

## Les phases dans le système Fe-C :

La figure 1 montre que le diagramme fer-graphite (Fe-Carbone) présente peu de modifications par rapport au diagramme fer-cémentite. Les lignes en traits pleins correspondent au diagramme Fe-Cémentite (Fe-Fe<sub>3</sub>C) et les lignes en pointillés correspondent au diagramme Fe-C. Dans ce dernier cas, dans chacune des zones d'équilibre des phases, la phase cémentite est remplacée par la phase graphite.

Le diagramme Fe-Cémentite (Fe-Fe<sub>3</sub>C) est le diagramme d'équilibre Fer-carbone métastable. Il représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite. La cémentite correspond à 6,67 % mass. C.

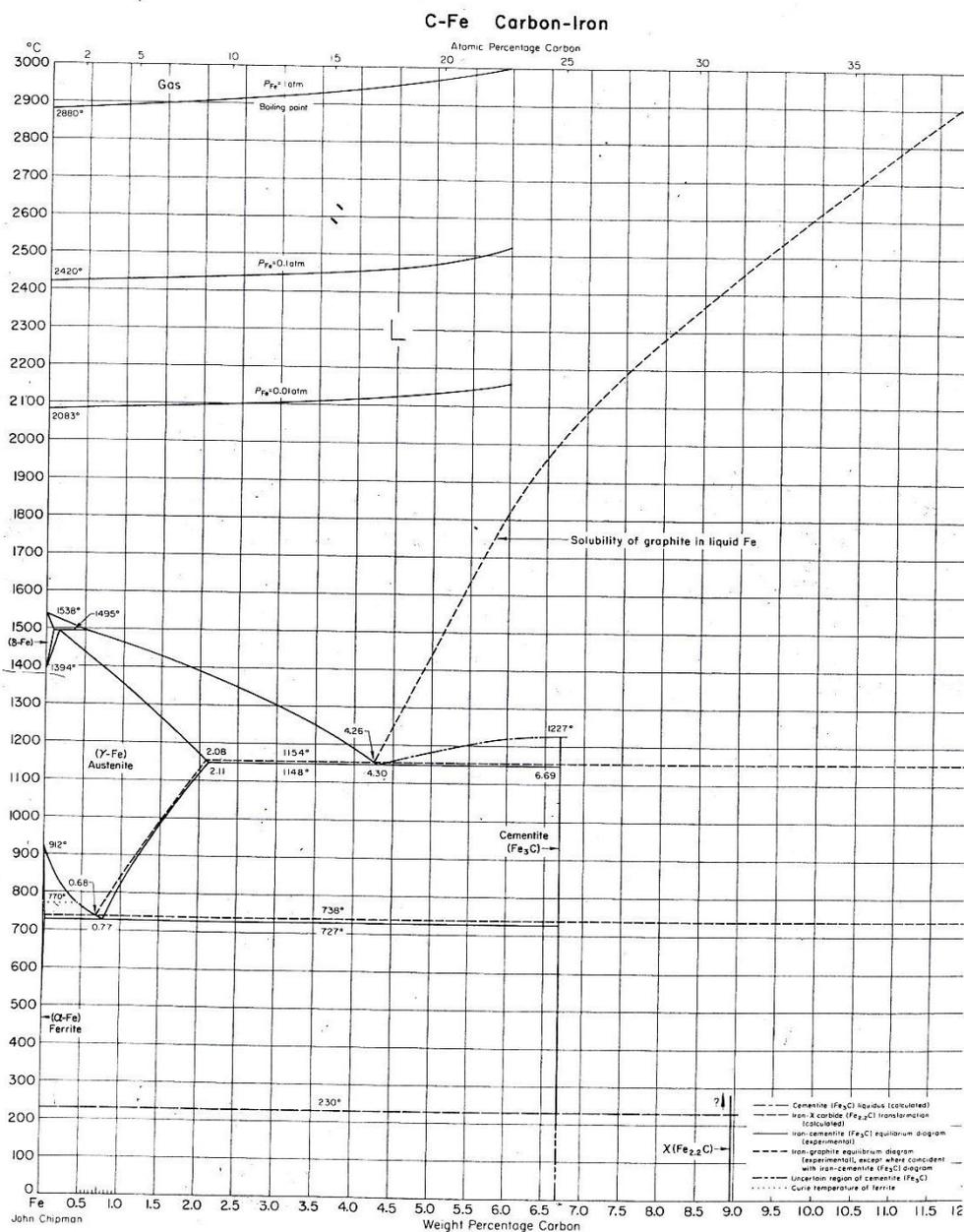


Fig. 1 : Diagramme d'équilibre Fe-C

## ❖ Définitions des constituants micrographiques

### 1. Carbone

C'est un élément polymorphe. Dans les conditions ordinaires, il se trouve sous la forme d'une variété de graphite, mais il peut exister également sous la forme d'une variété métastable de diamant. Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et solide, mais peut aussi former une combinaison chimique, la cémentite  $Fe_3C$ .

