

## 4 Diagramme fer-carbone

### 4.1 Introduction

Les diagrammes fer carbone sont indispensables pour étudier tous les alliages binaires fer-carbone tels que les aciers et les fontes. Ces diagrammes permettent la prévision ou la compréhension de la plupart des structures et de toutes les transformations, sauf celles associées aux traitements thermiques qui relèvent d'autres équilibres. Les diagrammes sont intéressants en raison, à la fois, du comportement du fer pur et du comportement du carbone qui peut se combiner au fer diverses manières.

### 4.2 Variétés allotropiques du fer et du carbone

#### 4.2.1 L'allotropie

Un corps peut se présenter sous une, deux ou plusieurs formes correspondant à des arrangements différents des atomes molécules ou ions dans la maille. Ces différentes formes cristallines sont dites variétés allotropiques. Le phénomène d'allotropie correspond à un changement de structure cristalline sous l'effet de la température.

##### 4.2.1.1 Le fer

- À des basses températures et jusqu'à  $912^{\circ}\text{C}$  (A3), ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré (CC) : On l'appelle alors  $\text{Fer } \alpha$ . Le  $\text{fer } \alpha$  ne dissout pratiquement pas le carbone :  $0.02\% \text{C}$  au maximum à  $723^{\circ}\text{C}$ , moins de  $0.01\% \text{C}$  à  $300^{\circ}\text{C}$ .
- À des températures supérieures à  $912^{\circ}\text{C}$  et jusqu'à  $1394^{\circ}\text{C}$  (A4) le réseau cristallin est du type cubique à faces centrées (CFC) : on l'appelle  $\text{Fer } \gamma$ . Le  $\text{fer } \gamma$  dissout facilement le carbone :  $0.8\% \text{C}$  à  $723^{\circ}\text{C}$ ,  $2.14\% \text{C}$  à  $1147^{\circ}\text{C}$ .
- Au-dessus de  $1394^{\circ}\text{C}$  et jusqu'au point de fusion à  $1538^{\circ}\text{C}$ , le fer retrouve la structure cubique centrée du  $\text{Fer } \alpha$  : On l'appelle alors  $\text{Fer } \delta$ . Il dissout un peu mieux le carbone que le  $\text{Fer } \alpha$  ( $0.07\% \text{C}$  au maximum à  $1493^{\circ}\text{C}$ ).
- Jusqu'à  $768^{\circ}\text{C}$  (A2) point de Curie, le fer est ferromagnétique, au-delà il devient paramagnétique. Le caractère ferromagnétique se dit d'une substance qui peut prendre une forte aimantation.

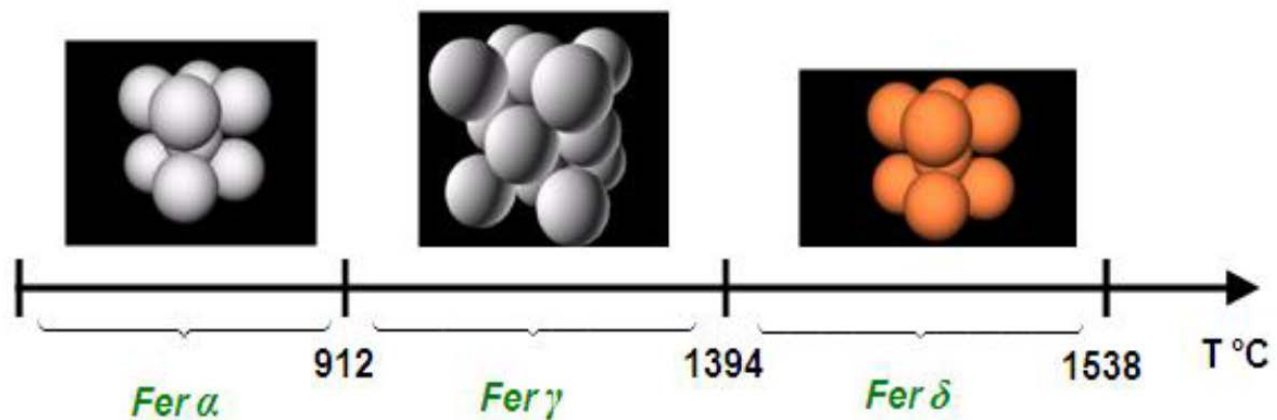


Figure 1 : Transformation allotropique du Fer

##### 4.2.1.2 Le carbone

Le carbone est un élément très peu abondant dans l'écorce terrestre (0,2% en masse). Dans la nature, le carbone existe sous deux formes allotropiques : **graphite et diamant**. Les scientifiques ont cependant réussi à créer de nouveaux types de carbone, les fullerènes et les nanotubes, dont les propriétés sont différentes de celles du carbone naturel.

