GS est conditionnée principalement par l'effet de la composition chimique (Si, Mn), la vitesse de refroidissement. Cette structure influence considérablement les propriétés mécaniques. Ajoutons à cela, l'effet des traitements thermiques à savoir la trempe suivi de revenus ainsi que les traitements de surface, trempe par induction, les traitements thermochimiques nitruration et autres ont une action bénéfique sur l'augmentation des propriétés de surfaces surtout les fontes exposées à des fortes sollicitations de frottement.

La tendance actuelle est la considération des propriétés mécaniques, tribologiques et électrochimiques des fontes GL et GS à l'état brut de coulée, après traitement thermique et de surfaces.

Le mémoire de fin d'études est scindé en deux importants chapitres, le premier consiste principalement à une étude bibliographique qui comporte essentiellement les types de fontes et leurs modes d'élaboration, l'influence des éléments d'alliages, l'influence de la vitesse de refroidissement sur la microstructure et les propriétés mécaniques, tribologiques et électrochimiques. Le deuxième chapitre est réservé à la présentation de quelques expérimentaux issus de la bibliographie.

Chapitre 1. Recherche et analyse bibliographiques sur les fontes

1.1. Définition :

Le terme fonte fait référence aux alliages fer-carbone-silicium, contenant plus de 2.14% de carbone, et habituellement de 1.2 à 3.5% de silicium et d'autres éléments tels que, le manganèse, phosphore et soufre. La fonte est fondue dans des cubilots ou fours à induction. Sa composition et sa vitesse de refroidissement détermineront la nuance grise ou blanche de solidification [2].

1. 2. ELABORATION DE LA FONTE

L'agrégat principal utilisé pour l'élaboration de la fonte est le haut fourneau, dans lequel se déroule le processus métallurgique de réduction, fusion, ainsi que la carburation du fer.

Le but principal du haut fourneau est d'extraire le métal (fer) de son minerai et sa séparation de la gangue.

Les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte sont :

- Le minerai de fer
- Le coke.
- Les fondants (addition).

1.2.1. Description du haut fourneau

Le haut fourneau est considéré comme l'un des réacteurs industriels les plus complexes. Sa principale fonction est la production de la fonte, alliage de fer saturé en carbone. Ses dimensions varient entre 1 et 14 m de diamètre au creuset et peuvent atteindre jusqu'à 90 m de hauteur, en fonction de la production recherchée qui peut aller jusqu'à 9000 tonnes par jour (Burteaux, 1994) pour les fourneaux les plus productifs. On compte à peu près 1500 hauts fourneaux dans le monde [3].

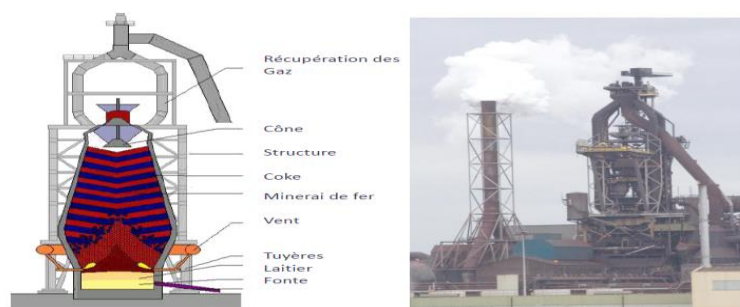


Fig. 1: Schéma d'ensemble (gauche) et une photographie (droite) d'un haut fourneau.

Le haut fourneau est un réacteur à contre-courant dans lequel les matières premières (coke, minerai de fer et aggloméré) introduites solides en haut du fourneau réagissent et échangent de la chaleur avec les gaz réducteurs ascendants. Ceux-ci proviennent de l'oxydation partielle du charbon et de l'air chaud injectés au niveau des tuyères et de la gazéification du coke. Au centre du four, les oxydes de fer et le fer fondent et forment la fonte par réaction avec le carbone du coke. Fonte et laitier (oxydes minéraux fondus) sont extraits alternativement par le bas du four [3].

On identifie cinq zones principales dans le haut fourneau.

- **Le gueulard** : Partie haute du four, par où sont chargés les solides et évacués les gaz.
- **La cuve** : Partie qui a la forme d'un cône évasé vers le bas. Cette forme géométrique favorise l'écoulement de la charge solide et dans une certaine mesure contribue à la réduction de la charge (en faisant converger les gaz, lors de leur ascension, sur un volume rétrécissant) dès son introduction dans le fourneau.
- **Le ventre** : Partie intermédiaire entre la cuve et les étalages. L'état des matières (solides ou liquides) et les phénomènes physicochimiques diffèrent grandement à ce niveau selon la position radiale.
- **Les étalages** : Région où les oxydes de fer non encore complètement réduits entrent en fusion (représentée par la zone de fusion dans le schéma). Contrairement à la cuve, cette zone a la forme d'un tronc de cône inversé. Cette forme favorise la régularisation de la descente de la charge et son acheminement vers la zone des tuyères et aussi la distribution du gaz vers la partie supérieure en améliorant l'efficacité de réduction.
- **Le creuset** : Zone où s'accumulent les liquides (fonte et laitier) avant d'être extraits (trou de Coulée).

1.2.2. Matières premières

Les matières premières destinées pour l'élaboration de la fonte sont :

- Le minerai de Fer.
- Le coke.
- Et les fondants.

1.2.3. Le minerai de fer

Ce sont des roches contenant le fer en quantité importante et économiquement peuvent être traités en procédé métallurgique. Selon la forme de combinaisons chimique on distingue plusieurs types de minerais de fer :

- la magnétite (Fe_3O_4), sa couleur varie du gris foncé au noir.
- l'hématite rouge (Fe_2O_3), sa couleur varie du rouge foncé au gris foncé.
- l'hématite brune ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sa couleur varie du noir au jaune.
- fer spathique ou sidérose (FeCO_3), sa couleur varie de la jaune pâle au gris [4].

Minerai de fer : Hématite



Fig. 2: Photographie d'une roche de minerai de fer (Hématite)

1.2.4. Le coke

Généralement plus de 90% des fontes sont produites avec du coke. Le coke est obtenu par cokéfaction de la houille. Selon les variétés de la houille utilisée, le coke est constitué de:

78 -83%	carbone
8 - 11%	cendre
2 - 6%	H ₂ O
0,8- 1,2%	Soufre
2 - 3%	éléments volatils

Le rôle du coke dans le haut fourneau est :

- Fournir de la chaleur nécessaire pour la marche du processus du haut fourneau.
- Réduction du fer et des alio-éléments de leurs liaisons dans le minerai et en même temps la carburation du fer.
- Ameubler la charge dans le haut fourneau afin d'avoir une bonne perméabilité aux gaz, grâce à sa grande résistance à l'écrasement [4].

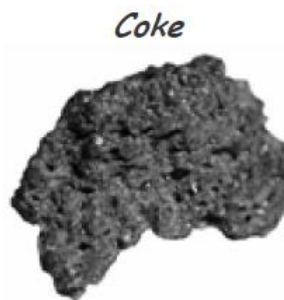


Fig. 3: Photographie d'une roche de coke

1.2.5. Les fondants

Les fondants sont utilisés dans la charge du haut fourneau pour réduire la température de fusion de la gangue, pour la scarification de la soudure du coke et enfin pour l'obtention du laitier fluide ayant une bonne capacité d'absorption du soufre et du phosphore, ces deux derniers éléments sont indésirables dans la composition de la fonte.

Comme fondants, on utilise le plus souvent le calcaire CaCO_3 et très rarement la dolomite $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ [4].

1.2.6. Flux des matières dans une usine métallurgique

Selon la tableau 1, la charge avant d'être introduite dans le haut-fourneau subit une préparation préalable.

Tableau 1. Matières premières introduites dans le Haut Fourneau

Minerai de fer	Coke	Fondant
Concassage Broyage Calibrage Enrichissement Agglomération	Concassage Enrichissement Cokéfaction Séparation Calibrage	Broyage Calibrage Séparation

1.2.7. Agglomération

Le minerai de fer brut présente rarement les caractéristiques nécessaires (teneur en fer, granulométrie, réductibilité, tenue mécanique) à son introduction directe dans le haut fourneau. Le minerai est donc préalablement transformé en un produit mieux adapté (principalement des boulettes ou aggloméré).

La fonction principale d'une usine d'agglomération est donc de transformer et de préparer la charge minérale avant le haut fourneau. Elle assure l'amélioration de la nature physique, chimique et/ou minéralogique des matières premières pour pouvoir diminuer la mise au mille, augmenter la qualité de la fonte produite et améliorer la productivité. Son Principe est de porter le minerai, sous forme de micro-boulettes, à haute température (1200°C) pour, d'une part, en éliminer les matières volatiles et, d'autre part, provoquer une fusion partielle de la charge qui conduit à une agglomération des particules. Cette charge plus ou moins poreuse est formée, qui est ensuite cassée et criblée à chaud pour produire les blocs d'agglomérés envoyés au Haut fourneau [5].

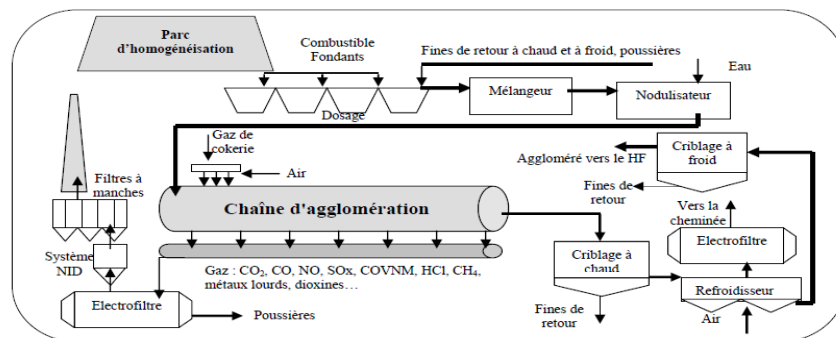


Fig. 4 : Représentation schématique d'une usine d'agglomération

1.2.8. La cokerie

Cette unité a pour fonction la transformation du charbon naturel en coke, matériau carboné mieux adapté au fonctionnement du haut fourneau.

Plus précisément, les avantages de ce procédé sont de :

- réduire le taux de matières volatiles du charbon,

- fritter les grains de charbon, lors du passage par la phase plastique de façon à obtenir une résistance mécanique du coke suffisante,
- avoir une granulométrie du produit adaptée au haut fourneau (diamètre de moins de (80 mm), qui assure une bonne perméabilité,
- récupérer les hydrocarbures sous forme de gaz et de goudrons, pour être valorisés.

La cokéfaction est essentiellement une pyrolyse, c'est-à-dire une cuisson en l'absence d'oxygène. Elle consiste à chauffer le charbon à haute température, à l'abri d'air, puis

« Éteindre » le coke produit en versant de l'eau pour le refroidir et éviter qu'il ne brûle au défournement [5].

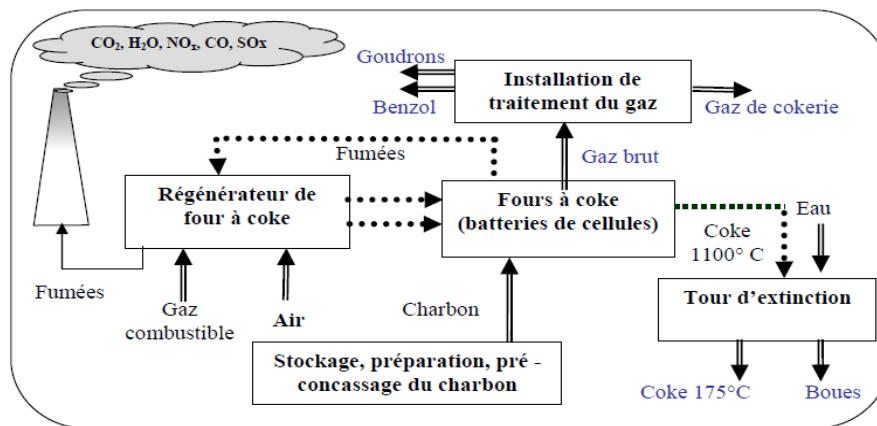


Fig.5 : Schéma d'une cokerie

1.3. Introduction de la charge dans l'HF

❖ Charge introduite

Minerais de fer et addition	2160 kg/t de fonte
Fondant (calcaire)	470 kg/t de fonte
Coke	960 kg/t de fonte
Rend chaud (humide)	3 125 kg/t de fonte
Total =	6715 kg/t de fonte

❖ Produits obtenus

Fonte	1000 kg
Laitier	905 kg/t de fonte
Poussière de gaz	130 kg/t de fonte
Gaz de Gueulard (humide)	4680 kg/t de fonte
Total =	6715 kg

C'est par le gueulard que la charge est introduite à l'aide d'un skip (monte charge). Les proportions du minerai de fer, fondants et du coke sont définies au préalable suivant le type de fonte à élaborer.

Le minerai de fer et les fondants sont introduits de telle façon à former des couches qui seront séparées par des couches de coke. Il s'établit un courant descendant des matières d'abord solides, puis pâteuses et enfin liquide qui traversent le haut fourneau en quelques heures (la durée dépend du volume et de la hauteur du haut-fourneau).

L'air chaud provenant des cowpers (régénérateurs de chaleur chauffés par le gaz de gueulard) est soufflé par les tuyères, ainsi l'oxygène contenu dans l'air chaud participe à la combustion du coke en le transformant en oxyde de carbone (CO), il en résulte un courant gazeux ascendant qui traverse aussi le haut-fourneau en quelques secondes.

Le courant gazeux possède deux fonctions :

a) Transmettre la chaleur obtenue près des tuyères (1800°C) à la charge. Donc la charge descendante se chauffe jusqu'à une température de 1500°C à son arrivée au creuset.

b) La deuxième fonction est la réduction des différents oxydes.

La réaction fondamentale de réduction lors du processus métallurgique dans le haut-fourneau est la réduction du fer. L'agent réducteur est le carbone et son oxyde (CO), mais le carbone est plus énergétique que le CO. Donc leur rôle est d'éliminer l'oxygène des différents oxydes [6].