### 2. Ferrite

C'est une solution solide de carbone dans le fer  $\alpha$ , c'est à dire la ferrite est constituée par du fer  $\alpha$  renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone, inférieure à 0,02 %), ainsi que d'autres inclusions. On distingue la ferrite  $\alpha$  à basse température où solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02 % mass. C et la ferrite  $\delta$  à haute température où solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0,1 % mass. C. La ferrite est magnétique à la température ordinaire, au microscope elle a l'aspect de grains homogènes polyédriques. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à 760°C.

### 3. Austénite

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer  $\gamma$ , La solubilité limite du carbone dans le fer  $\gamma$  est de 2,11 % mass. C. L'austénite est stable à haute température. La microstructure de l'austénite est composée de gains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable.

### 4. Cémentite

La cémentite ou carbure de fer ( $Fe_3C$ ) est une combinaison chimique de fer et de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre 6,67 % mass. C. Elle est magnétique jusqu'à 210°C. La microstructure de la cémentite peut se présenter dans les aciers sous les formes suivantes :

- Lamellaire dans la perlite lamellaire.
- Grains dans les aciers avant subit un traitement thermique de recuit.
- Précipites inter-granulaires dans les aciers ayant un pourcentage de carbone supérieur à 0,77 % mass. C.

Selon le diagramme Fe- $Fe_3C$  et lors du refroidissement, la cémentite peut exister sous trois différentes formes de liaisons mais avec la même composition chimique. Désignation obtention par :

- Cémentite primaire ( $Cm^I$ ) : cristallisation primaire du métal liquide suivant la ligne de limite de solubilité entre le liquide et la cémentite.

- Cémentite secondaire ( $\text{Cm}^{\text{II}}$ ) : ségrégation à partir de l'austénite suivant la ligne de limite de solubilité entre la phase  $\gamma$  et la cémentite.
- Cémentite tertiaire ( $\text{Cm}^{\text{III}}$ ) : ségrégation à partir de la ferrite suivant la ligne de limite de solubilité entre la phase  $\alpha$  et la cémentite.

## 5. Perlite

C'est un eutectoïde formé d'un mélange de grains de cémentite, sphéroïdaux noyés dans la ferrite en couches alternées. Elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0,77 % mass. C.

## 6. Lédéburite I

C'est un mélange eutectique entre l'austénite et la cémentite et provenant lors du refroidissement du métal liquide avec 4,3 % de carbone à la température eutectique. Le lédéburite I contient 51,4 % d'austénite et 48,6 % de cémentite et peut contenir 2,06 à 6,67 % de carbone. Son domaine de stabilité est 727°C à 1148°C.

## 7. Lédéburite II

Le lédéburite II provient durant le refroidissement du lédéburite I par décomposition eutectoïdale du composant contenant 51,4 % d'austénite en perlite à la température de 727°C. Le lédéburite II contient 51,4 % de perlite et 48,6 % de cémentite. Durant la solidification des alliages de fer et de carbone, il y a lieu trois types de transformations isothermiques, il s'agit des réactions péritectiques, eutectiques et eutectoïdes.

Le diagramme fer-cémentite simplifié représenté par la figure 2 met en évidence 3 réactions isothermes :



L'eutectique formé s'appelle la lédéburite et sa structure est constituée de lamelles alternées d'austénite et de cémentite. C'est un « constituant micrographique », formé de deux phases, qui tient son individualité de la forme (toujours la même) qu'il présente à l'examen micrographique.



L'eutectoïde formé s'appelle la perlite, et sa structure est constituée de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. C'est aussi un « constituant micrographique », formé de deux phases se présentant de façon identique lors des examens micrographiques (Fig.3).

L'une des conséquences de la réaction eutectique est que la lédéburite ne peut plus exister à température ambiante sous la même forme qu'à 1148 °C. Au cours du refroidissement, son austénite expulse progressivement du carbone formant de la cémentite.

