

Chapitre 5 :**Diagramme D'équilibre des alliages Fer-Carbone**

- **Objectifs spécifiques :**
 - Connaitre et maîtriser la lecture de diagramme Fer Carbone
 - Identifier les structures des alliages et calculer les proportions
- **Pré-requis :**
Niveau BAC, notions élémentaires de chimie, diagramme d'équilibre
- **Éléments de contenus :**
 1. *Fer*
 2. *Diagramme Fer-Carbone : descriptions et interprétations de :*
 - * *Diagramme Fer-Carbone métastable*
 - * *Diagramme Fer-Carbone stable*
 3. *Application*

CHAPITRE VII

DIAGRAMME D'EQUILIBRE DES ALLIAGES FER-CARBONE

1. Fer**1.1. Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques**

Le fer est un métal pur de masse $\rho = 7.86\text{g/cm}^3$ ferromagnétique jusqu'à 768°C , sa température de fusion est de 1536°C , sa dureté est de 80 HB et sa résistance à la rupture à la traction est $R = 300\text{N/mm}^2$.

1.2. Structure cristalline**1.2.1. Généralités**

Comme beaucoup des métaux, le fer cristallise dans un système cubique dont l'ensemble forme un réseau à maille cubique, chaque cube élémentaire constitue une maille. Les atomes de fer y occupent certaines positions bien définies et non d'autres. C'est ainsi que les centres des atomes se trouvent aux sommets et aux centres des cubes (cas de la maille cubique centrée) ou aux sommets et aux centres des faces du cube (cas de la maille cubique à faces centrées CFC).

On distingue plusieurs formes de fer qui diffèrent par leur pouvoir de dissolution du carbone ou leur structure cristalline.

1.2.2. Fer α

Cette forme existe en dessous de 906°C et cristallise dans le système cubique centré, le côté du cube élémentaire mesure $2.87 \cdot 10^{-8}$ cm à la température 20°C . Ferromagnétique jusqu'à 768°C , entre 768 et 906°C le fer α n'est plus ferromagnétique.

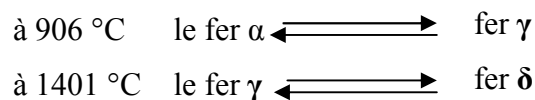
1.2.3. Fer γ

Cette forme existe entre 906 et 1401°C . Le fer γ est amagnétique, dissout facilement le carbone et dont la solubilité croît de 0.85% de carbone à 721°C jusqu'à 1.7% à 1145°C puis décroît jusqu'à 0.17% à 1487°C . Il cristallise dans le système CFC, le côté du cube élémentaire mesure $3.63 \cdot 10^{-8}$ cm à 1100°C .

Le fer γ est plus dense et plus dilatable que le fer α .

1.2.4. Fer δ

Le fer δ existe de 1401°C jusqu'à la température de fusion 1528°C . Il est amagnétique et identique à la forme α au point de vue cristalline c-à-d de structure cubique centrée, le côté de sa maille mesure $2.93 \cdot 10^{-8}$ cm et dissout un peu mieux le carbone (0.07% au maximum à 1487°C) que le fer α .

**1.3. Conclusion**

Les transformations subies par le fer sont réversibles ce qui signifie qu'au refroidissement elles se produisent en sens inverses.

1.4. Conséquences pratiques

Le changement de structure n'entraîne pas des grandes modifications dans les propriétés chimiques de fer, par contre elles provoquent d'importantes variations des propriétés physiques:

a) Dilatation :

La courbe de la dilatation du fer en fonction de la température présente une discontinuité pour 906°C et le fer γ est plus dilatable que le fer α

b) Dissolution du carbone :

C'est le fer γ qui est le plus meilleur dissolvant du carbone (1.7% C à 1145°C et 0.85% C à 721°C), le fer γ (0.07% C à 1487°C) et le fer α (0.02% C à 721 °C) et pratiquement 0% de C à la température de 20°C. Cette variation joue un rôle très important lors des traitements thermiques des aciers.