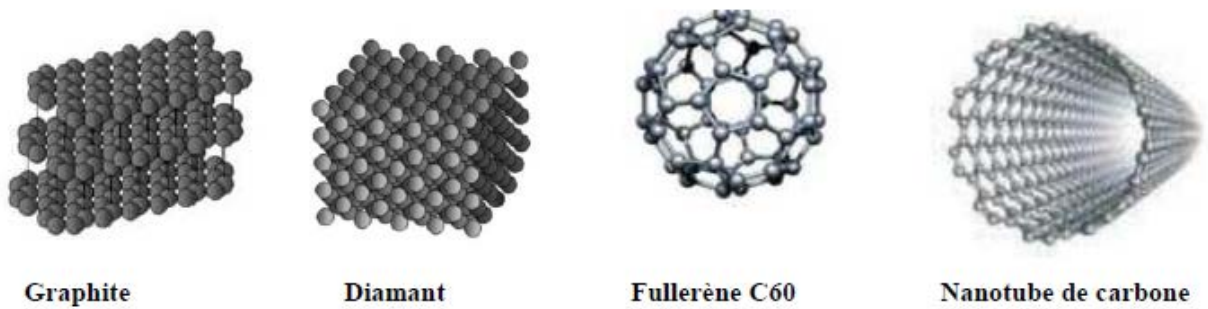


Figure 2 : Différentes formes du carbone

## 4.2.2 Définitions des constituants micrographiques

### 4.2.2.1 La ferrite $\alpha$

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer  $\alpha$ , à structure cubique centrée. Elle possède un faible pouvoir de dissolution du carbone (0.006% C à température ambiante). Elle est relativement tendre ( $HB \approx 80$ ), peu tenace ( $R \approx 300$  MPa), mais très ductile ( $A \approx 35\%$ ), et très sensible aux basses températures.

### 4.2.2.2 La ferrite $\delta$

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer  $\delta$ . Sa structure est cubique centrée CC. Elle occupe le domaine restreint de température : (1394-1538 °C) et renferme au maximum 0.11% de carbone.

### 4.2.2.3 L'austénite $\gamma$

Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer  $\gamma$ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint  $\approx 2\%$  C à 1145°C. Ce constituant n'existe pas à la température ordinaire. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

### 4.2.2.4 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 maille e cémentite contient 12 atomes de fer et 4 atomes de carbone. D'un point de vue morphologique, la cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanches. Elle est très dure et très fragile.

### 4.2.2.5 La perlite

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite, provient de la décomposition de l'austénite.

Ce constituant contient 0.8% C, il offre une dureté usinable et une bonne résistance. La perlite est dure ( $HB \approx 200$ ), résistante ( $R_m \approx 850$  MPa) et assez ductile ( $A \approx 10$ ).

### 4.2.2.6 Lédéburite

C'est le mélange hétérogène (agrégat) d'austénite et de cémentite obtenu à l'eutectique (4.3% C).

## 4.3 Diagramme Fer-Carbone

### 4.3.1 Définition

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

- **Diagramme métastable Fe- $Fe_3C$**  : La première produit une phase riche en carbone de formule  $Fe_3C$  appelé carbone de fer ou cémentite. Le diagramme correspondant est dit métastable ou à cémentite.
- **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  $Fe_3C$  en refroidissant avec une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir de graphitisation tel que le silicium.