La réduction dépend essentiellement de l'affinité chimique de l'élément à réduire par rapport à l'oxygène. Plus l'affinité chimique (solidité chimique) de l'élément avec O₂ est plus grande, plus il est difficile à le réduire des ces oxydes.

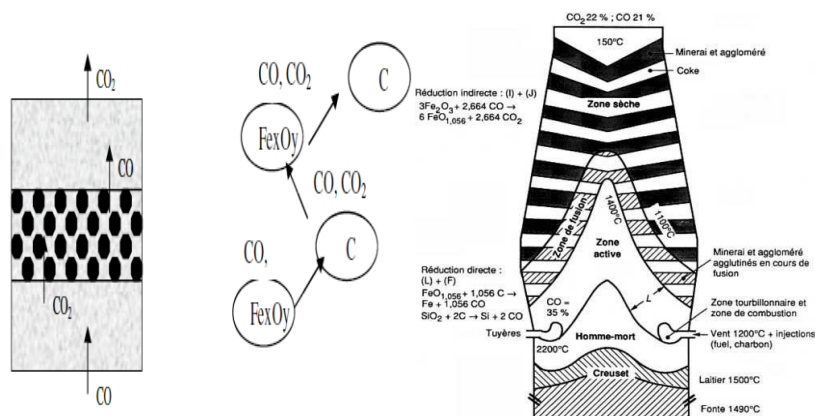


Fig. 6 : Création et circulation de CO et CO₂ entre les couches de coke et de minéral.

Il existe deux types de réduction :

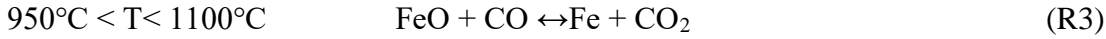
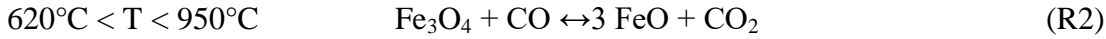
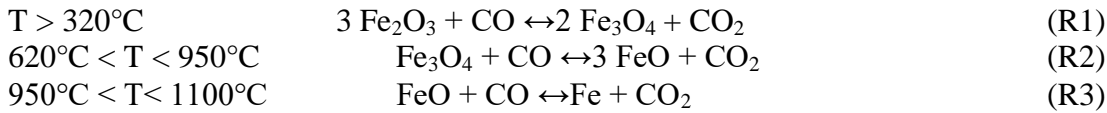
- La réduction directe, celle qui se passe avec le carbone pour former CO.
- La réduction indirecte avec CO et H₂ pour former CO₂ et H₂O vapeur.

1.3. 1. Description physico-chimique du haut fourneau

Dans ce qui suit, on ne donnera qu'une description brève des réactions les plus importantes.

En reprenant la même division des zones du haut fourneau que sur la figure 6, on peut passer en revue les principales réactions chimiques selon les zones.

La zone sèche (ou cuve) est le siège de la réduction des oxydes de fer par CO et accessoirement H₂. Au niveau de la partie supérieure de cette zone, l'hématite est réduite en magnétite qui est ensuite réduite en wüstite.



Dans la partie supérieure de la cuve, aux températures inférieures à 950°C, où il n'y a pas de régénération de CO₂, la réduction se fait par un gaz CO/CO₂, dont le pouvoir réducteur diminue au fur et à mesure que le gaz s'élève dans la cuve.

La réduction de FeO se poursuit jusqu'à l'équilibre avec le gaz à une température d'environ 950°C. La zone dans laquelle il n'y a plus de réduction de FeO est appelée zone de réserve chimique. Elle est contenue dans une zone plus large définie par une température constante (950°C), appelée zone de réserve thermique.



C'est une réaction réversible, qui a lieu dans le sens direct aux hautes températures, très endothermique qui détermine et limite la température de la zone de réserve thermique. Dans la zone de fusion, se forme le laitier par fusion de la gangue et des additions de fondants (chaux...). Cette zone est aussi siège de la fusion du fer et du FeO non réduit.

Dans la zone active : la wüstite restante est réduite en fer, tandis que la fonte se carbure en carbone:



Au niveau des tuyères, le CO est généré par combustion du coke par l'oxygène selon la réaction :



En parallèle avec :



Enfin au niveau du creuset, la fonte et le laitier se séparent par décantation, la fonte s'affine et continue de s'enrichir en carbone jusqu'à saturation (~ 4,7% en masse).

En réalité, du fait des gradients radiaux il n'y a pas de frontière nette entre ces différentes zones. L'intérêt de cette décomposition est purement conceptuel. Elle permet de séparer de grandes zones en fonction des phénomènes qui y prédominent. Ainsi le haut fourneau est souvent subdivisé en deux grandes zones : zone dite de préparation (du haut jusqu'à la fin de la zone de réserve chimique) et zone d'élaboration (partie basse). La figure 6 montre cette subdivision et les principales réactions [7].

1.4. Les fontes du Haut Fourneau

Les fontes obtenues dans le H-F sont destinées pour l'affinage de l'acier dans les différents fours et convertisseurs ainsi que pour le moulage des pièces mécaniques (fonderie). Elles se distinguent l'une de l'autre par leurs compositions chimiques.

Le tableau 2 nous indique les différents types de fontes obtenues dans le H-F avec leur composition chimique.

Tableau 2. Composition chimique des différents types de fonte d'HF

Matière	Composition chimique en pourcent poids				
	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Type de fonte	/	/	/	/	/
Font pauvre en Mn	± 4	Jusqu'à 1	<1	0.08-0.12	Jusqu'à 0.05
Font riche en Mn	± 4	Jusqu'à 1	2-3	0.08-0.12	Jusqu'à 0.05
Fonte thomas	3.2-3.6	0.3-0.6	0.5-1.5	1.7-2.2	0.05-0.15
Fonte Bessemer	3.8	1 - 2.5	1-3	0.07-0.1	Jusqu'à 0.04
Fonte de fonderie	3.5-4.2	2 - 2.5	0.07-0.1	0.08-0.12	0.02
Fonte hématite	3.5-4.2	2-2.5	0.7-1.5	0.08-0.12	Jusqu'à 0.04
Fonte manganèse	6-8	<1	3-8	0.2-0.3	0.02
Fonte silicium	1.2-1.6	9-15	0.5-0.7	0.12-0.16	Jusqu'à 0.04

La fonte liquide comporte des inclusions variées. Quelques-unes sont souvent introduites volontairement. Outre leurs caractères alphagènes ou gammagènes et leurs actions sur la trempabilité, valables pour les alliages ferreux, les éléments introduits dans les fontes sont caractérisés par leurs actions:

- Graphitisantes (Si, C, Al, Cu, Ni, Zr...) qui se traduisent par la création de germes servant de support de croissance pour le graphite.
- Antigraphitisantes (Cr, Mo, Mn, S, V, W, B...) [8].

1.4.2. Composition chimique de la fonte

Une fonte est un alliage métallique dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est 2 à 6,67 %. L'excès de carbone provoque la formation de phases qui donnent à la fonte une structure composite.

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

- le **silicium** (1 à 3 %) ;
- le **manganèse** (0,1 à 1 %) ;
- le **soufre** (jusqu'à 0,15 %) ;
- le **phosphore** (jusqu'à 1,3 %).

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

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

Les propriétés peuvent en outre être améliorées ou ajustées en vue de certaines applications

Grâce à des **éléments d'alliage** dont l'action présente, malgré l'abondance du carbone, de profondes analogies avec le cas des aciers ; les principaux sont les Suivants :

- le nickel (jusqu'à 35 %) ;
- le chrome (jusqu'à 30 %) ;
- le molybdène (jusqu'à 3 %) ;
- le cuivre, l'étain, le vanadium, l'aluminium, ...

Ces mêmes éléments se retrouvent d'ailleurs souvent à l'état de traces, comme impuretés.

Parfois utiles des fontes non alliées [9].

1.4.3. Classification industrielle de la fonte :

Selon les considérations métallurgiques évoquées ci-avant, on classe les fontes ou les produits moulés en fonte en six grandes familles.

1.4.4. Fontes grises

Cette famille de fonte est caractérisée par son carbone sous forme de graphite. La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte, d'autres éléments d'addition permettent la mise en forme structurelle du graphite (magnésium pour précipiter sous forme de nodules par exemple) [10].

1.4.5. Fonte grise à graphite lamellaire (GL)

Lorsque la composition de la fonte liquide et sa vitesse de refroidissement sont appropriées, le carbone précipite au cours de la solidification sous la forme de lamelles de graphite séparées. Les feuillets de graphite croissent par leur tranche au sein du liquide et donnent ainsi naissance à la forme en lamelles caractéristique de ces fontes. Les caractéristiques de ces fontes dépendent de la dimension moyenne, du nombre et de la répartition des lamelles de graphite, ainsi que de la dureté relative du métal de la matrice. Ces facteurs sont arrangés principalement par les teneurs en carbone et en silicium du métal et par la vitesse de refroidissement de la pièce moulée [10].

1.4.6. Fontes à graphite sphéroïdal (GS)

Les fontes à graphite sphéroïdal sont, après les fontes grises, celles qui sont le plus souvent demandées. Ces fontes, dites aussi ductiles, ont été désignées parfois sous le nom de fontes nodulaire ou de fonte GS, les fontes à graphite sphéroïdale présentent un rare ensemble de caractéristique, du fait que le graphite est présent sous formes de sphéroïdes ou sphérules. Cette forme sphéroïdale est obtenue par

addition d'une quantité très faible, mais bien définie, de magnésium à une fonte liquide. Comme les fontes malléables, les fontes à graphite sphéroïdal présentent une relation contrainte-déformation linéaire, d'une limite d'élasticité étendue et une bonne capacité de déformation. La figure montre une structure de fonte GS [10].

1.4.7. Fontes à graphite vermiculaire (GV)

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

Tableau 3. Les propriétés mécaniques de la fonte GV [10]

Propriétés mécaniques	Fonte à graphite vermiculaire
Résistance Mécanique (Rm en MPa)	450
Module d'Elasticité (E en GPa)	145
Elongation (%)	1,5
Conductivité Thermique (W/mK)	37
Dureté (BHN 10/3000)	217-241

1.4.8. Fontes blanches et fontes trempées

- **Fontes blanches**

Les fontes blanches sont caractérisées par l'absence complète du graphite car le carbone, en excès - par rapport à sa solubilité maximale dans l'austénite - est combiné au fer sous forme de carbures métastables [11].

- **Fontes trempées**

On appelle « fontes trempées » des fontes coulées au contact d'éléments refroidissants constituant le moule en tout ou partie; ainsi les couches corticales solidifiées dans ces conditions sont en fonte blanche - effet de « trempe primaire » avec solidification dans le système métastable - tandis que le cœur et d'autres parties de la même pièce se solidifient en fonte grise ou GS [11].

1.4.9. Fontes malléables

Les fontes malléables sont des fontes qui acquièrent une résistance et une capacité de déformation par des traitements thermiques appropriés [12].

- ✓ Un recuit de graphitisation pour la transformation de la cémentite en graphite nodulaire (**malléable à cœur noir**).
- ✓ Un recuit de décarburation dans le but d'éliminer le carbone de la couche superficielle (**malléable à cœur blanc**) [13].

1.4.10. La fonte ductile à trempe bainitique (ADI)

Il s'agit d'une famille de fontes GSobtenue par traitement thermique à deux niveaux (austénitisation + trempe bainitique);

1.4.11. Fontes spéciales alliées

La métallurgie des fontes permet d'améliorer leurs propriétés en vue d'applications définies et selon les mêmes principes que la métallurgie des aciers : apport d'élémentsd'alliage, traitements thermiques. Ainsi, malgré les spécificités des fontes, on retrouve le même type de classification :

- A. les fontes peu alliées ou modérément alliées.
- B. les fontes grises, GS ou blanches fortement alliées [13].

1.5. Fontes grises à graphite sphéroïdal GS (Les fontes ductiles) :

Dans les fontes à graphite sphéroïdal la teneur en carbone est de 3,5 à 4%, appelées aussi fontes ductiles. Ces fontes sont obtenues par l'addition d'éléments spéciaux, le plus souvent à base de magnésium dans le bain de la fonte liquide (dans une poche de traitement sandwich), qui transforme le graphite en sphères ou bien nodules [14]. Les fontes à graphite sphéroïdal sont des alliages fer-carbone-silicium, appelées aussi fonte ductile, dans lesquelles le carbone graphitique se présente directement, après coulée et refroidissement dans le moule sous forme de petits sphéroïdes compacts assez régulièrement répartis dans une matrice d'acier [15].

La composition chimique de la fonte à graphite sphéroïdal non alliée correspond généralement à des pourcentages compris dans les plages suivantes :

- C totale varie de 3.4 à 4.0 % ;
- Si varie de 2.0 à 3.0 % ;
- Mn varie de 0.10 à 0.80 % ;
- P < 0.10 % ;
- S < 0.02 % (le plus bas possible, après désulfuration si nécessaire) ;
- Mg varie de 0.02 à 0.10 % ;

Le pourcentage de certains éléments dits nocifs (Bi, Sb,Pb,Ti) ne doit pas dépasse certaines valeurs généralement très basse. Pour certaines applications, la teneur en silicium peut être comprise entre 1 et 1.5 %. Dans la recherche de l'obtention d'une structure ferritique sans avoir recours aux traitements thermiques, il peut être nécessaire de maintenir le pourcentage en manganèse à une valeur inférieure à 0.15% et de veiller à ce que les teneurs en certains éléments ne dépassent pas une valeur déterminée (0.07% pour le chrome, 0.02% pour l'étain, 0.50 % pour le cuivre).

Certains éléments d'alliage peuvent être ajoutés, en quantité modérée, a la composition de base en vue d'améliorer la tenue de la pièce à la chaleur (Cr, Mo.), à l'usure (Ni, Cr), à la corrosion (Cu) ou encore de réduire la sensibilité à l'épaisseur (Ni). En quantités élevées, la présence d'éléments d'alliage entraine la formation de structures particulières.