2. Diagramme Fer-Carbone

Les aciers et les fontes sont des alliages fer-carbone dont la teneur en carbone varie de 0 à 1.7% pour les aciers et théoriquement de 1.7% à 6.7% pour les fontes. Si les produits industriels ne sont pas des alliages binaires fer-carbone on y trouve en effet de nombreux autres éléments comme le manganèse, le silicium, le phosphore et le soufre en proportion relativement faible. L'expérience montre que la présence de ces éléments ne modifie que très peu les propriétés fondamentales des alliages fer-carbone et dont l'influence est beaucoup moins forte que celle du carbone. C'est ainsi que l'étude du diagramme binaire fer-carbone sera légitimé puisqu'elle permet de comprendre le comportement et les propriétés des aciers et des fontes dont l'importance technique est primordiale.

Il existe deux diagrammes d'équilibre fer-carbone:

- Diagramme d'équilibre métastable
- Diagramme d'équilibre stable

2.1. Diagramme Fer-carbone métastable (fig1)

Ce diagramme peut être ainsi considéré comme le diagramme d'équilibre Fer-cémentite. Ces alliages contiennent le carbone sous forme d'une combinaison Fe_3C et correspondent à un état métastable permettant l'étude des aciers et les fontes blanches.

Ce diagramme est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite (6.67% C, matériau fragile, cassant, très dur) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux :

- Les aciers (entre 0.008 et 1.7% C)
- Les fontes (de 1.7% à 6.67%C).

Pour chaque température et pour chaque teneur en carbone, ce diagramme indique la nature des phases et des constituants de l'alliage considéré, mais ne renseigne en rien sur la répartition de ces constituants c'est à dire sur la structure micrographique.

Ce diagramme est simplifié en ce sens que l'on a supprimé tous ce qui concerne le fer δ et la solution solide de carbone dans le fer δ qui occupe une petite région au-dessus de 1400°C et ne présente aucune utilité pour l'explication des transformations industrielles des aciers.

2.1.1. Description du diagramme

Description du diagramme	
Les Lignes	
ACD	Liquidus
AEF	Solidus
ECF	Eutectiques (palier)
A ₁ (723°C) (PK)	Eutectoïde (palier) Elle marque la fin de la solidification de la perlite, mixture de fer contenant 0.83% C, en austénite ; Au-dessus de 723°C la perlite n'existe plus.
A ₃	Elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite ; la ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne
A _{cm}	Elle indique la fin de la dissolution, aux normes internationales. Après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.
Les phases	
Austénite	C'est une <u>solution solide</u> de carbone dans le fer γ Cette solution solide occupe seule le domaine AESG (fer γ) et coexiste avec d'autres phases dans les domaines adjacents: - avec la ferrite (GSP) - avec la cémentite (ESKF)
Ferrite	C'est une <u>solution solide</u> de carbone dans le fer α . Cette solution occupe seule le domaine GPQ et coexiste avec l'austénite dans le domaine GPS et avec la cémentite PQRK
Cémentite	C'est une <u>combinaison chimiquement définie</u> (carbure de fer à 6.67% de carbone). La cémentite coexiste avec l'austénite dans le domaine (SEFK) et avec la ferrite dans le domaine (PQRK).
Les points particuliers	
Point eutectiques Point C à 4.3% de carbone	A 1145°C, le liquide eutectique à 4.3% de carbone se solidifie en donnant la lédéburite (eutectique formé de Cémentite et d'austénite à 1.7% C). La règle des segments inverses donne le rapport des masses de ces constituants. $\% \text{ Austénite} = \frac{CF}{EF} \cdot 100 = \frac{6.7-4.3}{6.7-1.7} \cdot 100$ $\% \text{ Cémentite} = \frac{CE}{EF} \cdot 100 = \frac{4.3-1.7}{6.7-1.7} \cdot 100$
Point eutectoides Point S à 0.83% de carbone	Au point S, l'austénite de composition 0.83% de carbone est convertie en perlite eutectoïde formée de ferrite et de cémentite dans des proportions :