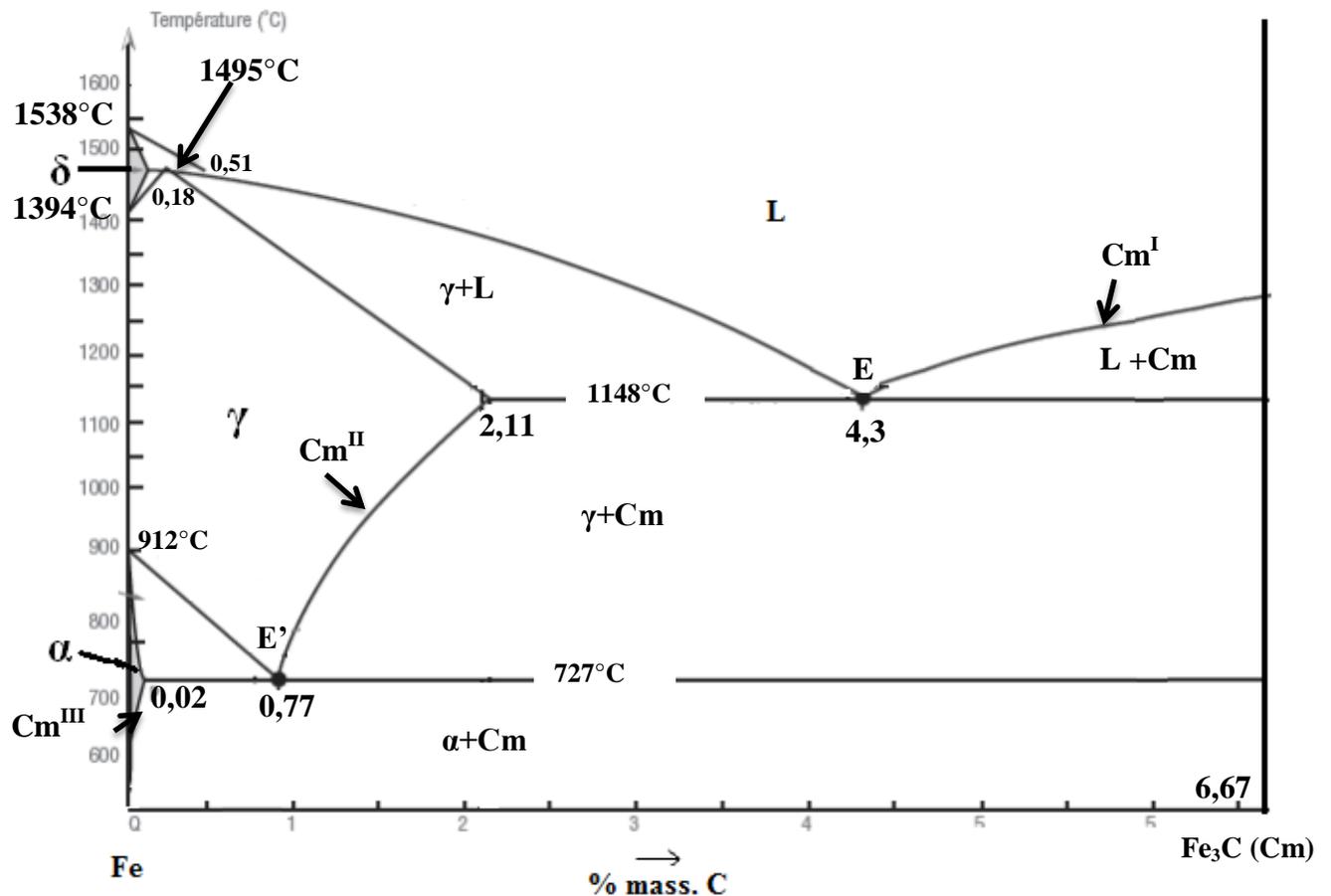


Fig. 2 : Diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C

- **Définition des aciers :**

On appelle « aciers » les alliages ferreux qui sont en général aptes au façonnage à chaud. À l'exception de certains aciers à haute teneur en chrome, ils ont une teneur en carbone égale ou inférieure à 2 %, teneur limite qui les sépare des fontes.

- **Définition des fontes :**

La fonte, en métallurgie, est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2 %. Le carbone, qui est en sursaturation dans les fontes, peut précipiter sous forme de graphite ou de cémentite  $Fe_3C$ .

## **1. Propriétés et mécanismes de formation des phases dans les aciers et des fontes :**

### ***1-1. Alliage eutectoïde :***

Lors de refroidissement de l'alliage de composition eutectoïde (0,77 % mass. C) à partir d'une température comprise dans le domaine de la phase austénite  $\gamma$ , à partir du point (a) dans la figure 3 vers le bas de la ligne  $xx'$ . Au départ l'alliage ne contient que la phase d'austénite ayant une composition de 0,77 % mass. C et la microstructure correspondante illustrée dans cette figure.

