

Chapitre V : Le Fer ces alliages (Aciers et fonte)

V.1. Le fer

Le fer est un élément chimique de symbole Fe et de numéro atomique 26. C'est du métal et les matériaux ferromagnétiques les plus courants dans la vie quotidienne, à l'état pur ou alliage. Le fer pur est un métal de transition ductile, mais en ajoutant une très petite quantité L'ajout d'éléments modifie considérablement ses propriétés mécaniques. Il se combine avec le carbone et d'autres éléments ajoutés pour former de l'acier ($\% C < 2,1$) ou de la fonte ($2,1 < \% C < 6,69$), et sa sensibilité au traitement thermomécanique permet une plus grande diversité des propriétés des matériaux. La présence de fer dans la nature est très rare. Au contraire, il y'a des combinaisons de fer, pour élaborer les fontes et les aciers dont l'exploitation industrielle est beaucoup plus importante que celle du fer. Le fer technique n'est jamais chimiquement pur, il contient toujours des teneurs variables de carbone, de silicium et de manganèse.

V.1.1. Caractéristiques fondamentales du fer

Elles sont résumées dans le tableau V.1 suivant :

<i>Tableau 1 : Caractéristiques fondamentales du fer</i>		
Température de fusion	T_f (°C)	1537-1539
Température d'ébullition	T_e (°C)	3070
Masse volumique	ρ (Kg/m ³)	7874
Résistance à la traction	R_m (N/mm ²)	320-380
Limite d'élasticité	R_e (N/mm ²)	220-250
Allongement à la rupture	A (%)	20-39
Module d'YOUNG	E (N/mm ²)	200-400

Tableau : V.1

V.2. Les alliages de fer (Aciers et fonte)

Les alliages à base de fer (Aciers et fonte) jouent et continuent de jouer un rôle capital sur le plan technologique. Ils constituent en masse près de 90% de la production mondiale de matériaux métalliques. Plusieurs facteurs expliquent cette importance :

- Les alliages ferreux se prêtent facilement à une production en masse.
- Ils sont bon marché et disponibles.
- On peut acquérir sous des formes très variées (plat, rond, profilés) grâce à la diversité des traitements thermiques et des éléments d'addition.
- Ils ont un fort module d'élasticité et une grande limite élastique.

V.2.1. Les fontes (Ex : EN-GJL 150, EN-GJS 400-18)

Ce sont des alliages Fer ayant une teneur en carbone $> 2.1 \%$. Ceci les rend fragiles et exempts de toute déformation plastique. On les utilise donc principalement en fonderie. ON distingue les fontes blanches, grises, malléables et à graphite sphéroïdale en fonction de leur teneur en silicium.

V.2.1.1. Classification des fontes

On distingue les fontes suivantes : Fonte grise, fonte à graphite sphéroïdale, fonte blanche, fonte malléable (ferrique, perlitique).

a) Les fontes grises, moins dures et moins fragiles, amortissent les vibrations et souvent utilisées pour les bâtis des machines.

b) la fonte à graphite sphéroïdal possède des propriétés mécaniques élevées (résistance, ténacité) comparables à celle des aciers et résistent mieux à l'usure. C'est pour cette raison que l'on utilise la fonte à graphite sphéroïdale pour la fabrication des cartes de pompes, des vannes, des vilebrequins, des engrenages...

c) Les fontes blanches Sont dures et fragiles, mais résistent bien à l'usure.

d) Les fontes malléables C'est un alliage résilient dont l'usinabilité est très favorable. Cette fonte est élaborée par le traitement thermique de la fonte blanche. Sont utilisées pour la petite quincaillerie, les raccords de plomberie...

V. 2.2. Les aciers

Ce sont les alliages Fe-C avec les éléments d'accompagnement de Mn, Si, P, S. Les aciers alliés contiennent aussi les éléments d'addition et leur appellation est ainsi dérivée d'un élément d'addition préférentiel : acier au manganèse, acier au nickel, etc.... La teneur maximale en carbone est de 1,7% ce que résulte du diagramme fer carbone métastable. Une influence de phosphore et de soufre dans les aciers est très néfaste : ces éléments agissent à la formation des criques et des

fissures. De ce fait leurs teneurs dans les aciers sont limitées très strictement par une norme technique.