	$\% \text{ Cémentite} = \frac{SP}{PK} \cdot 100 = \frac{0.83-0}{6.7-0} \cdot 100$ $\% \text{ Ferrite} = \frac{SK}{PK} \cdot 100 = \frac{6.7-0.85}{6.7-0} \cdot 100$
--	---

2.1.2. Interprétation du diagramme

Tout alliage contenant moins de 4.3% C, sa solidification commence par un dépôt de solution solide de carbone dans le fer γ le long de la branche AC et tout alliage contenant plus de 4.3% jusqu'à 6.7% de carbone, sa solidification commence par un dépôt de cémentite primaire.

Tout alliage à température et une teneur donnée, situé au dessous de AECF représente un alliage entièrement solide formé de 1 ou 2 phases et 1 ou plusieurs constituants (voir tableau ci-dessous).

Domaines	Zones	Phases	Constituants
AESG	AESG	1	1 (austénite)
GSP	GSP	2	2 (austénite + ferrite)
GPQ	GPQ	1	1 (ferrite)
ECFKS	EE'S	2	2 (austénite + cémentite)
	ECC'E'	2	3 (austénite + cémentite secondaire + lédéburite)
	CFKC'	2	2 (lédéburite + cémentite primaire)
PSKLQ	PSS'Q	2	2 (ferrite + perlite)
	SE'E''S	2	2 (cémentite secondaire + perlite)
	E'C'C''E''	2	3 (cémentite secondaire + perlite + lédéburite)
	C'KRC''	2	2 (cémentite primaire + lédéburite)

2.2. Diagramme Fer-carbone stable ou à graphite (fig2)

2.2.1. Description du diagramme

L'étude de ce diagramme est analogue à celle faite précédemment (fer- cémentite), il suffit donc de remplacer le mot cémentite par le mot graphite. On doit seulement noter que les températures de l'eutectique et de l'eutectoïde sont plus élevées de quelques degrés (1152°C au lieu de 1145°C et 735°C au lieu de 721°C). Il s'ensuit que toutes les teneurs en carbone des points d'intersections des isothermes (paliers) correspondants avec les branches obliques du diagramme sont légèrement abaissées. C'est ainsi que la teneur en carbone de l'austénite à 1152°C est de 1.55% au lieu de 1.7% et que la lédéburite ne contient que 4.2% au lieu de 4.3%. De même la perlite ne contient que 0.77% au lieu de 0.85%.