Lorsque l'alliage se refroidit lentement sous la température eutectoïde, il est constitué des couches alternées (ou lamelles) des deux phases ( $\alpha^{eut}$  et  $Cm^{eut}$ ) qui se forme simultanément durant la transformation. Cette microstructure schématisée au point (b) de la figure 3, est appelée *perlite* (une transformation complète de l'austénite à la perlite). L'image à droite de la figure 3 montre une micrographie d'un acier eutectoïde montrant la perlite. Celle-ci prend la forme de grains souvent appelés « colonies » ; les couches de chaque colonie sont orientées essentiellement dans la même direction, qui varie d'une colonie à l'autre. Les couches pâles épaisses constituent la phase de ferrite, tandis que la phase de cémentite est formée de minces lamelles dont la plus part paraissent foncées. De nombreuses couches de cémentite sont si minces que les interfaces de phase sont indiscernables ; ici ces couches paraissent foncées.

Avec la diminution de la température la  $Cm^{III}$  se précipite sur les lamelles de cémentite eutectoïde où leur pourcentage est très faible à la température ambiante.

La composition de la phase mère  $\gamma$  (0,77 % mass. C) diffère de celle des phases produites (ferrite à 0,022 % mass. C, et cémentite à 6,7 % mass. C) et la transformation des phases doit être accordée d'une redistribution du carbone par diffusion. La figure 3 explique le mécanisme de formation des composés eutectoïdes ; où les flèches indiquent les directions de la diffusion de carbone. Les atomes de carbone s'éloignent des domaines à 0,022 % mass. C dans la ferrite et diffusent vers les couches à 6,7 % mass. C dans la cémentite, à mesure que la perlite s'étend dans le grain d'austénite à partir de joint de grains.