V.2.2.1. Classification des aciers

1/ Aciers d'usage général ou bas carbone (% C < 0,2%) (Ex : S355, E335)

Ces aciers sont définis principalement par leurs propriétés mécaniques :

- **Leur résistance** mécanique est de l'ordre de $R_r = 500\text{MPa}$ pour la rupture et de $R_e = 350\text{MPa}$ pour la limite élastique ;
- ils sont ductiles puisque leur teneur en carbone est faible (%C < 0,2%).
- l'allongement relatif avant rupture est de l'ordre de 25%. Ces aciers sont produits sous forme de profilés (produits longs) ou sous forme de tôles (produit plats) en fonction de leur utilisation :
- **Les produits longs** comprennent les poutrelles, les profiles de sections diverses, les fers marchands, les tubes, les fils, les câbles et les rails.
- **Les produits plats** comprennent les tôles fortes, les plaques (épaisseur > 5mm), les toles minces pour l'emboutissage.

2/ Aciers à traitement thermique (Ep : C32, 20NiCr6, 35NiCrMo16) :

On distingue 3 grands types de traitement thermique : les recuits, les traitements dans la masse (trempe, revenu) et les traitements de surface (trempe superficielle, cémentation, nitruration...).

Le recuit :

Le recuit consiste en :

- Chauffer la pièce à une température déterminée dite température de recuit-
- Eventuellement à maintenir cette pièce à cette température pendant un temps donné.
- Un refroidissement progressif à l'air calme.

Le recuit permet notamment d'éliminer ou réduire les contraintes du métal lié à une action antérieure (déformation, soudure, etc.) ou un traitement thermique antérieur (trempe, etc.) ou de provoquer la formation d'une structure favorable à une action ultérieure (déformation, usinage, etc.) ou un traitement thermique ultérieur.

La trempe :

La trempe consiste en :

- Chauffer la pièce à une température déterminée.
- Refroidir brutalement la pièce en la plongeant dans de l'eau (trempe à l'eau) ou de l'huile (trempe à l'huile) ou à l'air soufflé.

Une trempe permet d'obtenir des aciers très durs mais cassants. Elle est généralement suivie d'un revenu.

Le revenu :

Un revenu consiste en :

- Chauffer la pièce à une température déterminée (inférieure à la température de trempe).
- Eventuellement à maintenir cette pièce à cette température pendant un temps donné.
- Un refroidissement progressif à l'air calme.

Un revenu permet d'atténuer les effets de la trempe en rendant la pièce plus ductile.

3/ Acier à outils (Ex : 35Cr Mo 4), 100Cr 6) :

L'acier pour outils est connu pour être dur et résistant à la chaleur et aux rayures. Son nom vient du fait qu'ils sont très couramment utilisés pour fabriquer des outils métalliques, tels que des marteaux. Pour ceux-ci, ils sont composés d'éléments comme le cobalt, le molybdène et le tungstène, et c'est la raison pour laquelle l'acier pour outils présente des caractéristiques de durée dans le temps et de résistance à la chaleur très élevées.

4/ Aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont probablement le type le plus connu sur le marché. Ces aciers sont polis et contiennent généralement environ 10-20 % de chrome, qui est leur principal élément d'alliage. Cette combinaison permet à l'acier d'être résistant à la corrosion et facilement moulable en différentes formes. Grâce à leur manipulation facile, leur flexibilité et leur qualité, les aciers inoxydables peuvent être utilisés dans les équipements chirurgicaux, domestiques, l'argenterie et même comme revêtement externe pour les bâtiments commerciaux/industriels.

V. 3. Diagramme Fer-Carbone

V. 3. 1. Les différentes phases du système Fer-Carbone

1/ La ferrite α

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre (HB $\approx$ 80), peu tenace (R $\approx$ 300 MPa), mais très ductile (A $\approx$ 35%).

2/ La ferrite δ

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centré CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

3/ L'austénite γ

Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint $\approx 2\%C$ à $1145^\circ C$. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

4/ La cémentite (Carbone de fer Fe_3C)

La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile.

5/ La perlite

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure ($HB \approx 200$), résistante ($R_m \approx 850$ MPa) et assez ductile ($A\% \approx 10$).