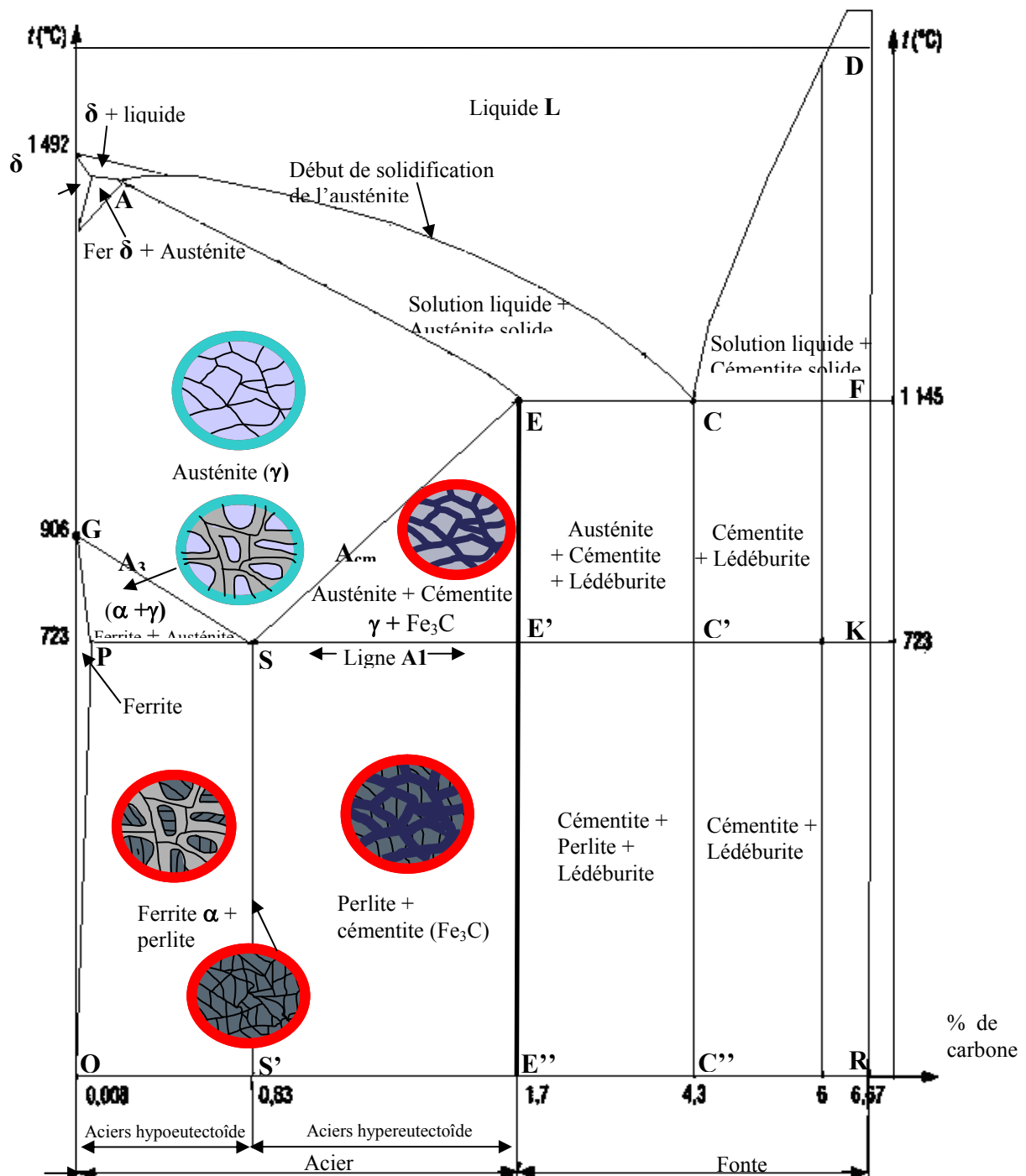
2.2.2. Interprétation du diagramme

Ce diagramme présente d'intérêt pratique que pour les alliages dont les teneurs en carbone sont supérieures à 2% puisque les seuls alliages industriels contenant du carbone libre sont les fontes.

L'interprétation de ce diagramme est similaire du diagramme fer-cémentite néanmoins il ne faut pas omettre que pour certains calculs ce diagramme n'est pas limité à 6.7% de carbone mais bien à 100% et par conséquent les proportions de l'austénite eutectique et du graphite dans la lédéburite sont donnés par:

$$\% \text{ Austénite eutectique} = \frac{CF}{EF} \cdot 100 = \frac{100-4.2}{100-1.55} \cdot 100$$

$$\% \text{ Graphite} = \frac{CE}{EF} \cdot 100 = \frac{4.2-1.55}{100-1.55} \cdot 100$$