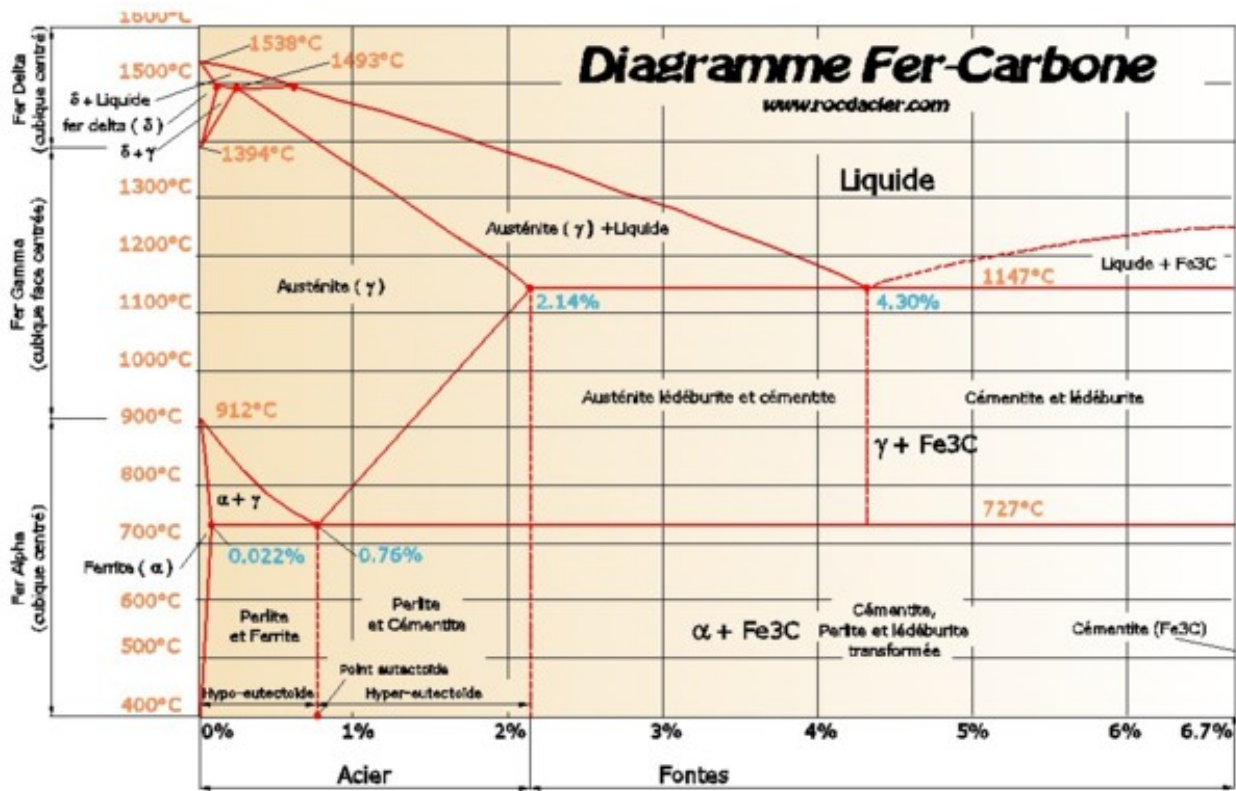


Figure 3: Diagramme métastable Fe<sub>3</sub>-C

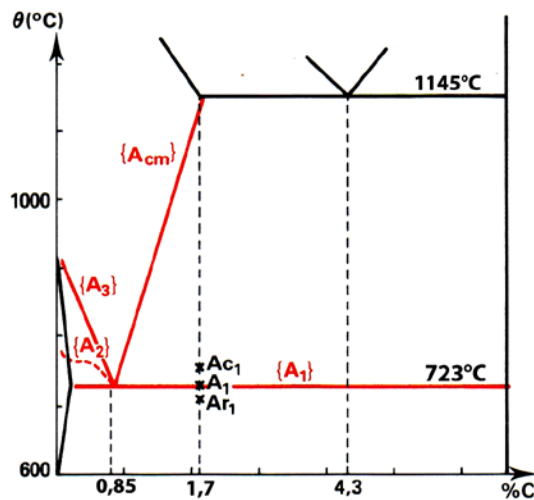
Le diagramme d'équilibre Fer-carbone est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite Fe<sub>3</sub>C (6.67%C) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : **les aciers (entre 0.008%C et 2%C) et les fontes (de 2%C à 6.67%C).**

**A<sub>cm</sub>** : indique la fin de la dissolution après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.

**A<sub>0</sub>** : (210°C) précise la température de la transformation magnétique de la cémentite.

**A<sub>1</sub>** : précise la fin de la transformation au refroidissement de l'austénite. L'austénite n'existe plus au-dessous de cette ligne.

**A<sub>2</sub>** : (point de Curie ≈ 768°C) précise la température de la perte de magnétisme du Fer α. En générale ce point ne figure pas sur le diagramme Fer-C.