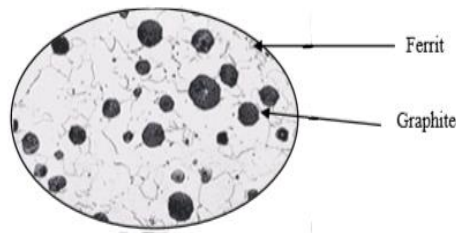


Fig. 07: Micrographie de la fonte à graphite sphéroïdal avec matrice ferritique [13].

1.5.1. Élaboration des fontes GS

La fonte de base destinée à la transformation en fonte G.S. peut être élaborée dans l'un des quelques fours généralement utilisés en fonderie. Les fours les plus rencontrés sont :

A) Fours à garnissage basique :

Capacités entre 1,5 et 4,5 tonnes ; puissance entre 600 et 1100 KW/t. [16].

b) Fours réverbères :

Chauffés au mazout ou au gaz ; ils servent surtout dans les fonderies fabricant de très grosses pièces. [16].

c) Fours électriques à induction (à creuset acide) :

Ils sont fiables et plus souples, la température du bain peut être constante et supérieure à 1520°C, le métal obtenu est homogène, les capacités et les puissances courantes sont : de 1,5 à 5 tonnes et 300 KW/t pour les fours 50Hz, et de 0.1 à 2 tonnes et 700KW/t pour ceux à (150/500Hz) [16].

d) Cubilot acide à vent froid :

Il donne un métal sulfuré (0,08 à 1,12% S) de composition peu constante à une température inférieure +1520° (1550°C avec le vent chaud). Il est souvent en duplex avec un four électrique (induction ou réverbère) [16].

E) Cubilot basique à vent chaud :

Il est amortissable pour les grandes productions (au moins 30T par jour), le métal obtenu est moyennement sulfuré (80% < 0,08), la température peut être élevée (>1510°C), la charge est entièrement en acier [16].

1.5.2. Traitement par le magnésium

En pratique, le graphite prend la forme sphéroïdale, dans une fonte à teneur en soufre initiale limitée ($S < 0,06 \%$), en présence d'une teneur en magnésium finale allant de 0,03 à 0,06 %. L'introduction du magnésium se heurte à deux difficultés : c'est un métal léger et oxydable, qui tend à flotter et à brûler à la surface de la fonte et dont la température d'ébullition est basse (1103°C), d'où une réaction brutale [17]. La quantité d'alliage sphéroidisants au Mg, nécessaire, peut être estimée à l'aide de la réaction suivante :

$$Q = M \times \frac{0,76 (\%S - 0,01) + \%G + t \times 10^{-3}}{0,01 \times \%R \times \%Mg} \times \left(\frac{T}{1450} \right)^2 [\text{Kg}] [13]$$

- Q** quantité en Kg d'alliage en Mg ;
M masse en kg de la fonte à traiter ;
%S pourcentage de soufre de la fonte avant traitement ;
%G pourcentage de magnésium résiduel souhaité dans la fonte GS ;
T temps (en minutes) de maintien entre le traitement au Mg et la coulée du premier moule ;
T température en degrés ($^{\circ}\text{C}$) de la fonte à traiter ;
%Mg pourcentage de magnésium dans l'alliage sphéroidisant utilisé pour le traitement ;
% R le rendement de Mg en pourcentage ;

1.5.3. Définition des Fontes grises à graphite lamellaire (GL) :

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

La composition chimique et la microstructure sont les facteurs principaux agissant sur l'usinabilité et le degré de finition des fontes. Les plus utilisées sont les fontes hypo eutectique de 2,4 à 3,8 %C, au-delà les propriétés mécaniques deviennent de plus en plus faible. Ces alliages sont peut-être plus connus sous le nom de fontes « ordinaires » car ce sont les plus anciennement utilisées en construction mécanique, en architecture métallique, chauffage domestique et industriel, équipement de voirie. Aujourd'hui encore, elles ont une place prépondérante en fonderie.

Leur structure comprend essentiellement du graphite en lamelles-en paillettes ramifiées et arrangées en ensemble cellulaires, incluses dans une matrice le plus souvent perlitiques ou perlito-ferritique. Elles peuvent contenir assez de phosphore pour former un réseau de cristaux analogue à des carbures mais moins durs [13].

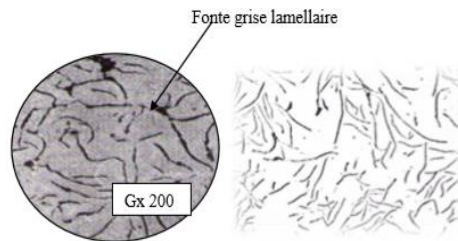


Fig. 08: Fonte grise lamellaire sans attaque [13].

1.6. Les Fontes malléables:

Les fontes malléables sont des fontes qui acquièrent une résistance et une capacité de déformation par des traitements thermiques appropriés [12].

- Un recuit de graphitisation pour la transformation de la cémentite en graphite nodulaire (**malléable à cœur noir**).
- Un recuit de décarburation dans le but d'éliminer le carbone de la couche superficielle (**malléable à cœur blanc**) [13].

1.6.1. Élaboration des fontes malléables :

L'élaboration s'articule autour des deux principes suivants.

➤ Premier principe

Le principe repose en, la coulée des pièces en fonte blanche (fonte à structure de cémentite Fe_3C et de perlite) qui permet de profiter à la fois des bonnes propriétés de fonderie des fontes et de la grande facilité d'égrappages (séparation du système de coulée et des masselottes) due à la relative fragilité de la fonte blanche [12].

➤ Deuxième principe

La transformation de la structure non ductile de la fonte blanche par un traitement thermique de recuit, de manière à décomposer la cémentite et à obtenir une matrice métallique pouvant être constituée soit de ferrite (en fait, il s'agit de silico-ferrites plus ou moins riches en Si : 0,6 à 2 %) permettant d'atteindre des allongements allant jusqu'à 18 % pour la nuance la plus ductile, soit d'autres produits de transformation de l'austénite, de la perlite notamment, avec toute la gamme des ferrito-perlites [12].

Au cours du traitement thermique de recuit, le carbone contenu dans la fonte blanche est soit totalement ou presque totalement éliminé, la fonte obtenue est une malléable à cœur blanc, soit précipité dans la structure métallique sous forme de flocons ou de nodules de graphite ; il s'agit alors d'une malléable à graphite nodulaire [12].

Il existe donc deux procédés différents d'obtention des fontes malléables, avec, pour chacun d'eux, un certain nombre de techniques particulières, et deux grandes familles de fontes malléables :

- **Un procédé de malléabilisation par décarburation de la fonte blanche** grâce à un recuit en milieu oxydant, qui conduit à l'obtention de la malléable à cœur blanc en raison de la couleur de la cassure du métal obtenu ;
- **Un procédé de malléabilisation par graphitisation**, c'est-à-dire par précipitation du carbone d'une fonte blanche sous forme de graphite au cours d'un recuit non oxydant. Ce procédé conduit à l'obtention des malléables à graphite nodulaire, matériau longtemps dénommé malléable américaine, pour des raisons historiques, ou malléable à cœur noir, en référence à l'aspect de la cassure du métal [12].

La composition chimique de la fonte blanche coulée varie selon le type de fonte malléable recherché et dans une moindre mesure, selon les moyens d'élaboration.

1.7. Influence des éléments d'alliage sur les fontes :

Les fontes sont toujours composées de métal de base et d'autres éléments comme il a été expliqué au préalable : des éléments d'élaboration ou des éléments qu'on ajoute favorablement (éléments d'addition ou nuances). La présence de ces éléments confère à la fonte des propriétés mécaniques différentes et une nouvelle structure. On peut regrouper ces éléments en deux types selon leurs effets sur la structure.

1.7.1. Les éléments normaux :

1.7.1.1. Le carbone

Le carbone a une grande affinité pour le fer , il constitue l'élément de base de la composition des fontes et des aciers. L'introduction de ferraille dans les lits de fusion nécessite souvent de recarburer le bain par des additions de matières carbonées. La solubilité du carbone dans un bain ferreux augmente avec la température. Le carbone est gamma-gène et forme avec le fer ainsi qu'avec beaucoup d'autres éléments des carbures plus ou moins stable, métastable. Il joue le rôle déterminant dans les transformations à l'état solide.

1.7.2.2. Le Silicium

Élément normal de la fonte, il devient élément d'addition au dessus d'une teneur de 3%. Élément alphagène, il joue un rôle fondamental en métallurgie des fontes, car, aux teneurs considérées (jusqu'à 18%), il oriente la solidification des alliages Fe-C- Si vers le système stable (graphite + ferrite). C'est un graphitisant puissant.

Les Ferro-silicium, en raison probablement des faibles teneurs en aluminium et en calcium qu'ils contiennent, sont des corps inoculant. Ajoutés en petite quantité au métal liquide avant la coulée, ils produisent un effet germinateur du graphite, évanescent, qui entraîne plusieurs avantages pratiques : multiplication des cellules eutectiques, élimination des carbures, suppression du graphite de surfusion....

1.7.7.3. Influence du silicium sur la vitesse de refroidissement

Le silicium est considéré comme un élément qui favorise la formation du graphite. L'augmentation de sa quantité diminue la quantité de cémentite en favorisant la formation du graphite. On le trouve pratiquement en teneur supérieure à 1,7% (ou 2%) dans les fontes qu'on veut obtenir (grises).

Il a un effet direct sur le degré de surfusion notée ΔT , l'augmentation du taux de silicium favorise l'écart entre le point C et C', respectivement du système stable et métastable,

On voit qu'il faut pour une différence entre ces deux points de l'ordre de 30 °C, un taux de silicium de 2%. Il rend la formation du carbure de fer moins probable. Il favorise la formation du graphite [18].

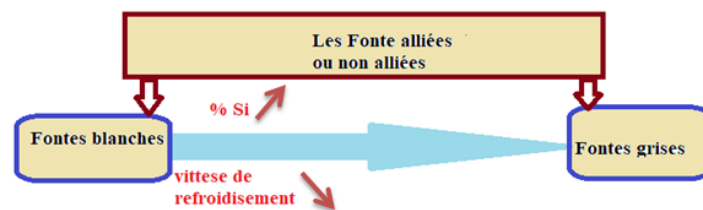


Fig. 9:Influence du Si sur la vitesse de refroidissement [18].

1.7.7.4. Influence du carbone et du silicium

Les fontes grises employées dans l'industrie ne peuvent pas être considérées comme un alliage binaire Fer-Carbone, en plus de carbone, elles contiennent d'autres éléments (Si, Mn, S, P, etc.) qui ont une grande influence sur la structure et les propriétés des fontes grises.

Les deux éléments (carbone et silicium) exercent une influence directe sur le passage de système métastable au système stable [19].

Le carbone est un élément graphitisant, il favorise l'accroissement des lamelles de graphite.

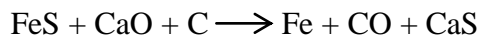
1.7.7.5. Le phosphore

Élément faiblement graphitisant, le phosphore est une impureté des minerais ferreux qu'on élimine le plus possible par oxydation en présence de laitier basique. Son action fragilisant se manifeste dès la plus faible teneur dans les aciers et les fontes. Dans les fontes grises, il apparaît sous forme de Fe_3C qui constitue les cristaux d'eutectique phosphoreux. En effet, pour les teneurs supérieures à 0,3 %, il se forme ainsi un réseau dur favorable à la résistance à l'usure. Si les teneurs en C et Si ne sont pas trop élevées, il améliore la coulabilité [19].

1.7.7.6. Le soufre

Le soufre est une impureté généralement nocive qui est présent dans le minerai. Il accroît le retrait, augmente la fragilité, diminue la fluidité, accroît la ségrégation à la coulée et abaisse la tension superficielle. Il se combine de préférence au Fe et au Mn pour former respectivement de FeS et du MnS. On l'élimine

autant que possible des bains de fonte par réaction avec des laitiers ou des poudres basiques en milieu réducteur.



La solubilité du MnS dans le fer liquide est inférieure à celle du FeS, la présence de manganèse dans la fonte est donc favorable à la désulfuration [13].

1.7.7.7. Le manganèse

Cet élément provient de la réduction des oxydes de manganèse contenus dans les minerais de fer, ou qui sont ajoutés à la charge pour obtenir la teneur visée. En effet, le rôle principal du manganèse est de fixer, comme on l'a vu précédemment, le soufre sous forme de MnS.

L'excès de manganèse fixe le carbone sous forme de Mn₃C, carbure isomorphe de la cémentite. Ainsi, il stabilise la cémentite et la perlite. Le manganèse est aussi un élément gammagène. Il entre donc dans la composition de l'acier, des fontes alliées austénitiques ou martensitiques. Il peut accroître la tendance à certains défauts de fonderie : abreuvements, soufflures dans les fontes [18].

1.8. Les éléments d'additions:

1.8.1. Le nickel

Il est l'un des éléments d'alliages les plus courants car son effet gammagène, trempant et sa miscibilité parfaite avec le fer permet de réaliser pratiquement toute la gamme des structures. Il abaisse les points critiques et les vitesses critiques au refroidissement, il permet donc une plus grande latitude dans les conditions de traitement thermique. Le nickel est graphitisant, diminue la sensibilité à l'épaisseur, affine le grain, affine la perlite et modifie la valeur de la vitesse critique de trempe.

Le nickel permet par trempe de durcir les pièces moulées. En effet lorsqu'il est présent, même à des doses extrêmement faibles dans la fonte (1,5 à 4,5 mm selon l'épaisseur du moulage), le nickel donne à l'austénite, si la vitesse de refroidissement de celle-ci est suffisante, le pouvoir de se transformer en martensite. Il est donc possible d'obtenir des pièces brutes de coulée dans lesquelles, de fait de leur faible vitesse de refroidissement dans le moule, ont la structure perlitique. Ces pièces alors facilement usinables, subissent ensuite un traitement thermique approprié, qui leur confère une dureté élevée [19].