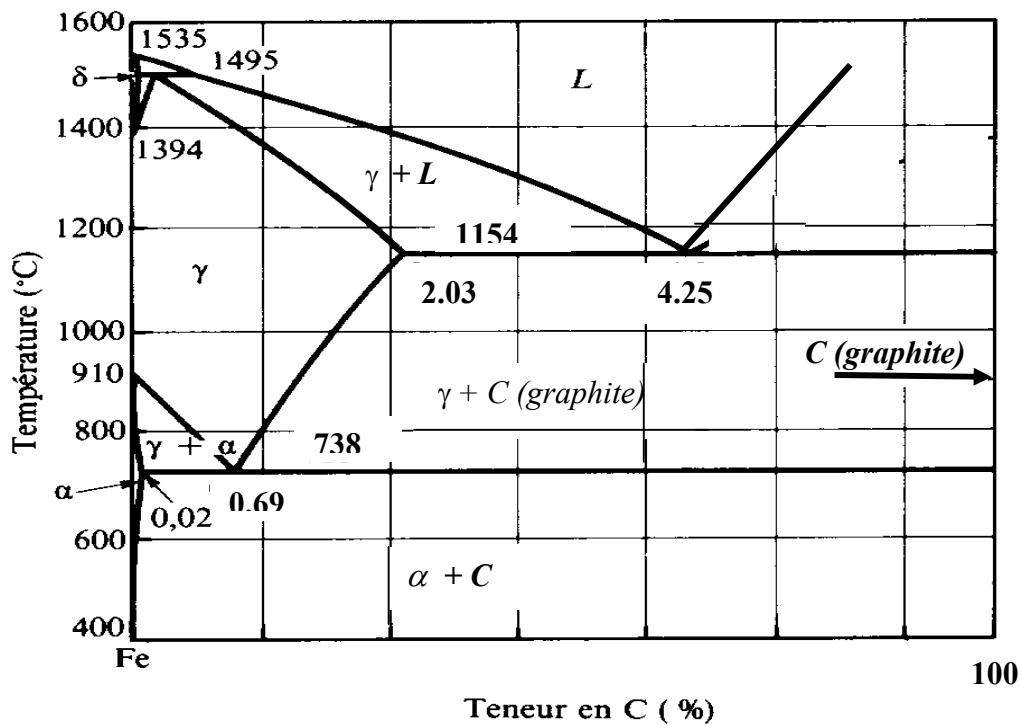


Figure I.7 : Diagramme d'équilibre stable Fer-Graphite.

8. APPLICATIONS:

I. Considérez le diagramme d'équilibre « fer – Cémentite » (Fe-Fe₃C) donné dans la figure a. La cémentite Fe₃C a une composition massique en carbone égale à 6,68%.

1- À quelle(s) température(s) le Fer pur solide subit-il une transformation allotropique au chauffage ? Précisez le changement de phase qui se produit au cours de la transformation allotropique.

Un alliage « fer – carbone » contenant 0,6% C est refroidi à l'équilibre depuis l'état liquide jusqu'à la température ambiante (20 °C).

2- Lequel des schémas présentés ci-dessous représente la microstructure de cet alliage aux températures suivantes : 1490 °C, 1400 °C, 724 °C et 20 °C ?