**A<sub>3</sub>** : précise la fin de la transformation au chauffage de la ferrite en austénite. La ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

**A4** : précise la fin de la transformation au chauffage de l'austénite en ferrite  $\delta$  et/ou liquide. L'austénite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

On peut trouver  $Ac_3, Ac_4...$  pour indiquer que le point est tracé en chauffage, ou  $Ar_3, Ar_4$  lorsqu'il s'agit de refroidissement

### 4.3.2 Les transformations

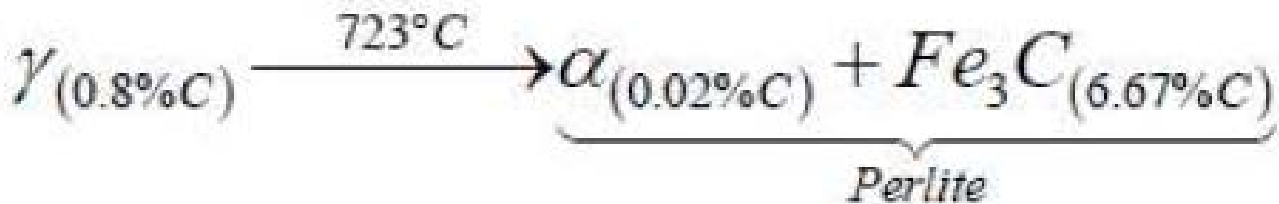
Le diagramme Fer-carbone contient trois réactions isothermes caractérisées par des paliers :

- **Eutectique à 1147°C** : il marque la température minimale d'existence du liquide.
- **Eutectoïde à 723°C (A1)**. Il marque la fin de la transformation au chauffage de la perlite en austénite. Au-dessus de 723°C, la perlite n'existe plus

- **Péritectique à 1487°C**, mais d'importance négligeable de point de vue industrielle.

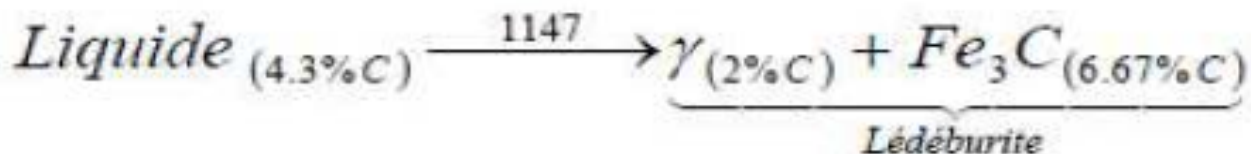
**Réaction eutectoïde** : Un premier point remarquable doit être noté, correspondant à la teneur de 0.8%C à 723°C, ce point est dit **eutectoïde**.

- Les aciers qui contiennent moins de 0.8%C sont dits **hypoeutectoïdes**
- Les aciers qui contiennent 0.8%C sont dits **eutectoïdes**
- Les aciers qui sont plus carburés (plus 0.8%C) sont dits **hypereutectoïdes**



- **Réaction eutectique** : Un deuxième point remarquable doit être noté correspondant à la teneur de 4.3% de carbone à 1147°C, ce point est dit **eutectique**. A la température eutectique il existe trois phases en équilibre.

- Les fontes qui contiennent moins de 4,3%C sont dites **hypoeutectiques** ;
- Les fontes qui contiennent 4,3%C sont dites **eutectiques** ;
- Les fontes qui sont contiennent plus de 4,3%C sont dites **hypereutectiques**



Le liquide se solidifie, pour former les phases d'austénite et de cémentite on l'appelle **lédéburite**.

- **Réaction péritectique** : Un troisième point remarquable correspondant à la teneur de 0.51% de carbone à 1487°C, ce point est dit péritectique.



