

Chapitre I. Les aciers et les fontes

I.1 Introduction

Les aciers et les fontes sont des alliages fer carbone. Théoriquement Les aciers contiennent des teneurs en carbone allant de 0 à 2%, alors que les fontes contiennent des teneurs en carbone comprises entre 2% et 6.67% . Comparés à d'autre types d'alliages non ferrous, les aciers et les fontes sont les alliages les plus utilisés dans l'industrie. Ils trouvent des applications dans beaucoup de domaines industriels, du fait de leurs coût, ainsi que leurs propriétés mécaniques. Il est important de signaler, l'importance de leur aptitude à la transformation de phases qui à son tour va influencer sur les propriéts mécaniques. L'amélioration des propriétés mécanique est un facteur primordial dans le cas des aciers. Ces propriétés sont améliorées soit par 'introduction des éléments d'alliages soit par traitements tharmiques. Dans ce chapitre nous allons parlé en quelques details sur l'acier et ces alliages. [1-3]

I.2 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

I.2.1 Description des constituants du diagramme fer-carbone:

- Propriétés du fer : le fer

Le fer est caractérisé par son polymorphisme cristallin, c'est-à-dire qu'il se présente sous des formes cristallines différentes à des intervalles de température différentes. Entre 273°C et 912°C (fer α) et entre 1392°C et 1538°C (fer δ). Le fer α et le fer δ cristallisent dans le système cubique centré. Entre 912°C et 1392°C (fer γ). Le fer γ cristallise dans le système cubique à faces centrées.

Le fer est blanc argenté. Son numéro atomique $Z = 26$, sa masse atomique égale à 55.85 g/g.mole, sa densité = 7.87 g/cm³. Tf = 1538°C

Les caractéristiques mécaniques du fer dépendent de la pureté du fer et de la grosseur du grain.

- Le carbone :

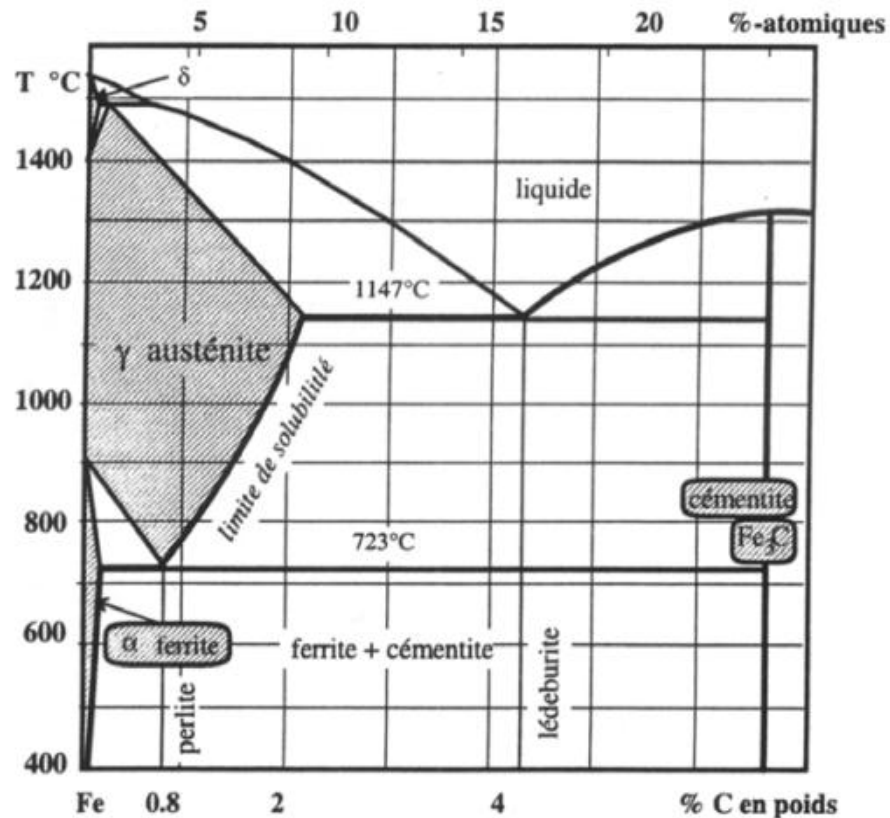
Le carbone est un élément non métallique dont le numéro atomique $Z = 6$.

Mat= 12.01g/g. mole, la densité = 2.5 g/cm³, Tf = 3500 °C,

son rayon atomique = 0.77Å. Le carbone aussi est élément polymorphe, il se présente sous différentes formes comme le graphite ou comme le diamant.

Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et à l'état solide, mais sa solubilité à l'état solide est très limitée. De ce fait la combinaison du fer avec le carbone peut donner naissance à des phases différentes selon un intervalle de température différent.

Le diagramme fer-carbone traduit la composition de l'alliage fer-carbone formé de plusieurs phases, en allant de la gauche vers la droite (0% C- 6.67%C). voir la figure (I.1).



Fig(I.1)Diagramme d'équilibre des aciers au carbone.[4]

L'ensemble des alliages binaires fer- carbone présente les phases suivantes :

a- La Ferrite α :

C'est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer α . C'est du fer pratiquement pur qui ne contient que des traces de carbone (0.008%) à température ambiante. Sa solubilité maximale est de 0.02% en masse à 723°C. La ferrite α est C.C

Elle n'est pas très dure (Hv : 80 à 100), peu tenace ($R_m=300\text{N/mm}^2$), mais elle est très ductile ($A=35\%$ après rupture).

b- La ferrite δ :

C'est une solution solide de carbone dans le fer δ . Sa solubilité maximale est de 0.1%C à $T=1487^\circ\text{C}$. La ferrite δ est aussi C.C.

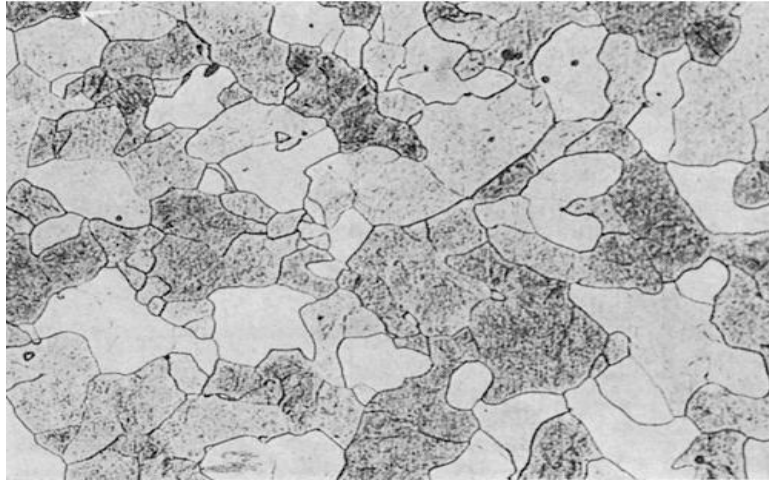


Figure (I.2) : Structure Ferrite. [4]

c- L'austenite γ :

C'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer γ qui peut dissoudre jusqu'à 2.11 %C à $T = 1447^\circ\text{C}$ (solubilité maximale) .

C'est un constituant intermédiaire qui peut être durci par trempe. Le procédé est appelé austénitisation. L'austénite est assez douce et facile à usiner. Elle possède un coefficient de dilatation élevé et une bonne résistance à l'usure.

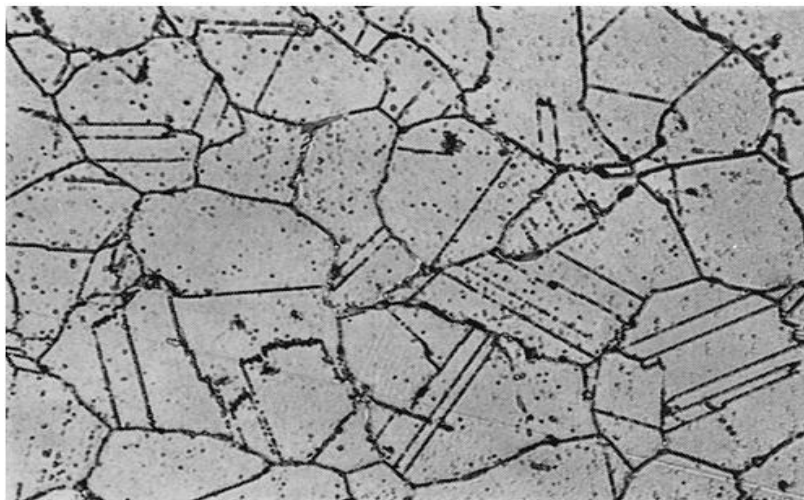


Figure (I.3) : Structure Austénite. [4]

d- La Cémentite

La cémentite ou carbure de fer Fe_3C est un composé intermétallique interstitiel orthorhombique. La cémentite est un composé métastable qui a tendance à se décomposer en ferrite (ou austénite) et graphite. En fait cette transformation ne se manifeste qu'à haute température et dans des particularités. La cémentite est très dure.

e- La Martensite :

C'est une solution solide d'insertion sursaturée en carbone dans le Fer γ .