1.8.2. Le chrome

Le chrome est l'un des principaux éléments d'alliages couramment utilisés en fonderie de fonte et d'acier, c'est un élément alpha gène, augmentant la trempabilité et fortement carburigène. Au dessus de 0,7 %, il y a trop de cémentite libre dans la fonte qui devient in usinable. Ensuite, au dessus de 10 %, il y a formation de carbure de chrome qui ne sont pratiquement pas graphitisants. Il permet donc d'avoir des fontes réfractaires. Le chrome affine la perlite et le graphite.

Les fontes et les aciers au chrome forment des familles très diversifiées. Les faibles teneurs permettent l'amélioration des caractéristiques mécaniques et facilitent les traitements thermiques. Les plus

fortes teneurs leur confèrent la résistance à l'abrasion, la réflectivité et l'in oxydabilité. Le chrome est souvent associé à d'autres éléments comme le nickel, le cuivre, le titane...etc.

Cet élément est relativement oxydable et des précautions doivent être prises pendant la fusion et la coulée des fontes et aciers à haute teneurs en chrome [18].

1.8.3. Le molybdène

Le molybdène est un élément d'alliage alphasène, antigrahitisant et fortement trempant. Il facilite la trempe bainitique et est en générale très favorable à la résistance au fluage. On l'utilise largement dans des pièces moulées destinées à des usages thermiques. Le molybdène affine la ferrite et donc la perlite et il accroît les caractéristiques mécaniques de la fonte.

1.8.4. Le cuivre

Il est bien connu que la solubilité du cuivre dans les fontes est limitée. Cet élément est faiblement gammagène et trempant. En solution solide dans la ferrite, il en augmente fortement la dureté en affinant le grain ferritique. Il a une action légèrement grahitisante, mais son effet n'influence que la cémentite libre et au contraire il stabilise la perlite.

Le cuivre améliore donc dans les fontes les caractéristiques mécaniques, la résistance à l'usure et à certain type de corrosion. Il affine également le graphite.

Il remplace partiellement le nickel (en diminuant la sensibilité à l'épaisseur) dans certaines fontes (austénitiques, martensitiques). Il est souvent associé au nickel ou au chrome pour faciliter les traitements thermiques [19].

1.8.5. Le Vanadium

C'est un élément alphasène, désoxydant actif et antigrahitisant puissant. Il forme des carbures très durs. Les carbures de vanadium, stable à hautes températures, assurent dureté et résistance à chaud. Le vanadium entre dans la composition des fontes alliées. Il est relativement oxydable, des précautions sont donc à prendre lors de l'addition et au cours des traitements thermiques. Dans les fontes non alliées, il est toujours utilisé à faible teneur (0,2% à 0,3%).

1.8.6. Le Titane

Le titane, élément alphasène forme des oxydes, des nitrures et des carbures. Il s'oxyde facilement à l'air et le rendement de l'addition n'est pas très régulier. Il peut aider à éliminer certains défauts dû à l'azote comme la porosité vermiculaire. Ajouté à la fonte, à des teneurs faibles (0,1% à 0,3%), c'est un élément grahitisant qui a un effet très sensible sur la forme et la répartition du graphite. Il rend le graphite très fin, le dissémine dans la masse sous forme de brouillard, c'est-à-dire des pseudo-lamelles. Cela implique une augmentation des caractéristiques mécaniques ainsi que de la résistance aux chocs thermique (effet d'entaille).

1.8.7. L'Étain

C'est un métal relativement lourd, qu'on peut ajouter aux fontes grises ou au graphite sphéroïdal en faible teneur (de l'ordre de 0,1%) afin de stabiliser la perlite sans former de carbures libres. Des teneurs trop élevées en étain risquent de détériorer la forme du graphite lamellaire et de provoquer la dégénérescence du graphite sphéroïdal.

1.8.8. L'Aluminium

Élément graphitisant, un effet germinateur du graphite pendant le recuit lui est assigné en fonderie de fontes malléables. Il est généralement présent dans les Ferro-siliciums et autres ferro-alliages. Il diminue la profondeur de trempe.

Le plomb, pratiquement insoluble dans les alliages ferreux, est un élément poison même à l'état de traces. Il perturbe gravement la forme du graphite lamellaire et surtout sphéroïdal. Il provient essentiellement de matières récupérées comme la peinture sur les tôles, l'acier de décolletage ou encore les pièces émaillées [18].

1.8.9. Le Tellure

L'emploi du tellure est assez délicat (influence de la température, toxicité des vapeurs). Il est ajouté à l'état de traces dans les fontes afin d'inhiber la germination du graphite primaire dans les fontes malléables. C'est un puissant antigrahitisant. On l'utilise parfois sous forme d'enduits [19].

C'est un métal ultra léger, très volatil et réagissant très vivement avec l'oxygène et le soufre. C'est donc un agent de traitement utilisé pour la désoxydation, la désulfuration et surtout pour l'obtention du graphite sphéroïdal des fontes. Il peut être ajouté à l'état métallique pur, mais à condition d'employer des dispositifs spéciaux évitant les réactions explosives. On peut aussi modérer sa réactivité en l'utilisant sous forme d'alliages de magnésium plus denses.

Ces valeurs sont variables et dépendent de la teneur en éléments secondaires qui rentrent en solution dans la ferrite (Si, Mn, N...). La ferrite apparaît dans les fontes au cours du refroidissement sous formes proeutectoïde et eutectoïde [20].

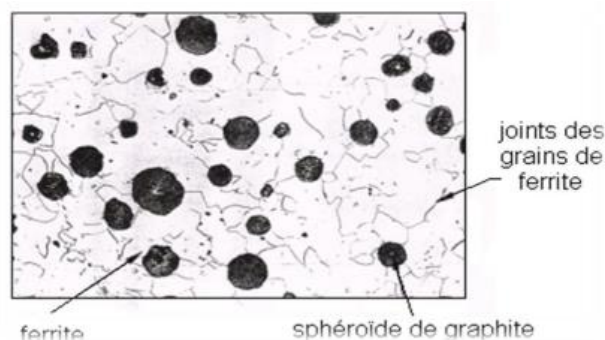


Fig.10 : Structure d'une fonte GS à matrice ferritique [20].

L'influence des autres éléments sur la dureté et la résistance de la ferrite sont données par **la figure 11**.

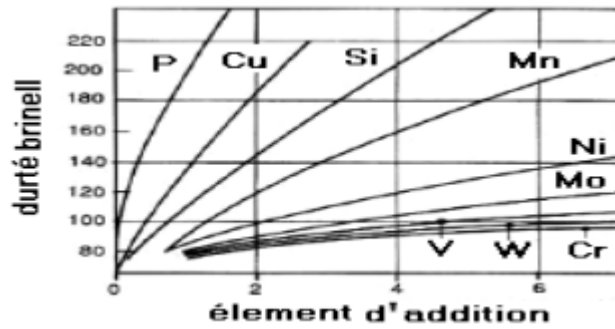


Fig. 11 : Influence de quelques éléments sur la dureté de la ferrite [13].

1.9. Influence de la vitesse de refroidissement sur la microstructure et les propriétés mécaniques des fontes :

1.9.1. Décomposition de l'austénite:

Lorsque la vitesse de refroidissement est lente, les migrations des atomes de carbone ont "le temps de le faire" et les lamelles peuvent grossir. On obtient une structure perlitique et grande. Quand la vitesse de refroidissement augmente, cette migration se fait, mais à moins longue distance donc, localement et en de multiples endroits, se forment de petites lamelles :

- Entre 750 °C et 500 °C environ, si le refroidissement est relativement lent, tout se transforme en perlite.
- Si à 500 °C tout n'est pas transformé, cela signifie que la vitesse de refroidissement est trop importante, le reste peut se transformer en martensite.
- Si la vitesse de refroidissement est très rapide, entre 750°C et 500°C, il ne se passe rien ; il y a deux solutions en dessous de 500 °C:
 - Si on stoppe le refroidissement alors le γ donne de la bainite.
 - Si on ne stoppe pas le refroidissement alors l'austénite donne de la martensite [21].

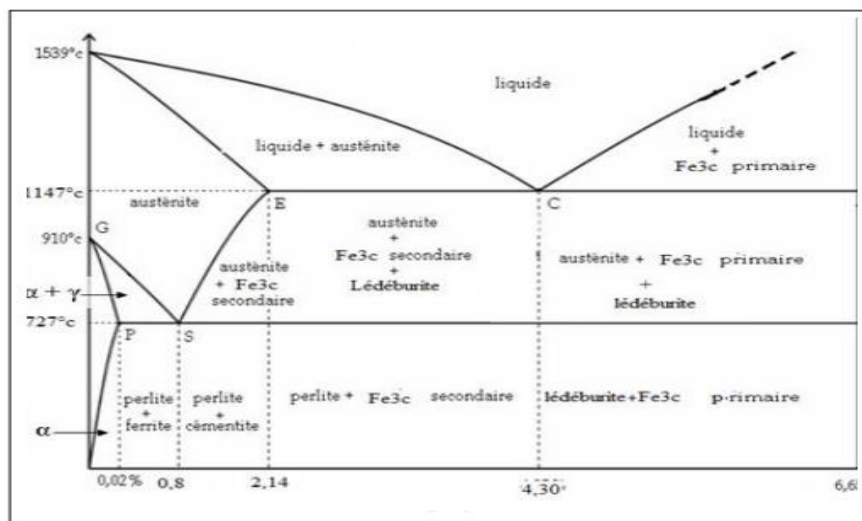


Fig. 12: Diagramme d'équilibre métastable Fe - Fe₃C [13].

1.9.2. L'austénite

Solution solide d'insertion du carbone dans le fer γ , l'austénite peut dissoudre 0,85 % de carbone à 735 °C et 1,7 % de carbone à 1130 °C.

Dans le cas de vitesses de refroidissement rapides, entre 730 °C et 500 °C l'austénite se transforme en perlite si les migrations de carbone ont le temps de se faire, sinon, nous assistons à d'autres transformations plus tardives (c'est le cas des traitements thermiques). Néanmoins, cette phase peut exister à température ambiante dans les fontes austénitiques au nickel et dans les fontes trempées à austénite résiduelle. Cette phase ductile est oxydée par tous les réactifs acides [21].

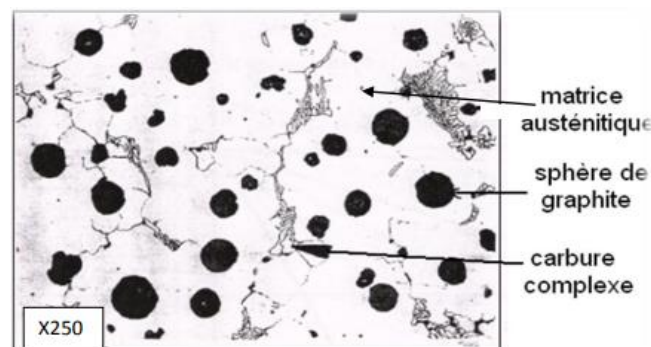


Fig. 13 : Structure d'une fonte GS à matrice austénitique [21].

1.9.3. La Cémentite

La cémentite ou carbure de fer est une combinaison métallique de fer et de carbone définie chimiquement par la formule Fe_3C (contenant 6,67 % de carbone). Elle est constituée par une maille orthorhombique dont le motif de base peut-être assimilé à un triangle par simplification. C'est un carbure très dur, cassant et très fragile. Ces caractéristiques sont les suivantes [13]:

- Rm très faible ;
- HB de 800 à 1000 ;
- A % quasiment nul ;

1.9.4. La Perlite

La perlite se présente sous forme d'un feuilletage de lamelles de ferrite et de cémentite disposées alternativement (*Fig. 14*). C'est un agrégat eutectoïde. La perlite se forme au passage de la ligne eutectoïde (environ à 727°C) conformément au diagramme d'équilibre Fer- Fe_3C (*Fig. 12*). Lorsque les lamelles de la perlite sont très minces, phénomène dû à **un refroidissement rapide**, elle devient plus dure et plus résistante [13].

Les caractéristiques mécaniques de la perlite dépendent avant tout de sa finesse et les éléments qui se trouvent en solution. Sa dureté Brinell varie entre 200 et 300.

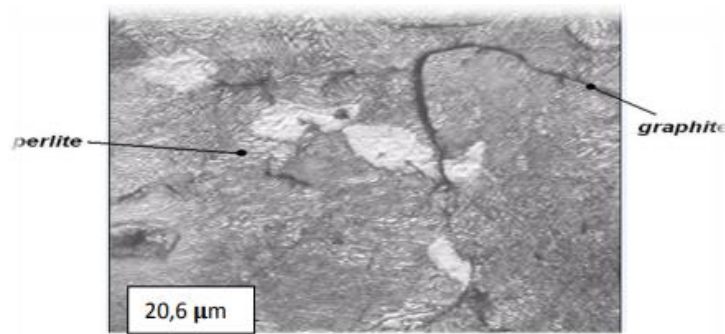


Fig. 14 : Répartition de la perlite dans les fontes grises [13]

1.10. Comportement mécanique :

1.10.1. Caractéristiques mécaniques des fontes grises lamellaires

Pour ces fontes, la quantité et le type de lamelles de graphite sont déterminants par les propriétés mécaniques; les lamelles de graphite fragilisent la matrice du matériau. En effet, les extrémités des lamelles de graphite provoquent un effet “d’entailles” entraînant des amorces de rupture il en résulte donc une chute des caractéristiques mécaniques.

Les propriétés mécaniques des fontes à graphite lamellaire dépendent nettement de la vitesse de refroidissement, autrement dit de l’épaisseur de paroi de la pièce moulée. L’ordre des lamelles de graphite peut varier suivant la composition chimique de la fonte, des conditions de refroidissement et le nombre de germes présents dans le bain métallique apporté par l’inoculation.