**Exemple de diagramme métastable : Fer-cémentite**



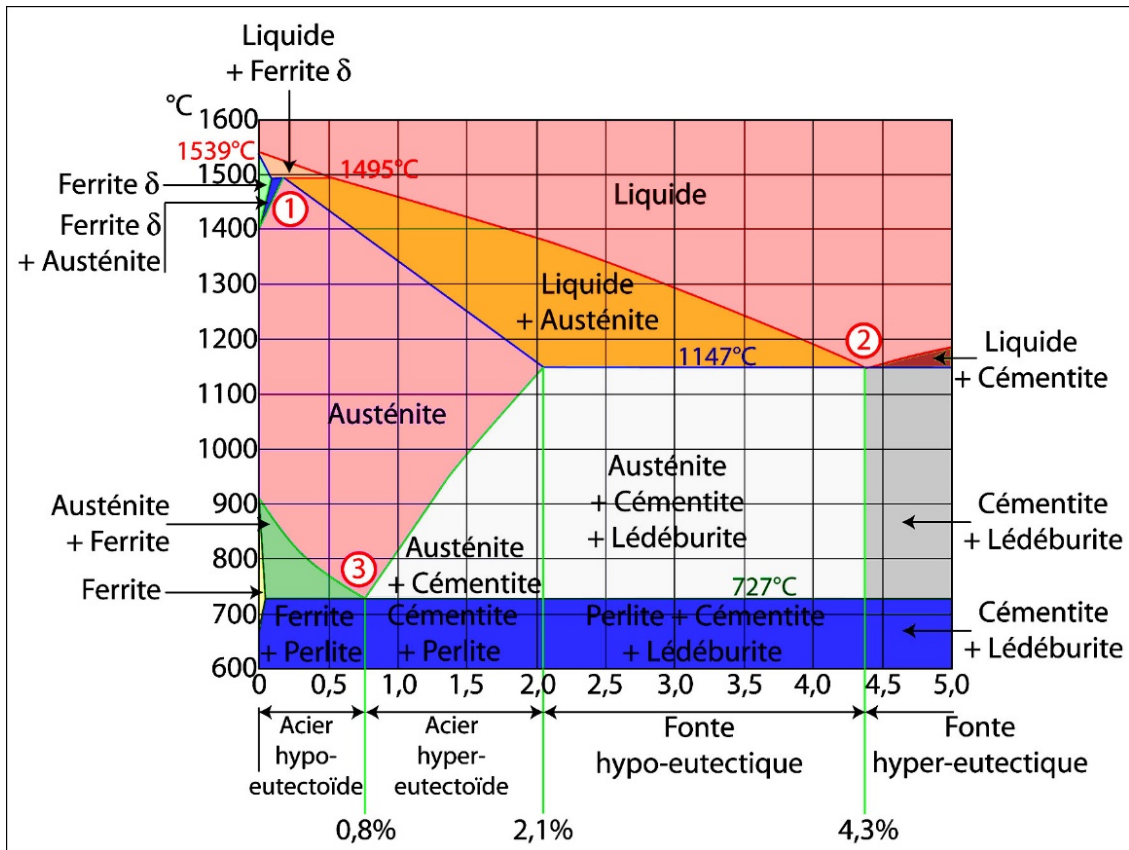


Figure 4: Diagramme métastable Fe<sub>3</sub>-C

### 4.3.3 Microstructures des aciers

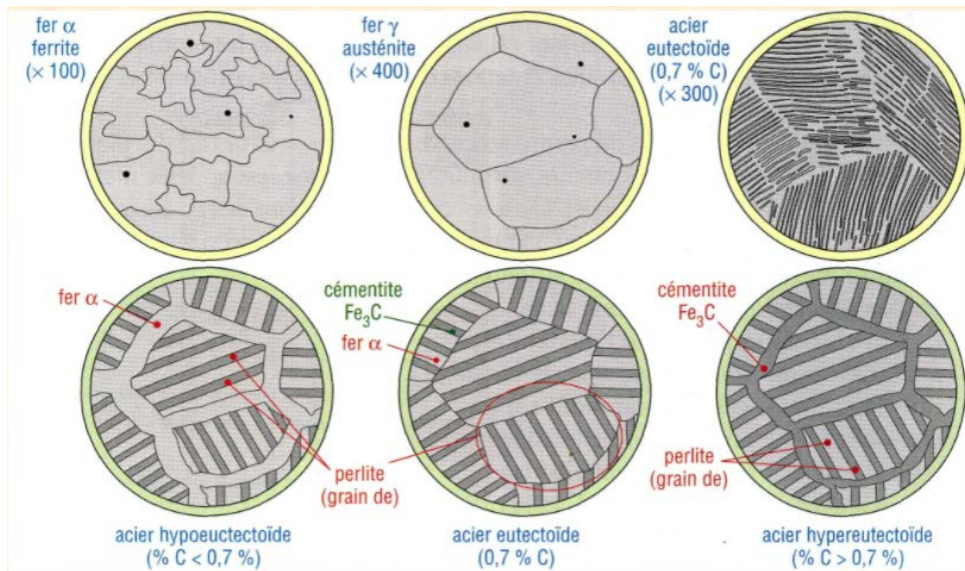


Figure 5 : Microstructures des aciers en fonction du pourcentage de carbone ( grossissement x 400 ).