C'est un constituant de trempe qui peut atteindre une dureté ($HV=800$), mais il est très fragile. La martensite est le résultat d'une transformation sans diffusion de carbone dans le fer γ . Cette structure est caractérisée par une très grande dureté accompagnée d'une grande fragilité, ce qui la rend difficile à usiner. Par conséquent, la structure martensitique doit subir un traitement ultérieur pour remédier à ce défaut.

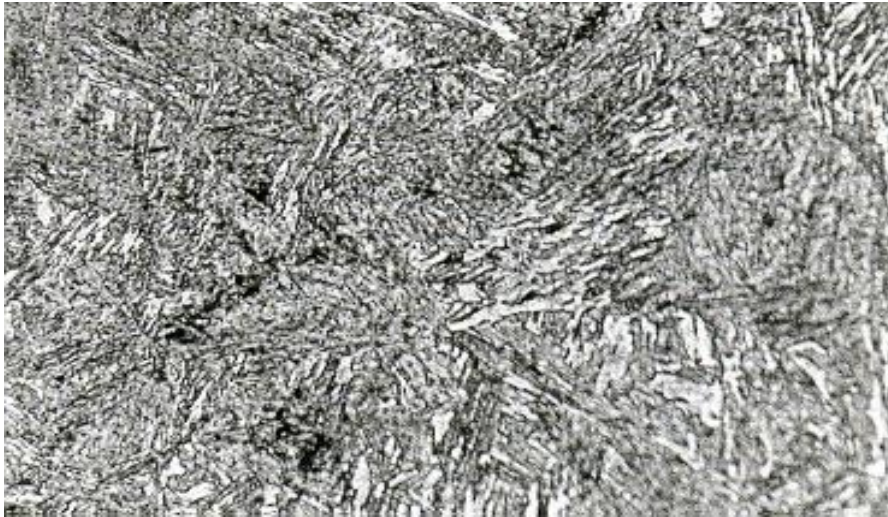


Figure (I.4) : Structure Martensite. [4]

D'après le diagramme fer – carbone on peut noter l'existence de plusieurs points et lignes de transformations en fonction de la température et la teneur en carbone :

1- Transformation Eutectoïde :

C'est une transformation de phase solide-solide à température constante.

Elle a lieu à 723°C pour 0.80% de Carbone. L'austénite se transforme en perlite (ferrite + cémentite) et vis versa.

2- Transformation Eutectique :

C'est une transformation de phase à température constante. Le matériau se comporte comme un corps pur. L'alliage fer-carbone à l'état liquide à la température 1147°C et à 4.3%C donne naissance à deux phases solides ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) appelées lédéburite.

3- Transformation Peritectique :

C'est une transformation de phase à température constante. Le mélange à deux phases (liquide + δ) à une teneur en carbone égale à 0.1% et à $T = 1500^{\circ}\text{C}$ va donner naissance à une seule phase qui est la phase γ , ceci bien sûr lors du refroidissement.

I.3 Classification des aciers:

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation.

L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers

- Les aciers au carbone d'usage general (aciers de construction)
- aciers de traitements thermiques, alliés ou non (aciers de construction)
- Les aciers à outils
- Les aciers inoxydables

I.3.1 Les aciers ordinaires ou aciers au carbone:

Les aciers ordinaires sont des aciers standard d'usage général. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80 % de la production des aciers. (Outre le carbone), ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration:

manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06 %). Ces éléments présentent des teneurs limites dans ces aciers.

Bien qu'on puisse les obtenir avec des propriétés mécaniques variées, les aciers ordinaires ne répondent pas à toutes les exigences d'utilisation. Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes:

- la résistance mécanique à l'état normalisé ou à l'état recuit,
- la trempabilité,
- la soudabilité
- la tenue à chaud,
- la résistance à l'usure et à la corrosion

Les aciers utilisés dans le domaine de construction sont souvent de simple aciers au carbone, mais on utilise souvent des aciers alliés lorsqu'il s'agit de pièces très sollicitées. Pour répondre aux exigences des industriels dans le domaine de la construction mécanique on est sensé de choisir les aciers qui possèdent les caractéristiques mécaniques désirées en construction mécanique. Ainsi, un acier de construction doit être défini par sa composition chimique, par ses caractéristiques mécaniques et par sa trempabilité. Le choix entre les diverses nuances s'exerce donc en fonction des caractéristiques demandées aux pièces pour résister aux sollicitations auxquelles elles seront soumises. Mais on fait intervenir aussi leur dimension et leur forme, qui imposent le mode de trempe et la trempabilité nécessaire.