Ces fontes sont typiquement moins résistantes que les fontes blanches par exemple, mais offrent par la présence du graphite une capacité autolubrifiante et une capacité d’amortissement de vibration. Elles sont intéressantes par leurs propriétés de frottement liées à la présence des lamelles de graphite. La forme de ces dernières, de plus à l’échelle de quelques dizaines voir centaines de micron, est évidemment désavantageuse au niveau des propriétés mécaniques, donnant lieu à des concentrations de contraintes assez importantes. Les fontes grises à graphite lamellaire présentent des propriétés d’emploi uniques, dues pour la plupart au graphite. Ce dernier par son caractère lubrifiant joue un rôle primordial, il améliore l’usinabilité et le degré de finition [22].

1.10.2. Facteurs exerçant une influence sur les caractéristiques mécaniques :

1.10.2.1. Composition chimique

Les propriétés de la fonte grise dépendent, en particulier, de la composition chimique de celle-ci. La majeure partie du carbone présent dans la fonte grise se trouve sous forme de graphite. Un accroissement de la teneur en carbone total entraîne une augmentation de la quantité de graphite, d’où un abaissement de résistance mécanique et de dureté mais, par contre, une amélioration d’autres caractéristiques. Une certaine

teneur en silicium est nécessaire pour provoquer la formation du graphite. Cet élément a une influence sur les propriétés de la fonte; en particulier, il lui confère une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation et, le cas échéant, il facilite le traitement de recuit [22].

1.10.2.2. Microstructure

De point de vue microstructure, les fontes grises lamellaires contiennent du graphite en lamelles (ou graphite lamellaire) dispersées dans une matrice métallique à base de fer et de silicium. La quantité du graphite, la longueur des lamelles et la façon dont celles-ci sont réparties dans la matrice exercent une influence directe sur les propriétés de la fonte. Sa résistance mécanique et sa dureté dépendent de la matrice métallique dont les propriétés peuvent aller de celles d'un acier doux, à faible teneur en carbone, à celles d'un acier trempé à teneur en carbone élevée. Une matrice entièrement ferritique donne à la fonte une usinabilité élevée mais une résistance à l'usure et une résistance mécanique réduites.

Les fontes grises à haute résistance se caractérisent par une matrice entièrement perlitique. Pour certaines applications, des pièces sont produites avec une matrice dont la microstructure est constituée à la fois de ferrite et de perlite, pour obtenir une dureté mécanique moyenne. Si une matrice de perlite très fine ou une matrice bainitique est recherchée, il faut avoir recours, soit à des éléments d'alliage, soit un traitement thermique [22].

1.10.2.3. Influence de l'épaisseur

L'épaisseur de la section dans laquelle une fonte est coulée est un facteur qui a une influence importante sur les propriétés des fontes grises. Dans le cas des fontes grises à graphite lamellaire, plus la solidification est lente, plus la dimension des lamelles est importante. Un ralentissement du refroidissement correspond à une diminution de la dureté de la matrice métallique. Par contre une fonte coulée dans une épaisseur très mince se solidifie très rapidement et peut être dure. Généralement une pièce en fonte grise d'épaisseur non uniforme présente une différence de grosseur de graphite et de dureté. Ces différences de structure se traduisent par des différences de caractéristiques mécaniques dans l'ensemble de la pièce [22].

1.10.2.4. Caractéristiques mécaniques fondamentales

Nous appellerons caractéristiques mécaniques fondamentales celles qui, étant aisément mesurables, ont fait l'objet de nombreuses études, et à partir desquelles on peut se faire une bonne idée du **comportement mécanique général** de la fonte ; ce sont :

- ✓ la résistance à la traction, base de la normalisation des qualités de fontes grises non alliées.
- ✓ la dureté.
- ✓ le module d'élasticité

1.10.2.5. Résistance à la traction

Depuis l'application aux fontes de la métallographie, les caractéristiques mécaniques de ces matériaux, et notamment leur résistance à la traction, n'ont cessé de s'améliorer. Toutefois, l'allongement de rupture reste très faible en raison de la morphologie du graphite et on ne le mesure pas en pratique (il est généralement inférieur à 1 %).

Normalisation

Pour des raisons de commodité, par analogie avec les autres alliages moulés et faute de pouvoir définir utilement une limite d'élasticité (en raison de la courbure du diagramme de traction), c'est la résistance à la traction R_m , exprimée en méga pascals (MPa), qui est la base de la classification des fontes grises. La norme NF A 32-101 de décembre 1965 classait donc les fontes d'après l'essai de traction sur des éprouvettes coulées séparément et de diamètre adapté à l'épaisseur déterminante des pièces représentées, c'est-à-dire l'épaisseur équivalente de leurs éléments paraissant les plus critiques au regard des contraintes en service.

Pour rester en harmonie avec la norme ISO R 185 (1961), la nouvelle édition de la norme NF A 32-101 Pièces moulées en fonte à graphite lamellaire de juin 1987 classe et désigne les fontes de plusieurs manières.

— D'après la résistance à la traction minimale garantie mesurée dans un barreau coulé séparément, de 30 mm de diamètre ; la résistance à la traction (minimale) probable dans les pièces est indiquée sans garantie en relation avec l'épaisseur, suivant un tableau permettant de guider le choix de l'utilisateur, C'est la méthode de base.

- D'après la résistance à la traction mesurée dans des échantillons attenants ou adhérents aux pièces ; ici encore la valeur minimale probable dans la pièce est donnée à titre indicatif selon l'épaisseur. Cette méthode ne peut s'appliquer qu'aux pièces relativement grosses (épaisseur supérieure à 20 mm ou masse supérieure à 200 kg) [23]. Le tableau 4 donne les valeurs de la résistance à la traction R_m des différentes nuances :

Tableau 4 : Classification d'après essai sur barreau coulé à part
(Tableau de la norme NF A 32-101 de juin 1987)

Nuances	Valeurs garanties	Valeurs à titre indicatif		Résistance à la traction probable sur pièce R_m (MPa)
	Résistance minimale à la traction R_m (à obtenir sur éprouvette de 20 mm usinée dans un barreau brut coulé à part de 30 mm de diamètre) (MPa)	Épaisseur de la pièce (mm)		
		plus de	jusqu'à et y compris	
FGL 150	150 (1)	2,5 10 20	10 20 40	155 130 120
FGL 200	200 (1)	2,5 10 20	10 20 40	205 180 165
FGL 250	250 (1)	5 10 20	10 20 40	250 225 205
FGL 300	300 (1)	10 20	20 40	270 245
FGL 350	350 (1)	10 20	20 40	315 285
FGL 400	400 (1)	10 20	20 40	355 315

(1) Une fonte à graphite lamellaire de nuance définie ne doit pas avoir une résistance maximale à la traction supérieure à la valeur de la qualité augmentée de 100 MPa, sauf accord contraire préalable entre client et fondeur.

1.10.2.6. Dureté des fontes

Sauf éventuellement dans les régions trempées superficiellement, la dureté des fontes grises est mesurée suivant la norme NF A 03-201 Essai de dureté Brinell pour la fonte grise (août 1967). Le symbole normalisé est HB (suivi éventuellement de trois nombres rappelant

Les conditions particulières de l'essai). La norme précise que la charge doit être maintenue pendant 15 s \pm 1 s et que la distance du centre d'une empreinte au bord de la pièce à essayer doit être au moins égale à 2,5 fois le diamètre de l'empreinte ; les centres de deux empreintes doivent être espacés d'au moins 4 fois leur diamètre.

La dureté des fontes non alliées varie dans des proportions très importantes en fonction de la structure :

- fontes *blanches* : 400 à 550 HB suivant la teneur en carbone.
- fontes *grises perlitiques*: 170 à 270 HB suivant la finesse de la perlite.
- fontes *grises ferritiques*: 100 à 150 HB.
- fontes *grises martensitiques*: 400 à 500 HB.
- fontes *grises bainitiques*: 300 à 400 HB.

La dureté globale de la fonte dépend évidemment avant tout de la matrice dont la dureté propre varie dans des proportions considérables, même dans le cas de fontes non alliées à l'état brut de coulée :

- dureté de la *ferrite* : 90 à 150 HB dans les fontes non alliées.
- dureté de la *perlite* : 200 à 300 HB suivant sa finesse).

La dureté d'une fonte est complètement indépendante du graphite, ce dernier agit par sa quantité et par ses dimensions (relatifs à des fontes à graphite lamellaire ferritiques).

La dureté est souvent déterminée pour apprécier la résistance à l'usure et l'usinabilité et la résistance à l'usure. C'est pourquoi l'annexe A de la norme NF A 32-101 indique une méthode pour la classification des pièces moulées en fonte grise par la dureté Brinell [23].

Tableau 5: Dureté Brinell d'échantillons, à l'état brut de coulée et traités (ferritiques), en fonction du diamètre des barreaux coulés.

Structure	Diamètre du barreau (mm)	Dureté Brinell					
		Nuance I (1)		Nuance II (1)		Nuance III (1)	
		Brut de coulée	Matrice ferritique	Brut de coulée	Matrice ferritique	Brut de coulée	Matrice ferritique
Graphite très grossier ↓ Graphite fin	90	177	99	193	109	145	129
	50	197	102	211	121	159	131
	32	212	107	229	131	175	152
	22	223	111	241	131	197	161
	15	246	129	257	145	218	171
	10	288	133	285	152	256	188
(1) Composition chimique (en %) des divers échantillons :							
		C	Si	Mn	S	P	
nuance I		3,10	2,79	0,67	0,08	0,18	
nuance II		3,04	2,88	0,73	0,05	0,98	
nuance III		3,33	2,86	0,76	0,08	0,18	

1.10.2.7. Module d'élasticité

Même dans le cas des fontes non alliées, le module élasticité est susceptible de varier de façon considérable : il est compris entre 80 et 150 GPa dans le cas des fontes à graphite lamellaire, atteint 160 à 180 GPa dans les fontes malléables à cœur noir et à graphite sphéroïdal et il a une valeur voisine de celle de l'acier, 200 à 210 GPa dans les fontes blanches.

Le module d'élasticité des fontes grises dépend peu de la matrice perlitique ou ferritique mais beaucoup du graphite. Ceci est logique si l'on se rappelle que, dans le cas des aciers au carbone, le module d'élasticité varie peu avec la nature de la matrice, c'est-à-dire avec la teneur en carbone. Les variations de module, de l'ordre de 100 GPa obtenues en transformant, par traitement thermique, une fonte perlitique en fonte ferritique résultent donc non pas de la différence de structure de la matrice mais d'une augmentation de la quantité de graphite. Notons cependant une diminution sensible du module d'élasticité dans le cas d'une matrice martensitique.

La valeur du module d'élasticité des fontes grises est liée, d'une part à la quantité de graphite, d'autre part à la forme du graphite et à ses dimensions dans le cas du graphite lamellaire.

Le module d'élasticité d'une fonte est d'autant plus élevé que le graphite a une forme plus ramifiée et une longueur plus faible dans le cas de lamelles :

- ✓ fonte à graphite sphéroïdal..... E_0 voisin de 170 GPa ;
- ✓ fonte à graphite lamellaire très fin E_0 voisin de 140 GPa ;
- ✓ fonte à graphite lamellaire très grossier E_0 voisin de 90 GPa.

La forme et les dimensions du graphite ont d'ailleurs une influence aussi importante que la quantité de graphite [23].

Tableau 6: Module d'élasticité obtenu par les méthodes dynamiques et par les méthodes statiques pour les fontes à graphite lamellaire.

N° de la classification Afnor (NF A 32-100)	Dimensions des lamelles de graphite (mm)	Module d'élasticité		Différence relative des deux groupes de méthodes (%)
		Méthodes statiques (pendule Le Rolland-Sorin) (GPa)	Méthodes dynamiques (appareil Florisson) (GPa)	
1-2	> 0,5	78,6	88,3	11
2	0,5 à 1	89,5	98,3	8,9
3	0,25 à 0,50	99,7	108,4	8,0
4	0,12 à 0,25	110,1	118,4	7,0
5	0,06 à 0,12	116,7	125,6	7,0
6	0,03 à 0,06	123,4	129,4	4,6
7	0,015 à 0,03	129,7	132,9	2,4
7-8	< 0,03	134,6	137,3	1,9
8	< 0,015	147,7	150,9	2,1

1.11. Comportement tribologique :

1.11.1. Evaluation de la résistance à l'usure

Le mouvement relatif entre un objet et son milieu, gazeux, liquide ou solide, provoque des forces mécaniques aux environs de l'interface. Souvent, ces forces entraînent une usure de l'objet par une perte progressive de matière en surface. On distingue deux catégories principales d'usure :

- L'usure due aux impacts et aux fluides appelée aussi érosion,
- L'usure due au frottement entre corps solides [17, 24].

1.11.2. Usure due aux impacts et aux fluides

L'écoulement turbulent, parallèle à une paroi, d'un fluide contenant ou non des particules en suspension, ou l'impact d'un jet de liquide, de gouttelettes ou de particules entraînées par un gaz peut provoquer une usure (érosion). L'usure par érosion est normalement due à des particules solides, entraînées par un liquide ou un gaz, qui heurtent la surface. Le sablage, méthodes de nettoyage de surfaces métalliques avant l'application d'une peinture, représente un cas particulier où l'érosion a une fonction utile [17, 24].

1.11.3. Usure due au frottement entre corps solides

L'usure due au frottement entre corps solides (usure mécanique) est adhésive ou abrasive. L'usure adhésive est surtout observée en cas de mauvaise lubrification ou de problème d'état de surface; il s'agit d'un phénomène de micro grippage. Il se forme des liaisons par adhérence dans la zone de contact des surfaces fortement chargées. Outre les risques de grippage, les conséquences pour les pièces sont l'apparition de soudure à froid avec enlèvement de matière qui engendre la formation de trous et d'écaillage. L'usure abrasive est causée par des particules dures qui se placent entre les surfaces de frottement. Si la dureté de ces particules est supérieure à celle des surfaces, elles pénètrent dans la surface et provoquent des phénomènes d'usinage à l'échelle microscopique (rayures) [17, 24].