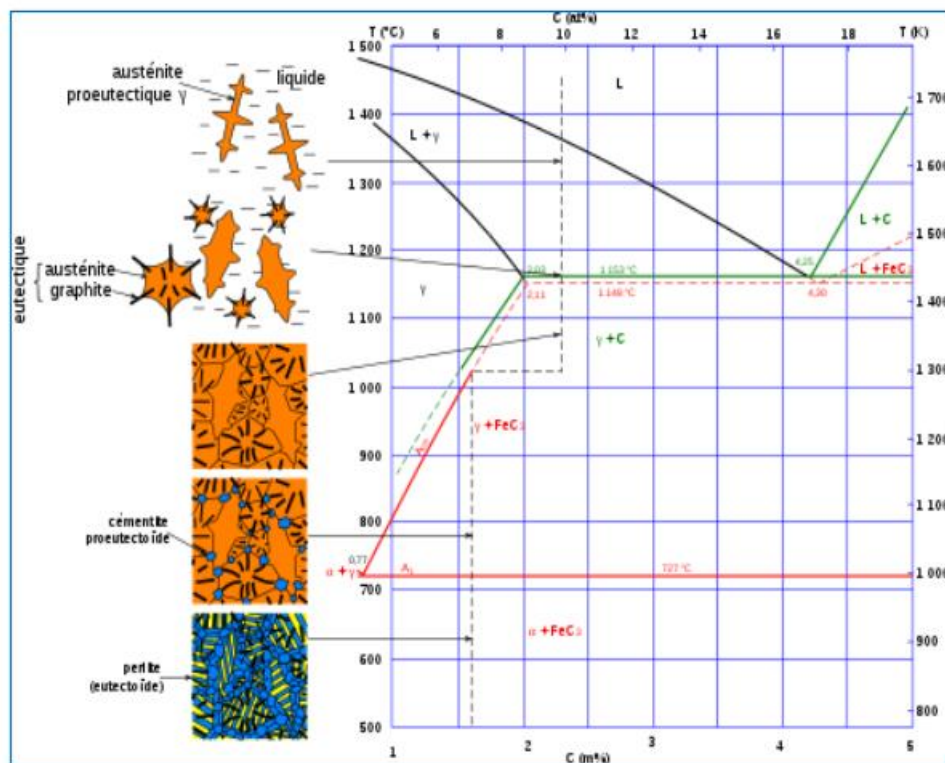


Figure IV.1 : Illustration des principaux constituants du système Fe_3C -

C

V. 3. 2. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

L'étude dans les conditions d'équilibre des alliages Fe-C, montre qu'ils subissent deux types d'évolution :

- **Diagramme métastable Fe-Fe₃C** : La première produit une phase riche en carbone de formule Fe₃C appelé carbone de fer ou cémentite. Le diagramme correspondant est dit métastable ou à cémentite. (Figure V.2).
- **Diagramme stable Fe-C** : La deuxième forme une phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur C, qui a une miscibilité nulle avec le fer. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite. Son obtention exige la décomposition du carbone Fe₃C en refroidissant avec une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir de graphitisation tel que le silicium. (Figure V.2).