- Principales nuances d'aciers de construction

On distingue deux grandes catégories : les aciers de construction soudables et les aciers de construction pour traitements thermiques

a- Aciers de construction soudables

les aciers de construction soudables doivent non seulement présenter les niveaux de caractéristiques mécaniques – en particulier de caractéristiques de traction et de résistance à la rupture fragile – qui sont requis pour les utilisations envisagées, mais ils doivent encore pouvoir être soudés dans des conditions techniquement et économiquement satisfaisantes.

Comme ces exigences sont contradictoires du point de vue de la composition chimique, notamment en ce qui concerne les teneurs en carbone et en éléments qui augmentent la trempabilité, un compromis est nécessaire qui sera d'autant plus difficile à trouver que le niveau des exigences sera plus élevé. Malgré cela, c'est sans doute dans ce domaine des aciers soudables que les progrès les plus considérables ont été réalisés au cours des dernières décennies, grâce en particulier au développement des traitements thermomécaniques à haute température et à l'emploi d'éléments de micro alliage.

b- Aciers de construction pour traitements thermiques

Le choix judicieux de la composition chimique et des conditions de traitement thermique de ces aciers permet d'obtenir les caractéristiques mécaniques désirés. De ce fait, on peut classer les aciers de construction alliés dans l'ordre croissant des trempabilités: les aciers au manganèse-chrome les aciers au silicium, au silicium-chrome et au silicium-chrome-molybdène, les aciers au chrome, les aciers au chrome-molybdène, les aciers au chrome-vanadium, les aciers au nickel-chrome, les aciers au nickel-chrome-molybdène, et enfin les aciers au chrome-nickel-molybdène. Les aciers au carbone non alliés sont peu trempant; ils ne seront utilisés que lorsque la trempe à l'eau est possible. Parmi les aciers de construction alliés on peut citer les aciers à caractéristiques spéciales. Ces aciers sont utilisés dans l'aéronautique et dans l'aérospatiale. Ces aciers sont dits aciers à haute résistance car la charge à la rupture à l'état d'emploi peut atteindre 2500 MPa. Ces résistances élevées sont obtenues soit par le traitement de trempe et revenu habituel, soit par des traitements spéciaux comportant un " durcissement structural" provoqué par la précipitation de certains constituants, carbures ou composés intermétalliques par exemple

1.3.2 Les aciers inoxydables:

L'acier inoxydable est un acier couramment appelé acier inox . C'est un acier composé de moins de 1,2 % de carbone et plus de 10,5 % de chrome. La présence du chrome dans l'acier conduit à la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui lui confère son inoxydabilité. D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier, ou encore le molybdène ou le titane qui améliorent la stabilité de l'alliage à des températures autre que l'ambiante. Les aciers inoxydables sont devenus indispensables dans de nombreux domaines : ustensiles de cuisine, objets usuels, médecine, chirurgie, bâtiment et travaux publics, construction navale, automobile, aéronautique, outillage, industries mécaniques, agroalimentaires, chimiques, transports, etc. Il est entièrement recyclable. Un métal est dit inoxydable s'il résiste bien à l'action de l'atmosphère à divers degrés d'humidité et de salinité, à des attaques chimiques (acides, bases, sels, tout autre agent de corrosion). Dans de nombreuses applications devenues de plus en plus sévères en terme de corrosion, on a dû substituer des aciers spéciaux et alliés à l'acier ordinaire. Les aciers réfractaires sont destinés à travailler à chaud (températures supérieures à 550°C), dans des milieux agressifs tels que les milieux oxydants de toute nature (présence d'oxygène, soufre...), réducteurs (hydrogène), les métaux et sels fondus etc. La

température de fonctionnement élevée nécessite, de plus, une bonne tenue mécanique à chaud, en particulier une bonne résistance au fluage. La plupart de ces aciers réfractaires sont des aciers inoxydables dont les propriétés sont améliorées par des additions de molybdène, titane, niobium, etc. Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages métalliques qui contiennent tous du fer et du chrome: c'est essentiellement le chrome qui confère aux aciers une bonne résistance à la corrosion par formation en extrême surface d'une très fine couche d'oxyde de chrome non poreuse. Suivant leur teneur en chrome dont le seuil minimal est de 13% et les traitements métallurgiques qu'ils ont subis, ils présentent un large éventail de propriétés. Entre autres, on distingue