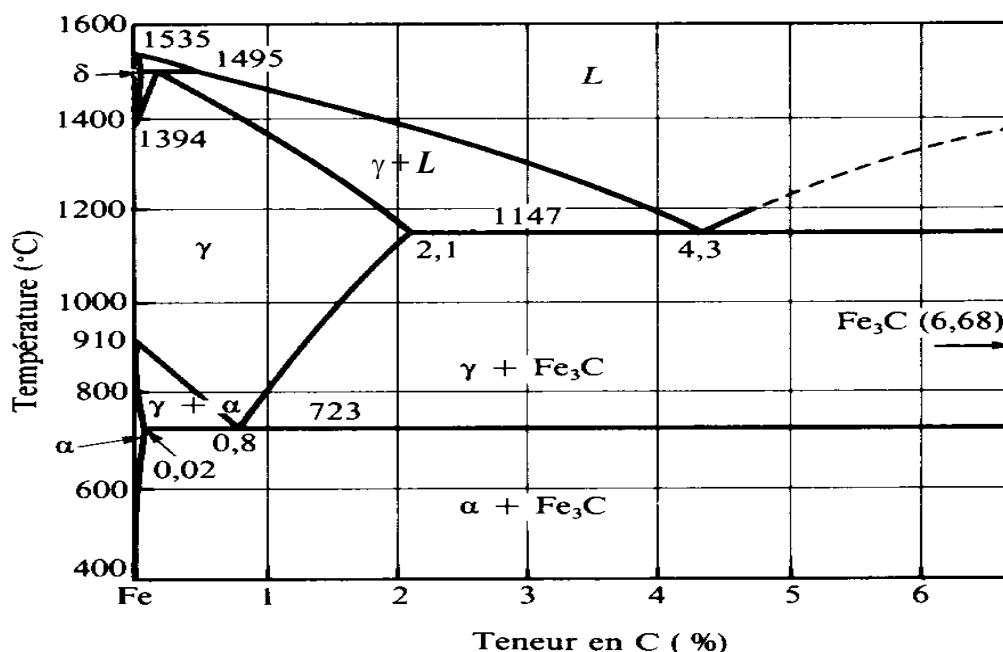


Figure a : Diagramme d'équilibre métastable Fer-Cémentite.

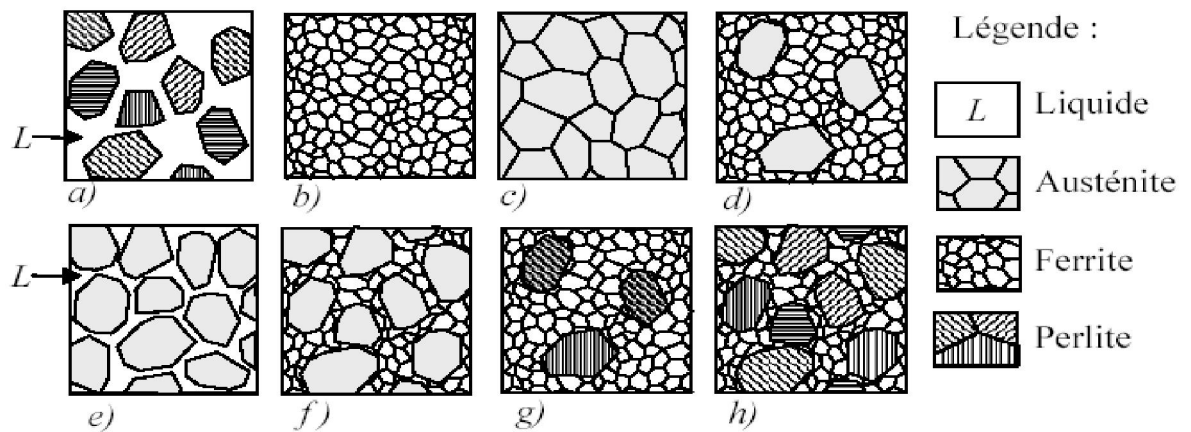


Figure b

Considérez maintenant un acier de composition *eutectoïde*.

- 1- Quelles sont les phases en présence et leur proportion à la température ambiante (20 °C) ?
- 2- Tracer la courbe de solidification de cet acier.
- 3- En déduire les températures de début et de fin de solidification de cet acier ?
- 4- Lequel des schémas (figure 2) représente la microstructure de cet acier à 1420°C ?

II. 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 AFNOR.
- 2- Calculer la proportion exacte de chaque phase présente dans l'acier et donner leur composition chimique.

Données : Désignation des aciers au carbone non alliés et normalisés selon AFNOR : XC10, XC18 (C25), XC38 (C35), XC48 (C35), XC55, XC65 , XC70, XC80, XC90, XC100, XC110, XC120.