1.11.4. Principe de l'usure abrasive

L'usure abrasive est due au contact entre une particule et la surface d'un solide. Lors de son passage dans le contact, cette particule peut enlever de la matière selon quatre manières d'enlèvement de matière (Fig.15), elle peut :

- couper, si elle est suffisamment aiguisée,
- repousser la matière en surface,
- provoquer une fracture, si le solide est fragile,
- -enlever des grains, si le matériau est insuffisamment homogène.

Ces deux derniers modes se produisent plus rarement que les deux premiers.

La nature de l'usure abrasive est aussi déterminée par le mode d'acheminement des particules dans le contact. Si les particules sont fixées à l'une des deux surfaces, il s'agit d'abrasion à deux corps ; et si les particules sont libres de rouler ou de glisser par rapport aux deux surfaces, on parle alors d'abrasion à trois corps.

L'usure abrasive implique donc un déplacement de matière par labourage d'au moins une des surfaces en contact. Ce mécanisme est important, que ce soit lorsqu'un matériau rugueux et dur glisse sur un matériau mou, ou lorsque des poudres sont présentes dans le contact des deux solides.

Les traces d'usure sont, dans les deux cas, constituées de sillons longilignes dirigés dans le sens du glissement [17, 24].

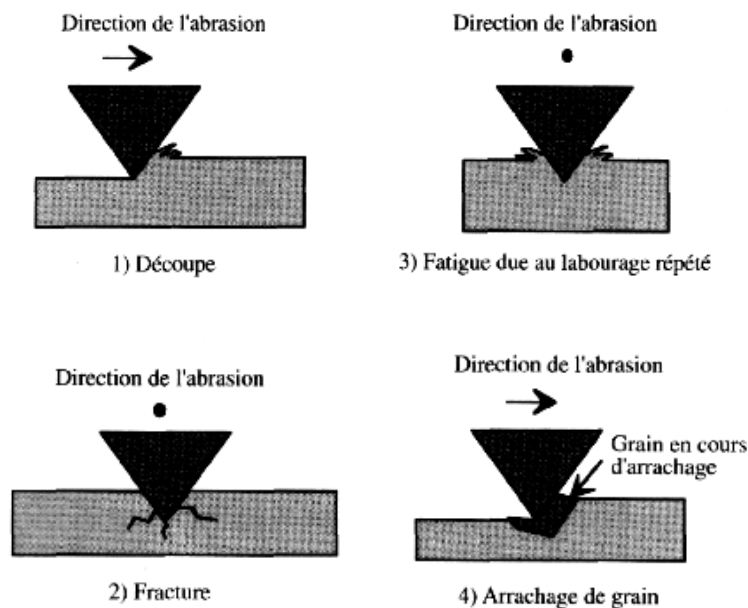


Fig. 15: Les différents modes d'usure abrasive.

1.11.5. Influence de la dureté de l'abrasif

Le rapport dureté de l'abrasif (H_a) sur dureté du matériau (H_m) est également un paramètre important (Fig.8). L'abrasion est faible pour des rapports H_m

$H_a < 0.7-1.1$, augmente fortement dans le domaine $0.7-1.7$, puis tend à se stabiliser pour des valeurs de H_m

$H_a > 1.7$ [35].

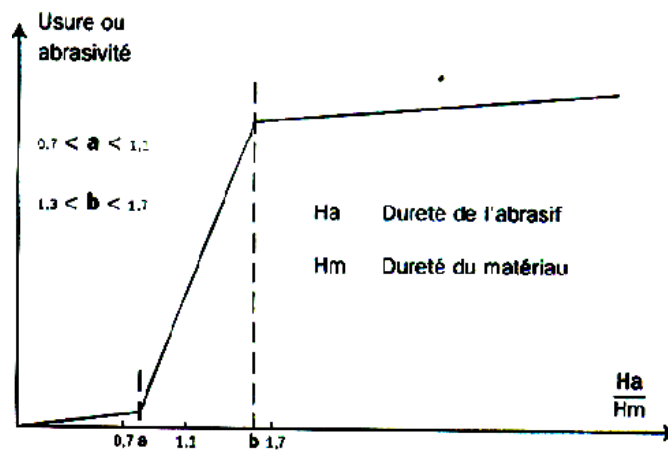


Fig. 16: Evolution de l'usure en fonction du rapport H_a / H_m d'après Khrushov.

1.11.6. Influence de la vitesse

La perte de masse par abrasion augmente légèrement avec la vitesse d'abrasion. Cet accroissement est attribué à une baisse des caractéristiques mécaniques sous l'effet de l'échauffement provenant de l'accroissement de la vitesse. [18,25].

1.11.7. Influence de la microstructure

L'aptitude au frottement d'un matériau dépend de ses caractéristiques, de sa composition et de sa structure. C'est le graphite qui donne aux fontes leurs avantages. Dans le cas de frottement sans lubrification, ou en cas d'interruption du film d'huile, le graphite, qui est autolubrifiant, fait diminuer les risques de jonctions intermétalliques (grippage) par formation d'un manteau protecteur. Par ailleurs, les microcavités qui subsistent lorsque le graphite est arraché peuvent retenir le lubrifiant et éviter la rupture du film d'huile ou encore capter les débris des surfaces endommagées. Généralement, pour résister convenablement à l'usure par abrasion sous forte charge, les pièces en fonte ordinaire devront le plus souvent être trempées à la coulée, contre refroidisseur, de façon à présenter localement une structure de fonte blanche (inusinable).

En fait, bien que la fonte grise ait encore de larges possibilités dans ce domaine, les cas d'abrasion sévère, éventuellement avec choc, à chaud ou en milieu corrosif, sont plutôt du domaine des fontes alliées. Les cas d'abrasion sous faible charge (glissières de machines-outils par exemple) se traitent par le recours à des fontes grises résistantes trempées superficiellement après usinage, au chalumeau ou par induction, voire par laser de puissance [18,25].

1.11.8. Phénomènes de surface dans l'usure des Fontes

Presque tous les auteurs qui ont étudié l'usure des fontes signalent la présence de couches superficielles, préexistantes ou formées pendant le glissement, et qui jouent un rôle important pour usure et le frottement.

Au-delà des couches obtenues par traitements de surface, on trouve sur les fontes :

- Des couches d'oxydes,
- Des films de graphite,
- Des couches blanches

1.11.9. Les couches d'oxydes

Admettons qu'une surface métallique est exposée à l'air, la réaction chimique entre le gaz et le métal, entraîne la formation d'un film d'oxyde, qui évite le contact métallique direct pendant le glissement ceci justifie le fait bien connu, que les coefficients d'usure soient en général, plus grands sous vide que dans l'air.

La chaleur produit par frottement, et élévation de température qui en résulte, favorisent la croissance d'une couche d'oxyde, largement citée dans la littérature, en ce qui concerne l'usure douce des fontes, la magnétite et l'hématite sont les oxydes les plus souvent trouvés.

La cinétique des réactions chimiques d'oxydation et le comportement mécanique du film, contrôlent l'établissement d'un régime stabilisé d'usure douce, a ce propos, il faut tenir compte de l'état de contraintes d'uns le contact (compression triaxiale en certaines zones), ce types de sollicitation peut permettre un comportement ductile, même si le matériau est normalement fragile, comme dans le cas des oxydes.

L'observation de surfaces usées, montre l'existence de transfert de matériau oxydé entre les deux antagonistes, ce transfert conduit à la réduction de rugosité des deux surfaces et leur confère un aspect glacé [26].

1.11.10. Les films de graphite

Lors du contact, et lorsque les aspérités (des fontes) sont déformées plastiquement, le graphite s'écoule vers l'extérieur, son adhésion aux surfaces métalliques naissantes ou oxydées, crée un film caractéristique de ces matériaux ce phénomène est très sensible à l'humidité ambiantes.

Le film de graphite est généralement responsable des bonnes performances des fontes en frottement [27], car il protège les matériaux du contact métallique, il fonctionne comme lubrifiant solide et il permet une fixation plus efficace des lubrifiants liquides.

Généralement le film de carbone est mince et il ne couvre la surface que d'une façon partielle, dans ses essais d'usure lubrifiée d'une fonte GL contre acier cimenté a trouvé une couche presque continue , d'épaisseur importante sur toute la zone de frottement, alors que sur les autres parties des éprouvettes, il n'y avait pas de film, sa teneur en carbone était variable entre 30 et 100, les zones plus riches se situant

directement par-dessus des lamelles de graphite, l'oxyde de fer (Fe_3O_4) était l'autre composant, selon l'autre cité, les films formés dans les moteurs ont en plus, une teneur entre 30 et 40 d'autres composants que l'on ne trouve pas dans ces essais (produits de la combustion et de la décomposition du lubrifiant) [27].

1.12. Comportement électrochimique :

1.12.1. Résistance de polarisation

La mesure de la résistance de polarisation constitue une seconde méthode des essais électrochimiques. La polarisation est limitée au voisinage immédiat du potentiel de corrosion de sorte que dans ce domaine (balayage à $\pm 20mV$), il est possible de linéariser les expressions des courbes partielles anodiques et cathodiques et par suite assimiler la courbe courant- tension globale à une portion de droite au voisinage du potentiel de corrosion. Donc la loi d'ohm est applicable dans ce cas et elle est de la forme :

$$E = R_p \cdot I \dots \dots \dots \text{éq. (1)}$$

Où

$$R_p = E/I \dots \dots \dots \text{éq. (2)}$$

En examinant cette relation, on remarque que R_p est inversement proportionnelles à I_{corr} , les autres termes pouvant former une constante K. Lorsque R_p croît, I_{corr} décroît et réciproquement.

Ce rapport est assimilé à une résistance exprimée (E en ohm). Cette valeur peut être obtenue expérimentalement en imposant une surtension de quelques millivolts de part et d'autre du potentiel stable et en mesurant la pente de la droite $I = f(E)$. La courbe $I = f(E)$ est en fait, une résultante de deux courbes partielles théorique [35].

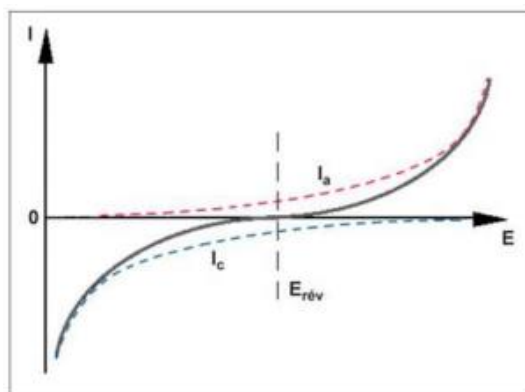


Fig.17: Courbes élémentaires anodique et cathodique et courbe globale de polarisation (échelle linéaire) [35].

b)- Droites de Tafel

Ceci est illustré sur la **figure 18**, où l'on a représenté l'évolution des densités de courant anodique I_a et cathodique I_c (appelées courbes élémentaires de polarisation) ainsi que la courbe globale de polarisation en fonction du potentiel E.

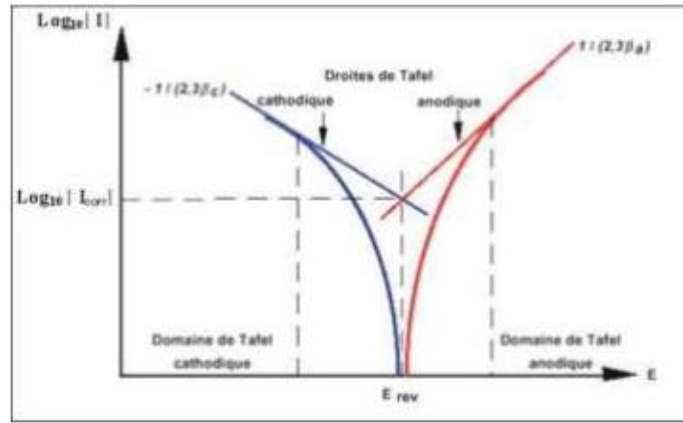


Fig. 18: Courbe $\log |I| = f(E)$ et droites de Tafel [35].

Un système de corrosion est en fait constitué en général par deux réactions électrochimiques couplées correspondant l'une à l'oxydation du métal ($M \rightarrow M^{n++} + ne^-$) et l'autre la réduction de l'oxydant présent dans la solution (par $2H^{++} + 2e^- \rightarrow H_2$).

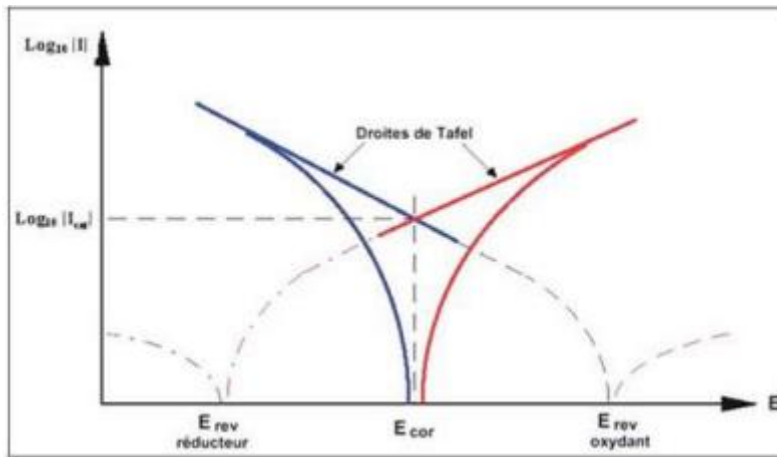


Fig. 19: Représentation schématique d'un système de corrosion [35].

Les propriétés oxydantes de la solution entraînent une réaction entre le métal et la solution qui conduit à la croissance initiale d'adsorbats hydroxylés à la surface du métal. Il se forme ensuite une couche oxydée continue non poreuse qui constitue une phase homogène nouvelle **Figure 20**.



Fig. 20: Interface métal/électrolyte

Les propriétés de conduction de cette couche freinent considérablement la cinétique de dissolution du métal (*Fig. 22*). Dans la gamme des potentiels élevés, la couche peut, dans certains milieux, soit ne plus se former soit, être détruite; étant données les conditions très oxydantes, la vitesse de dissolution du métal est alors à nouveau élevée domaine « transpassif ».