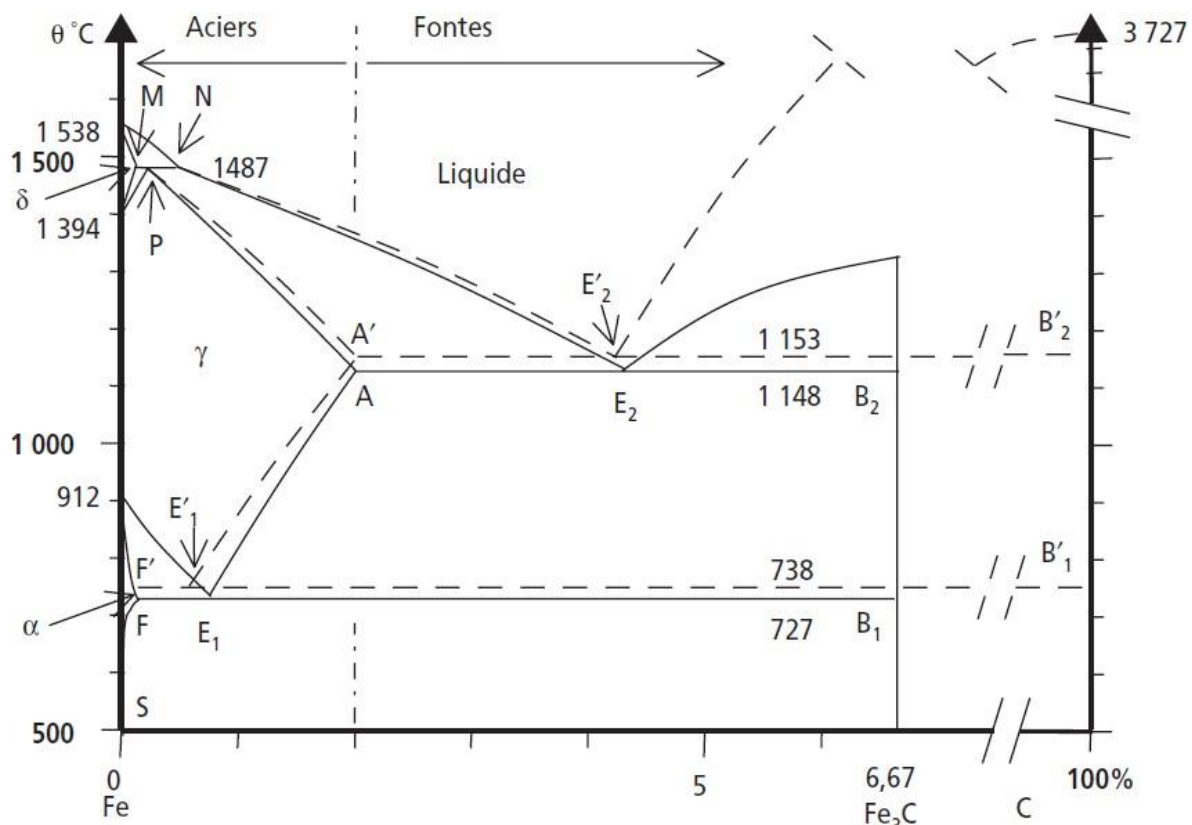


Figure V.2 : Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes.

En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe - Fe₃C.

Le fer existe sous plusieurs formes cristallines différentes. Chaque forme établit est stable dans un domaine de température déterminée (figure V.3). Ces variétés conservent les mêmes propriétés chimiques, par contre leurs propriétés physiques peuvent être différentes

Le fer pur existe sous 2 formes allotropiques :

- Le fer δ : de structure CC pour $1400^{\circ}\text{C} < T < 1539^{\circ}\text{C}$

- Le fer γ : de structure CFC pour $910^{\circ}\text{C} < T < 1400^{\circ}\text{C}$

- Le fer α : de structure CC pour $273^{\circ}\text{C} < T <$

910°C

Fer α : $\%C < 0,008\%$,

Aciers : $\%C < 2,14\%$, en pratique : $\%C < 1\%$

Fontes : $2,14\% < \%C < 6,70\%$, en général : $2,14\% < \%C < 4,5\%$

Dans les microstructures des alliages Fer-carbone on distingue ce qui

suit : Ferrite (Fe α) ----- solution solide (phase) ;

Austénite (Fe γ) ----- solution solide (phase) ;

Perlite (P) ----- structure hétérogène (constituant) ;

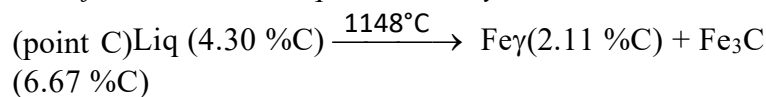
Lédéburite (Led) ----- structure hétérogène (constituant) ;

Cémentite (Fe_3C) ----- combinaison chimique (phase) ;

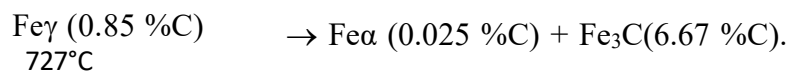
Graphite (G) ----- carbone libre (phase).

Il existe quatre transformations particulières au point C (eutectique), au point (eutectoïde), au point J (péritectique) et une transformation allotropique du Fer pur

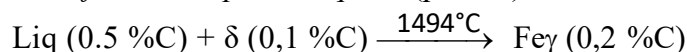
- *Transformation eutectique dans le système métastable :*



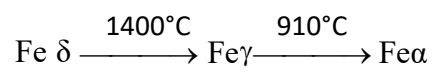
- *Transformation eutectoïde dans le système métastable : (point S)*