- a) aciers martensitiques; Leur teneur en chrome ne dépasse pas 17% et leur teneur en carbone, qui est fonction de la teneur en chrome peut atteindre 1.1%.
- b) aciers ferritiques:

Leur teneur en carbone est faible (inférieure à 0.08 %). Un acier qui contient plus de 12 % de chrome demeure ferritique à toutes les températures; il ne peut plus prendre la trempe martensitique. Ils peuvent contenir entre 12 et 30 % de chrome. Ils sont aux chauffages

sensibles au grossissement des grains, ce qui entraîne une dégradation de leur ductilité et de leur ténacité.

c) aciers austénitiques:

Malgré les progrès incontestables réalisés, en matière de ductilité et de ténacité, par les aciers inoxydables ferritiques, les aciers inoxydables austénitiques du type Fe-Cr-Ni représentent encore 80 % du marché mondial. Comme le nickel est un élément gammagène, il a tendance à stabiliser l'austénite. Selon leurs teneurs en chrome, en nickel et en carbone, certains aciers peuvent conserver une structure austénitique (C.F.C). L'addition de nickel élément gammagène, en quantité suffisante permet

à l'acier de conserver sa structure austénitique à la température ambiante. Dans de nombreux milieux, leur résistance à la corrosion est remarquable, ainsi d'ailleurs que les propriétés mécaniques et leur formabilité. De par leur structure (C.F.C),

ils ne présentent aucune transition ductile-fragile; on peut donc les utiliser à très basse température (transport et stockage de gaz liquéfiés, par exemple). Finalement, leur résistance à la corrosion et à l'oxydation permet leur emploi à haute température (jusqu'à 900 ou 1000°C, selon les nuances). A ces propriétés, il faut ajouter une excellente soudabilité opératoire et métallurgique, ce qui facilite la mise en œuvre. La nuance de base X5CrNi18-10 contient 18 % de chrome, 9,5 % de nickel et 0,05 % de carbone. Grâce à ses remarquables propriétés d'emploi, elle couvre environ 80 % des applications des nuances austénitiques. Les aciers inoxydables austénitiques ne peuvent subir aucun durcissement par traitement thermique. On peut toutefois les durcir par écrouissage. Comme les aciers ferritiques (C.C), ils sont sensibles au grossissement des grains au chauffage. Restant ductiles, la croissance des grains n'entraîne aucune fragilisation. Outre ces trois familles inoxydables, il existe également des aciers qui contiennent, en proportion variable de l'austénite et de la ferrite ce sont des aciers inoxydables austénoferritiques.

I.4 Designation des aciers :

Dans ce qui suit nous allons donner quelques notions sur les désignations de normalisations des aciers et des fontes (nouvelles et anciennes), ainsi que les explications des valeurs caractéristiques.

1- Désignation AFNOR des aciers (nouvelles) :**a- Aciers non alliés pour traitement thermique :**

La première lettre de la désignation indique la teneur en carbone suivit de son pourcentage multiplié par 100.

Exemple : C 48

Le C indique que c'est un acier non allié et le chiffre 48 le pourcentage multiplié par 100.

b- Aciers faiblement alliés :

Aucun des éléments d'addition ne dépasse 5% en masse

Le premier nombre représente le pourcentage massique moyen en carbone multiplié par 100.

Les lettres qui suivent représentent les symboles chimiques des principaux éléments d'alliage dans l'ordre des teneurs décroissantes.

Le nombre suivant est le pourcentage multiplié par un coefficient multiplicateur de la teneur massique moyenne du premier élément d'alliage.

Eventuellement peut apparaître un pourcentage multiplié par un coefficient multiplicateur de la teneur massique moyenne du deuxième élément d'alliage.

Coefficients multiplicateurs à utiliser pour les aciers faiblement alliés :

4 pour Cr, Co, Mn, Ni et Si.

100 pour N (azote)

1000 pour B (Bore)

10 pour les autres (Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr)

Exemple : 51 Cr V 4, 36 Ni Cr Mo 16, où 51 Cr V 4 signifie acier non allié au chrome vanadium à 0.51% de carbone et 1% de chrome en masse.

c- Aciers fortement alliés :

Leur composition en élément d'addition en masse dépasse 5%.