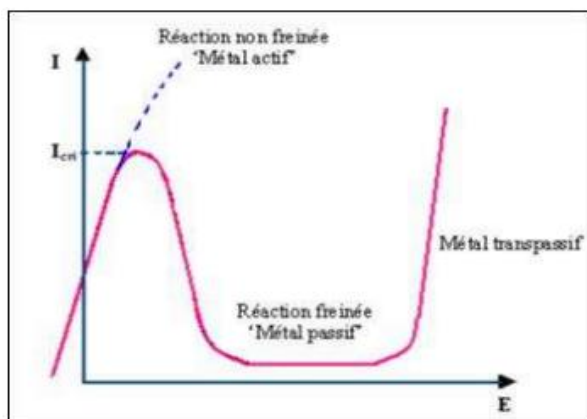


Fig. 21: Courbe de polarisation anodique caractéristique d'un métal passivable [35].

Les potentiels de piqûres E_p et de repassivation E_{rp} sont obtenus par la méthode potentiodynamique cyclique qui consiste à tracer les courbes intensité-potentiel aller et retour comme illustré sur la figure 23 où E_1 représente le potentiel de corrosion du système. La courbe retour a été obtenue en inversant le sens de balayage en potentiel à partir d'un point arbitraire de la courbe $I(E)$ du domaine transpassif. Cette courbe coupe la courbe $I(E)$ en un point correspondant au potentiel de repassivation E_{rp} . Il est précédé sur la courbe $I(E)$ par des instabilités de courant anticipant l'apparition de piqûres stables [36]. Une piqûre stable formée au-dessus du potentiel de piqûration continue de croître à des potentiels plus faibles jusqu'au potentiel de repassivation; au-delà, il y a repassivation. Le potentiel de repassivation est donc celui au-dessous duquel une piqûre même déjà formée est protégée contre la corrosion et la repassivation de celle-ci est donc possible [37]. La faible différence ($E_p - E_{rp}$) indique une bonne résistance à la croissance des piqûres : plus la largeur est faible, plus la résistance à la corrosion est élevée. La largeur du domaine ($E_p - E_{rp}$) traduit l'aptitude des piqûres à se repassiver [38].

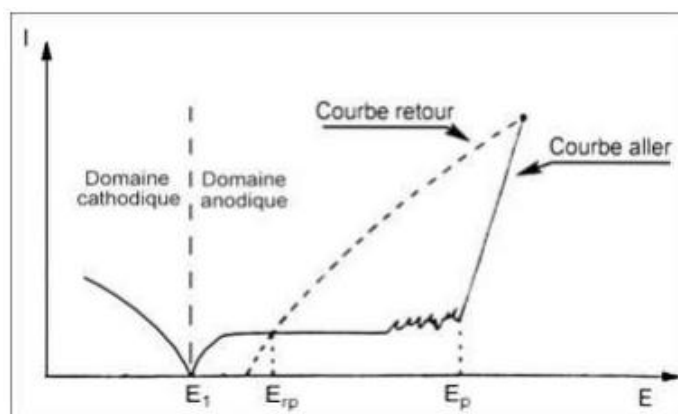


Fig. 22: Définitions du potentiel de piqûres et du potentiel de repassivation [37]

1.13. DIFFERENTS TYPES DE CORROSION

Le plus souvent, la première manifestation tangible de la corrosion est d'ordre visuel : on constate le phénomène par sa localisation ou par la modification de l'aspect extérieur de l'objet qu'il affecte. Aussi, les diverses formes de corrosion que l'on rencontre portent souvent un nom évocateur de la manière dont elles se manifestent. C'est le cas de la corrosion générale, de la corrosion par piqûres, ou encore de la corrosion

intergranulaire. D'autres formes de corrosion portent un nom associé au mécanisme mis en œuvre. C'est le cas de la corrosion sous contrainte, de la corrosion par effet de crevasse ou de la corrosion-érosion [38].

En réalité, il n'y a pas systématiquement de relation biunivoque entre le type de corrosion et la morphologie du dommage. Cette dernière permet tout au plus de privilégier certaines formes de corrosion possibles. Nous présentons sommairement ci-après, ces différentes formes de corrosion.

1.13.1. Corrosion générale

C'est le phénomène de corrosion le plus simple et le mieux connu. Il survient dans le cas d'un environnement homogène (absence de gradient de température, de pression ou de concentration le long de l'interface) et lorsque le métal lui-même présente vis-à-vis de cet environnement un comportement suffisamment homogène. Cette homogénéité de comportement peut être le fait soit d'une homogénéité intrinsèque du matériau due à l'absence d'inclusions ou de défauts structuraux, soit au non sélectivité de l'environnement vis-à-vis de ces défauts [36].

1.13.2. Corrosion galvanique

C'est une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Comme son nom l'indique, elle résulte de la formation d'une pile qui conduit à une hétérogénéité de l'attaque. Les zones où se produisent les réactions anodique (corrosion du matériau) et cathodique (réduction de l'oxydant) sont distinctes. Ainsi que nous l'avons mentionné, cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, soit du milieu ou bien des conditions physicochimiques à l'interface.

1.13.3. Corrosion localisée

Ce phénomène survient, au contraire, lorsque le matériau est mis en présence d'un environnement présentant vis-à-vis de lui un comportement sélectif. Cette sélectivité peut avoir des origines multiples tant au niveau du matériau (alliages hétérophasés, présence d'inclusions, protection de surface localement défectueuse, matériaux bimétalliques...) qu'au niveau de l'environnement (variation locale de composition, de pH ou de température) [32,38].

1.13.4. Corrosion par piqûres

Elle se caractérise par une attaque très localisée d'où son nom de "piqûre" (en anglais Pitting corrosion, de pitting : puits, trou) et est généralement associée à une rupture locale du film passif qui se produit souvent en présence de chlorures, ou à une passivation incomplète (quantité insuffisante d'inhibiteurs de corrosion, par exemple). La quantité de métal corrodé est très faible mais cette forme d'attaque peut parfois conduire à des perforations rapides des pièces affectées. La corrosion par piqûres est un phénomène très répandu qui concerne une grande variété de matériaux comme les aciers inoxydables, les alliages de nickel, de titane, d'aluminium ou de cuivre [38].

1.13.5. Corrosion intergranulaire

Comme son nom l'indique, cette forme de corrosion se manifeste par une attaque localisée aux joints de grains du matériau. Ces derniers, en effet, constituent des zones désordonnées par rapport au réseau

cristallographique plus régulier des grains. Ils contiennent de ce fait de nombreux défauts de structure (lacunes, dislocations) favorables à la précipitation de phases intermétalliques ou de composés métalliques tels que les carbures, ainsi qu'à la ségrégation d'impuretés en solution solide [38].

1.13.6. Corrosion par crevasse

Cette forme de corrosion présente de grandes analogies avec la corrosion par piqûres. Comme cette dernière, elle concerne avant tout les alliages passivables (aciers inoxydables, alliages de titane, d'aluminium..) utilisés dans des milieux aérés ou contenant un oxydant et le plus souvent en présence d'halogénures. Elle se rencontre dans des zones confinées (d'où son nom de corrosion par effet crevasse) de faible volume et où le milieu est stagnant, telles que les interstices entre deux plaques rivetées, les zones sous dépôts ou les joints [38].

1.13.7. Autres formes de corrosion :

1.13.7.1. Corrosion-Erosion

La corrosion-érosion affecte de nombreux matériaux (aluminium, acier, etc.) et est particulièrement connue pour le cuivre en milieu marin. Ce phénomène correspond à une dégradation de la surface sous l'effet de l'impact de particules, de gouttelettes, d'un jet, ou sous l'action d'un écoulement turbulent au voisinage d'un défaut de surface, et conduit à un amincissement local qui revêt souvent l'aspect d'une piqûre allongée. La turbulence ainsi créée contribue à éroder le film protecteur jusqu'à le faire disparaître, créant ainsi une pile de corrosion.

1.13.7.2. Corrosion-cavitation

La corrosion-cavitation désigne quant à elle la dégradation progressive du matériau sous l'action conjuguée de la corrosion et de l'implosion de bulles de cavitation. Le phénomène de cavitation, bien connu en mécanique des fluides, consiste en la formation de bulles dans un écoulement turbulent suite à une diminution locale de la pression en dessous de la tension de vapeur du fluide. Lorsque ces bulles atteignent une zone où la pression est plus forte, elles implosent en produisant une onde de choc. Cette dernière induit une fatigue locale du matériau conduisant à des ruptures répétées du film passif et à une attaque localisée.

1.13.7.3. Corrosion sous contrainte

Comme son nom l'indique, la corrosion sous contrainte (CSC) résulte de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique (résiduelle ou appliquée), et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau, chacun de ces facteurs pris séparément n'étant pas susceptible à lui seul d'endommager la structure. Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures inter ou trans granulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte.

1.14. FACTEURS INFLUENCANTS LA CORROSION [39].

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que les :

- Facteurs définissant les modes d'attaque ;

- Facteurs métallurgiques ;
- Facteurs définissant les conditions d'emploi ;
- Facteurs dépendant du temps ;

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau 7 : Facteurs de corrosion [39].

Facteurs du milieu corrosif	Facteur métallurgiques	Facteurs définition la condition d'empli	Facteurs dépendants du temps
- Concentration du réactif - Teneur en oxygène - pH du milieu - Température - Pression	- Composition de l'alliage - Procédés d'élaboration - Impuretés	- Etat de surface - Forme des pièces - Emploi d'inhibiteur - Procédés d'assemblage	- Vieillessement - Tensions mécaniques - Modification du revêtement - Protecteurs.

1.15. La corrosion des fontes :

La fonte est différente de l'acier par sa plus haute teneur en carbone (> 2 %) et silicium (> 1 %) qui la rend moins chère à produire que l'acier. La résistance à la corrosion de la fonte est comparable à celle de l'acier au carbone, et peut être même supérieure suivant la teneur de l'alliage. En raison de la teneur élevée en carbone, du graphite, cathodique par rapport au fer, se forme dans la microstructure de l'alliage sous forme de paillettes (fonte grise) ou de nodules (fonte ductile) suivant sa composition et son traitement thermique.

Cette différence de potentiel engendre un mécanisme appelé corrosion graphitique ou graphitisation, phénomène qui se produit sur les fontes non alliées exposées à des eaux moyennement acides ou douces. Les eaux présentant une faible teneur en hydrogène sulfuré (1ppm) favorisent aussi la graphitisation. La graphitisation tend à être pénétrante mais à des vitesses peu élevées. Lorsqu'une telle corrosion se produit, il y a formation sur la surface d'une couche d'oxyde de fer contenant du graphite qui conserve la forme de l'élément en cours de corrosion, un contrôle visuel ne permet donc pas de détecter cette forme de corrosion.

La durée de vie de la plupart des pièces en fonte dans des eaux domestiques aérées et alcalines à température ambiante s'avère très satisfaisante, principalement en raison de l'épaisseur des pièces moulées et de la corrosion modérée uniforme.

En distribution, la longévité des réseaux en fonte peut aller au-delà de cent ans, mais ils nécessitent à priori une protection à long terme. Jadis, l'intérieur des tubes en fonte était protégé par des revêtements simples type vernis bitumineux. Aujourd'hui, on utilise des revêtements à base de mortier de ciment qui sont également résistants aux eaux résiduaires contenant des sulfures. On trouve aussi de plus en plus des revêtements à base de matériau plastique agrégé.

La protection extérieure contre la corrosion est souvent constituée par un revêtement bitumineux épais d'une centaine de microns. Une protection renforcée aux discontinuités du revêtement peut être apportée par des anodes sacrificielles, la pulvérisation de zinc ou par une protection cathodique par potentiel imposé suivant la corrosivité des sols.

Les tubes en fonte ductile, dont l'utilisation s'est fortement développée par suite de leur grande résistance mécanique, présentent une longévité un peu réduite par rapport à celle de la fonte grise due à leur moindre épaisseur et une vitesse initiale de corrosion plus marquée [40].

2. Présentation de quelques résultats expérimentaux inspirés de la littérature

Comportement tribologique de la fonte GS :

2.1. Usure par abrasion

L'étude menée par BARA Zoheir et al. [**Mémoire de Master, Département de métallurgie, UBM Annaba, Master en technologie de fonderie, session Juin 2017**] a montré le comportement tribologique des fontes grises à graphite sphéroïdale après traitements thermiques. La figure 24 montre la variation de la perte de masse en fonction du temps de glissement de la fonte à graphite sphéroïdal brut de coulée et après traitement d'amélioration (trempe énergétique suivie d'un revenu à basse température).

Il a été constaté que les traitements thermiques ont un effet considérable sur la résistance à l'usure. Le meilleur comportement à l'abrasion est obtenu dans le cas de des fontes GS relativement aux fontes GS brut de coulée ou la perte de masse est importante. Il a été aussi montré que le revenu effectué à basse température a provoqué la formation d'une structure de martensite de revenu qui a nettement contribué à l'amélioration de la perte de masse.