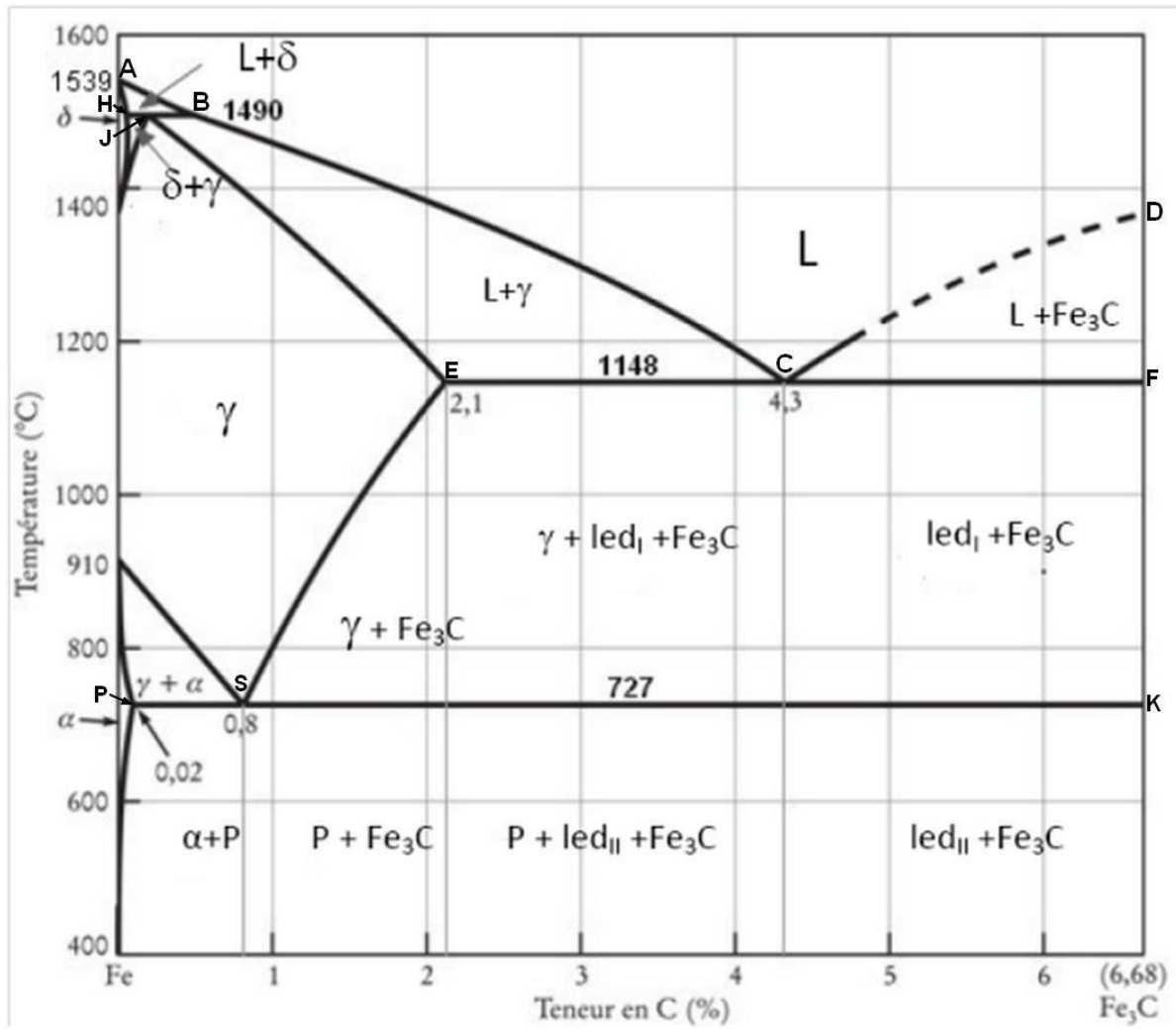


- *Transformation péritectique : (point J)*



- *Transformation allotropique*



Figure III.3. : Diagrammes métastable Fe -Fe₃C.

V.3.3. Exercices

Exercice N°1:

L'observation micrographique d'une pièce en acier non allié permet d'évaluer une présence d'environ 20% de ferrite et 80% de perlite dans la structure.

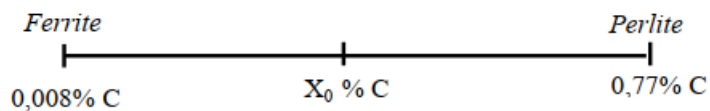
1. Quelle est la composition chimique exacte de cet acier en vous référant aux nuances d'aciers normalisés selon norme européenne.
2. Calculer la proportion exacte de chaque phase présente dans l'acier et donner leur composition chimique.
3. L'acier non allié à 0,45% de carbone est refroidi depuis l'état liquide à l'aide d'une vitesse lente. Décrire les transformations qu'il aurait subies depuis l'état liquide jusqu'à l'ambiante.

Solution du L'exercice N°1

$$f_{(ferrite)} = 20 \% \text{ et } f_{(perlite)} = 80 \%$$

1- L'acier est hypoeutectoïde.