Exemple : X 4 Cr Mo S 1 8

La lettre X désigne un acier fortement alliés, contenant un pourcentage en carbone de 0.05%, et dont les d'addition sont le chrome (1%), le molybdène (8%) et le soufre.

Il n'y a pas de coefficient multiplicateur dans ce type d'acier.

2- Désignation AFNOR des aciers (anciennes) :**a- Acier non allié pour traitement thermique :**

Il s'agit de la même explication que précédemment, à la différence que le C (carbone) était représenté par XC.

Exemple : XC 48

b- Aciers faiblement alliés :

Les désignations sont quasiment semblables aux nouvelles normes seuls les symboles chimiques étaient remplacés par des symboles AFNOR.

Exemple : 35NCD 16.

c- Aciers fortement alliés :

Ils étaient désignés de la même manière que pour les aciers fortement alliés (nouvelles normes) à la différence que la lettre X était Z, et les symboles chimiques du tableau périodique étaient des symboles AFNOR.

I.5 .Désignation AFNOR des fontes (anciennes) :**a- fontes non alliées :****1- Fontes à graphite lamellaire.**

Ce sont des fontes dans lesquelles le graphite libre est présent sous forme de lamelles. La matrice est de type perlitique.

La désignation comprend :

Les lettres FGL

La résistance à la traction R_m minimale en MPa (N/mm^2), pour des éprouvettes de diamètre 20 mm usinées dans un échantillon de 30 mm , coulé à part (sans le symbole A).

Dans le cas où l'essai de traction est effectué sur des éprouvettes usinées dans un échantillon attendant ou adhérent à la pièce, la désignation est complétée par la lettre A.

Exemple : FGL 250 A

2- fontes à graphite sphéroïdal :

La désignation comprend :

Les lettres FGS

La résistance à la traction R_m minimale en MPa (N/mm^2)

L'allongement A% minimal

Eventuellement, cette désignation peut être suivie de la lettre A indiquant que l'essai est effectué sur éprouvette usinée dans un échantillon attendant ou adhérent à la pièce (comme pour les fontes à graphite lamellaire). Une autre lettre suivie d'un nombre indique que les pièces doivent présenter une résistance particulière aux chocs à basse température (exemple L30 pour un essai à 30 °C).

Exemple : FGS 500 7

3- fontes malléables :

Ce sont des fontes à graphite nodulaire.

La désignation comprend :

Les lettres MB, MN

*MB, malléables à cœur blanc. C'est une fonte à matrice ferritique.

*MN, malléables à graphite nodulaire. La matrice est de type ferritique ou perlitique.

La résistance à la traction R_m minimale en Mpa (N/mm^2), sur une éprouvette de diamètre 12 mm coulée à part.

L'allongement A% minimal

Exemple : MN 450 7

4- fontes alliées:

Fontes austénitiques

Ce sont des fontes fortement alliées, à graphite lamellaire ou sphéroïdal, la matrice est de type austénitique.

La désignation comprend :

La lettre S (sphéroïdal) ou L (lamellaire).

Les principaux éléments d'alliage

la teneur moyenne des éléments d'alliage dans l'ordre énoncé.

Exemple : S NC 30 1

5- fontes blanches:

Ce sont des fontes de matrice martensitique composées de carbures.

La désignation comprend :

Les lettres FB

Les symboles métallurgiques des éléments d'alliage et leur teneur moyenne respectives.

3- Désignation AFNOR des fontes (nouvelles) :

a- fontes à graphite lamellaire:

Elles sont désignées par le symbole FGL suivi de la valeur en mégapascals (Mpa) de la résistance minimale à la rupture par extension.

Exemple FGL 200

b- fontes malléables et fontes à graphite sphéroïdal:

Elles sont désignées par un symbole (MB, MN, FGS) suivi de la valeur en mégapascals (Mpa) de la résistance minimale à la rupture par extension et du pourcentage de la valeur de l'allongement après rupture.

Exemple : FGS 400-15.

Explication des valeurs caractéristiques :

R_e : charge normale à la limite d'élasticité.(en Mpa)

$R_{p,0.02}$: charge conventionnelle à la limite d'élasticité. (en Mpa)

R_m : résistance maximale à la traction de l'échantillon. (en Mpa)

A_r : allongement à la rupture de l'échantillon. (%)

Toutes ces données caractéristiques du matériaux proviennent de l'essai de traction effectué sur des éprouvettes.

H_v : dureté Vickers du matériaux.

Cette dureté est déterminé lors de l'essai de dureté du matériaux. [5-10]