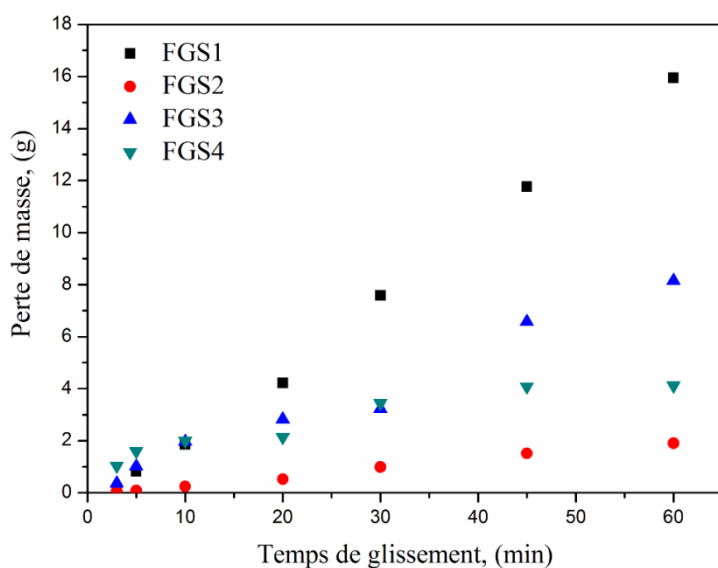


Fig 23: Variation de la perte de masse en fonction du temps de glissement de la fonte GS [Bara Zoheir]

- a) FGS1- Fonte à graphite sphéroïdal, échantillon épais brut de coulée
- b) FGS2- Fonte à graphite sphéroïdal, échantillon épais traité
- c) FGS3- Fonte à graphite sphéroïdal, échantillon mince brut de coulée
- d) FGS4- Fonte à graphite sphéroïdal, échantillon mince traité

2. Coefficient de frottement des fontes GS

La figure 24 montre l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps de glissement des fontes GS brut de coulée et après traitements thermiques.

Le coefficient de frottement appelée friction désigné par (μ), est le rapport entre l'effort normal appliqué à l'échantillon (F_n) et l'effort tangentiel (F_t), la relation est donnée comme suit : $\mu = \frac{F_t}{F_n}$, ce coefficient dépend en grande partie de la nature des surfaces (état de surface). La force de frottement dépend de la nature des surfaces et de la normale. Elle est indépendante de l'aire de contact et de la vitesse.

Le Coefficient de frottement d'une fonte GS en contact avec l'huile est de 0.13.

La microstructure influe fortement sur le coefficient de frottement. Pour les structures à matrice ferritiques, leurs déformations entraînent plus de détachement de particules qui favorisent le frottement.

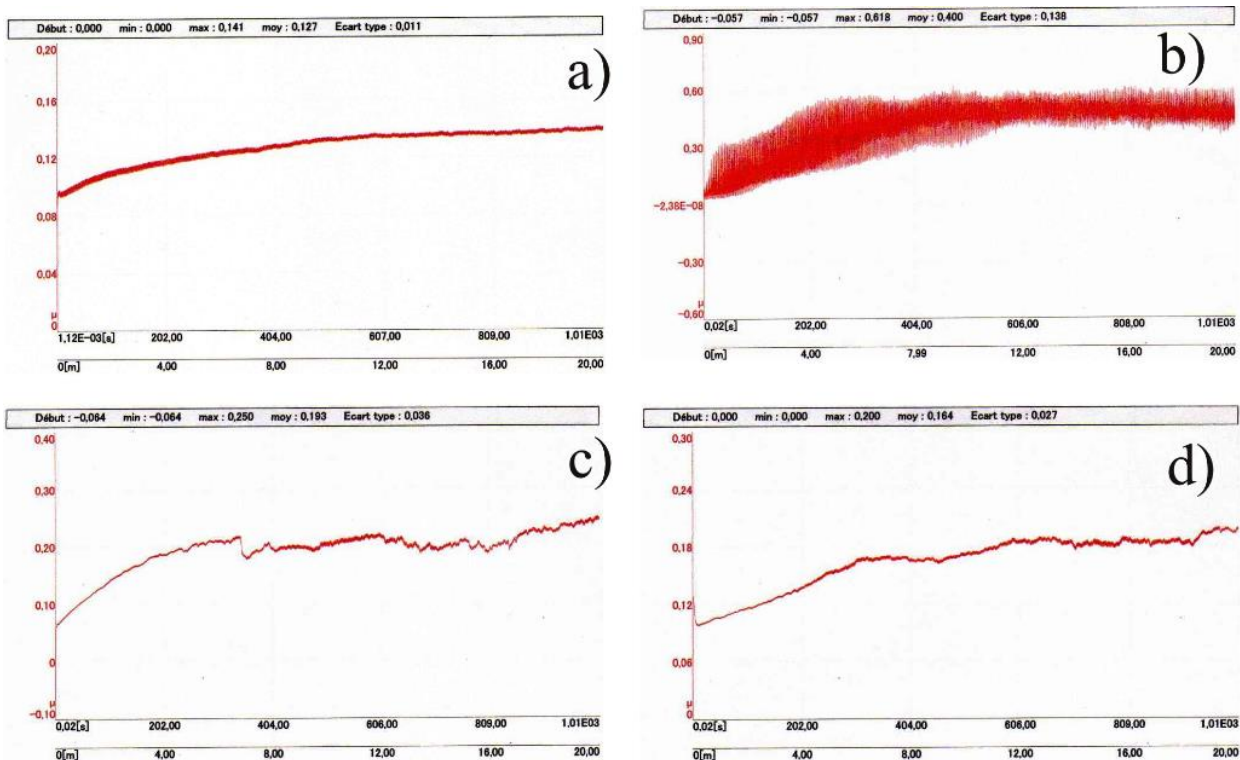


Fig.24: Variation du coefficient de frottement en fonction de la microstructure[[Bara Zoheir](#)].

- a) FGS brut de coulée (Echantillon épais)
- b) FGS brut de coulée (Echantillon mince)
- c) FGS traité (Echantillon épais)
- d) FGS traité (Echantillon mince)

Quant aux structures comme la martensite de revenu qui est caractérisée par un meilleur compromis entre ductilité et résistance, lors du test de frottement, s'oppose à se déformer plastiquement et par conséquent on assiste à moins d'enlèvement de matières. La présence de matières gêne le déplacement de la bille en WC et systématiquement le glissement augmente. Nous pouvons dire que ces structures sont préconisées à la fois pour augmenter d'avantage.

Conclusions :

Les fontes grises (FG) sont donc des fontes alliées (Cu, Ni, Si). Le graphite est un matériau tendre et qui est un lubrifiant solide. Les fontes grises sont fragiles, usinables, et ont des bonnes propriétés d'absorption des vibrations. Le graphite étant du carbone pur, il représente une très faible proportion massique de l'alliage : la faible quantité de carbone dans la fonte (moins de 6,67 %) ne permet pas de former beaucoup de graphite. Toutefois, la masse volumique du graphite étant très faible (env. 2 kg/dm³), cela peut représenter une fraction volumique importante (plus de 10 % du volume).

Le graphite précipite habituellement sous forme de paillettes, ou lamelles, notamment en raison de la présence d'impuretés, en particulier du soufre ; on parle de fonte à graphite lamellaire (FGL).

Les fontes à graphite lamellaire ont, par rapport à d'autres alliages ferreux laminés ou moulés, des caractéristiques mécaniques de résistance, de plasticité et de ténacités nettement inférieures. Pour ces fontes, la quantité et le type de lamelles de graphite sont déterminantes pour les propriétés mécaniques, Ces lamelles de graphite agissent comme points de concentration de contraintes et, sous effort, favorisent la propagation de la crique. Il en résulte des fontes grises peu résistantes, avec des contraintes à la rupture de l'ordre de 150 à 400 MPa et pratiquement aucun allongement, Mais il ne faut pas oublier qu'en compensation, les fontes grises à graphite lamellaire présentent des propriétés d'utilisation tout à fait spécifiques, liées à la présence du graphite, et qui leur donnent, pour certaines applications, un avantage décisif :

- ✓ bonne tenue au frottement;
- ✓ capacité d'amortissement des vibrations exceptionnellement élevée;
- ✓ usinabilité généralement excellente (surtout après recuit) ;
- ✓ bonne résistance à la corrosion par les sols et agents atmosphériques, les gaz de combustion, etc.
- ✓ excellente tenue au choc thermique violent pour les qualités à bas module d'élasticité ;
- ✓ conservation intégrale des propriétés de - 100 à + 300 °C au moins (utilisation courante jusqu'à 500°C).
- ✓ propriétés de fonderie remarquables (retrait faible ou même gonflement à la solidification, point de fusion bas), de sorte qu'ils apportent souvent des solutions très économiques.

On peut ajouter des éléments d'alliages piégeant le soufre, en général des terres rares, ce qui permet au graphite de précipiter sous forme de particules sphériques ; on parle de fonte à graphite sphéroïdal (FGS). L'absence de lamelles supprime des concentrations de contrainte qui sont une source de fragilité ; on a donc une fonte ductile, malléable.

Dans le cas des FGS peu alliée, la résistance à la traction est proportionnelle au taux de perlite :

- 0 % perlite (100 % ferrite) : $R_m = 400$ MPa (EN-GJS 400-15, EN-GJS 400-18) ;
- 50 % perlite (50 % ferrite) : $R_m = 500$ MPa (EN-GJS 500-7) ;
- 100 % perlite (0 % ferrite) : $R_m = 700$ MPa (EN-GJS 700-2).

Références bibliographiques

- [1]- Mohammed Iliasse BOULIFA, Effet des éléments d'alliage sur la structure et les propriétés des fontes ADI, Thèse, (2011).
- [2]- Jacques Fargues, matériaux métalliques, Définition métallurgique des fontes, (2008), pp. 309.
- [3]- Khalid AFANGA, Modélisation systémique des filières sidérurgiques, Le haut fourneau conventionnel, Thèse, (2014).
- [4]- S.BENSAADA, ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS), pp. 57-58.
- [5]- Khalid AFANGA, Modélisation systémique des filières sidérurgiques, Filière Sidérurgique Globale, Thèse, (2014). pp.78- p84.
- [6]- S.BENSAADA, ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS), pp. 53 et 64.
- [7]- Khalid AFANGA, Modélisation systémique des filières sidérurgiques Description physico-chimique du haut fourneau classique, Thèse, (2014).
- [8]- S.BENSAADA, ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS), pp. 68.
- [9]- Jacques Fargues, matériaux métalliques, Définitions, notions de base et classification des fontes, (2008), pp.309.
- [10]- Simone PARENT-SIMONIN et Jean-Claude MARGERIE. Technique de l'ingénieur : traitement thermiques des fontes.
- [11]- Technique de l'ingénieur M 380 ; Jean-Claude MARGERIE ; Propriétés des fontes grises ordinaires.
- [13]- Jacques Fargues, matériaux métalliques, Définitions, notions de base et classification des fontes, (2008), p312.
- [14] – Technique de l'ingénieur M 380 ; Jean-Claude MARGERIE ; Propriétés des fontes grises ordinaires.
- [12] – Technique de l'ingénieur M 770; Jacques CHÉRIÈRE ; Propriétés des fontes à graphite nodulaire.
- [15]- Laplanche, Les fontes et leur traitement thermique (tome II) page 139, 142 à 144, 160, 169, 170 à 172.
- [16] – www.site.com ; « effet de Si sur les fontes ».
- [17] – Métallurgie de la fonderie.
- [18]- H. Le Breton: Manuel pratique de fondeur de fonte, Dunod, paris 1966.
- [19]- M. Geier, Métallurgie de fonderie T2, édition Eyrolles, (1978).
- [20] – Technique de l'ingénieur M 4610 ; Jacques JAULT ; Fontes à graphite sphéroïdal.
- [21] – Technique de l'ingénieur M 1611 ; Christian GATELLIER ; Élaboration de la fonte et de l'acier.

- [22]- TLILI-DJAOUAHDOU SAMIRA, Elaboration et Caractérisation des Revêtements durs de Molybdène et des Couches Nitrocarburées Déposés sur une Fonte Grise, Facteurs exerçant une influence sur les caractéristiques mécaniques, Thèse, (2013).
- [23]- Jean-Claude MARGERIE, Propriétés des fontes grises Ordinaires, Caractéristiques mécaniques, **M 380**
- [24]- Rhp : www.fondeur.de
- [25]- www.site.com ; « effet de Si sur les fontes »
- [26]- M.KAWAMOTO and K. CKABYASHT : Study of dry sliding wear of cast iron as a function of surface temperature. *Wear* , 58 (1980).
- [27]- V.A.KISLAK ; the nature of white layers formed on friction surfaces .(in : *Friction and Wear in Machinery*) ASME Trans. Vol. 15 (1962)
- [28]- K. FURSUND ; Wear in cylinder liners. *Wear*, (1957\58) 114-228.
- [29]- T.S. EYRE ; Wear resistance of metals- (in *Treatise on Materials Science and Technology*, vol .13 – WEAR) Ed . Douglas Scott, Ac. Press, N.Y. 1979.
- [30]- F. Wilson and T.S. Eyre : Effect of matrix structure and hardness on the wear characteristics of an S.G. cast iron. *Wear*, 14 (1969) 107-117.
- [31]- K.H.Lo, C.H.Shek, J.K.L.Lai : Recent developments in stainless steels, *Materials Science and Engineering R* 65 (2009).
- [32]- J. Baralis & G. Maeder : Précis métallurgie, Nathan, Paris, 1997.
- [33]- Madeleine Durand-Charre : La microstructure des aciers et des fontes, Genèse et interprétation, SIRPE éditeur, Paris, 2003.
- [34]- Pierre-Jean CUNAT : Aciers inoxydables, Critères de choix et structure, *Techniques de l'Ingénieur*, M 1115.
- [35]- M. K. AHN, H.S.Know & H.M.Lee : Quantitative comparison of the influences of tungsten and molybdenum on the passivity of Fe-29Cr ferritic stainless steels, Elsevier (1998).
- [36]- Seok Joo Doh , Jung Ho Je, Jim Suk Kim : Influence of Cr and Mo on the passivation of stainless steel of stainless steel 430 (18Cr) and 444 (18Cr–2Mo): In situ XANES study, Elsevier (2003).
- [37]- S M.Addasi, A Shokuhfar : Improvement of Mechanical Properties of Cr-Ni-Mo-Cu-Ti Stainless Steel With Addition of Vanadium, *Journal of Iron and Steel Research, International* (2007).
- [38]- Jean VARRIOT : Chaudronnerie en aciers inoxydables, *Techniques de l'Ingénieur*, A 869.
- [39]- J. J. LAMOUREUX, Précis de corrosion, édition Beauchemin MASSON, 1994.
- [40]- <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/corrosion-des-metaux-et-betons/corrosion-des-materiaux-metalliques/corrosion-de-la-fonte-graphitisation>