Appliquons la règle de segment inverse :



$$f_{(ferrite)} = \frac{0.77 - X_0}{0.77 - 0.008} = 0.32 \Rightarrow X_0 = 0.61\% \Rightarrow \text{la nuance de l'acier est C60}$$

2- $X_\alpha = 0.008\%$ de carbone

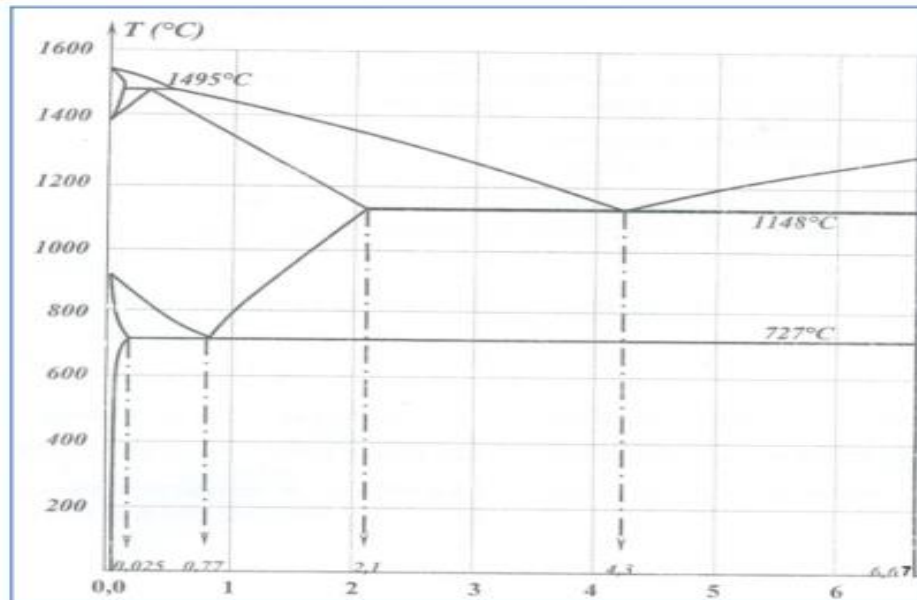
$$f_{(ferrite)} = \frac{0.77 - 0.60}{0.77 - 0.008} = 22.3\%$$

$X_{(Perlite)} = 0.77 \%$ de carbone

$$f_{Perlite} = \frac{0.60 - 0.008}{0.77 - 0.008} = 77.7\%$$

Exercice N°2:

Le diagramme suivant représente le diagramme d'équilibre binaire Fer-Carbone.



1. Quel est le type de ce diagramme (stable ou métastable).
2. Indexer le diagramme en précisant le nombre de phase de chaque domaine.
3. Donner les coordonnées des points particuliers dans ce diagramme, en précisant pour chacun le type de la transformation et l'équation d'équilibre.
4. Soit l'alliage à 1,5% de carbone.
 - Calculer la proportion de chaque phase présente dans cet alliage.
 - Donner le nom de cet alliage.

Solution du l'exercice N°2

1-Diagramme d'équilibre métastable.

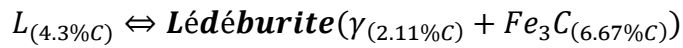
2- voir figure.

3-Point E' (0.77% C ; T=727° C), point eutectoïde.

⇒ Transformation eutectoïde.

$\gamma_{(0.77\%C)} \Leftrightarrow \text{Perlite } (\alpha_{(0.022\%C)} + \text{Fe}_3\text{C}_{(6.67\%C)})$, Point E (4.3%C ; T=1148°C), point eutectique.

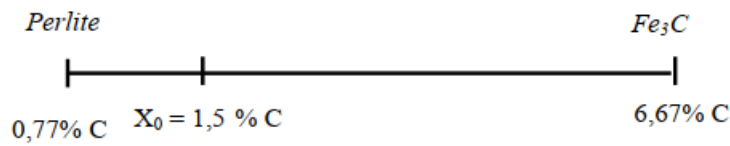
⇒ Transformation eutectoïde.



4- Alliage à 1.5% de carbone.

On a la présence de deux phases (Perlite + Cémentite).

➤ Application la règle de segment inverse pour calculer la proportion de chacune phase.



$$f_{(perlite)} = \frac{6.67 - 1.5}{6.67 - 0.77} = 87.62\%$$

$$f_{(Fe_3C)} = \frac{1.5 - 0.77}{6.67 - 0.77} = 12.38\%$$

➤ Le nom de l'alliage : acier hypoeutectoïde.