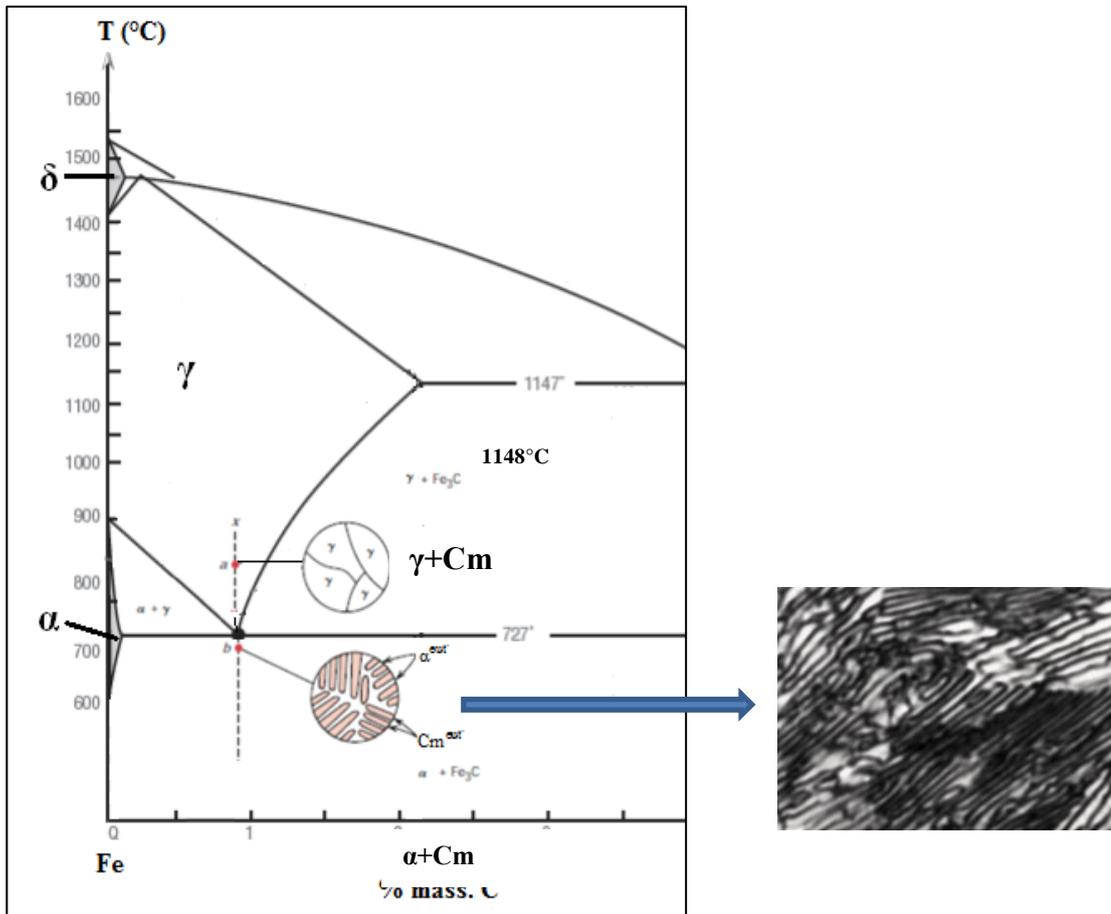


Fig. 3 : Formation de la microstructure lors de refroidissement d'un acier de composition eutectoïde (0.77 % mass. C). la figure à droite montre la micrographie d'un acier eutectoïde ; la microstructure de la perlite constituée des couches alternées de la ferrite  $\alpha^{\text{eut}'}$  (phase pâle) et de  $\text{Cm}^{\text{eut}'}$ .

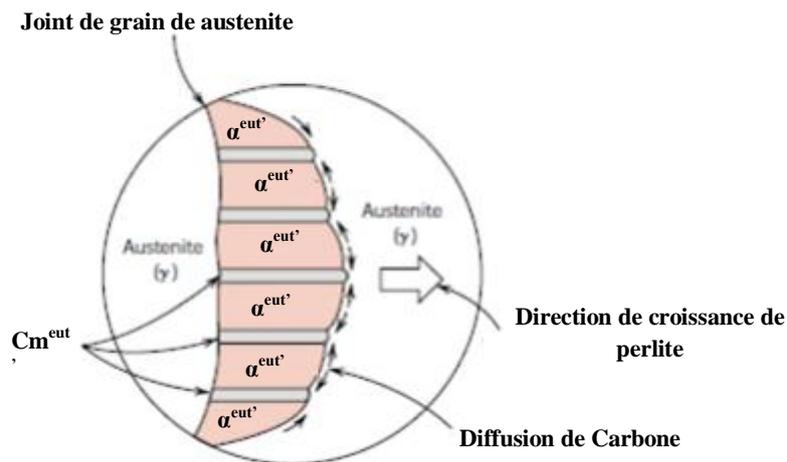


Fig. 4 : Mécanisme de formation de la perlite lors de la réaction eutectoïde

## 1-2. Alliages hypo-eutectoïdes :

Lorsqu'une composition  $X_0$  se situe à gauche de l'eutectoïde, soit entre 0.022 % mass.C et 0.77 % mass. C, l'alliage possédant cette composition est appelé alliage hypo-eutectoïde. Le refroidissement d'un alliage ayant cette composition équivaut à un déplacement vers le bas sur la ligne verticale  $yy'$  de la figure 5. Au point (c), la microstructure consistera entièrement en grains de la phase  $\gamma$  comme le montre la figure 4. Lorsque le refroidissement atteint le point d situé dans le domaine de phase  $(\alpha+\gamma)$ , ces deux phases coexistent, comme le montre le schéma de la microstructure. La plupart des petites particules  $\alpha$  se forment le long des joints de grains  $\gamma$  initiaux.

Le refroidissement du point (d) au point (e), immédiatement au-dessus de l'eutectoïde mais encore dans la région  $(\alpha+\gamma)$ , fait augmenter la fraction de la phase  $\alpha$  et donne une microstructure semblable à celle qui est aussi représentée : la taille des particules  $\alpha$  s'accroît. Pour que la réalisation de la transformation eutectoïde c'est-à-dire la formation de la perlite, il faut que la concentration de Carbone augmente dans l'austénite à des températures supérieures à 727°C cela par diffusion de carbone des joints de grains de l'austénite jusqu'au cœur des grains. Cette phénomène commence lors du passage de la courbe A3 où les joints de grains de l'austénite se transforme à la phase  $\alpha$  et se termine à la ligne A1 (entre A1 et A3 l'alliage de composition  $X_0$  constitué de mélange  $\alpha+\gamma$ ) à ce point la concentration en Carbone au cœur de la phase  $\gamma$  a atteint la concentration de l'alliage eutectoïde et dans ce cas la transformation eutectoïde est réalisé.

La phase  $\alpha$  reste sensiblement la même qu'au point e lors du passage sous la température eutectoïde et se présente généralement sous la forme d'une phase matricielle continue entourant les colonies de perlite isolées. La microstructure au point f est telle que le montre la figure 5. La phase de ferrite est donc présente à la fois dans la perlite et comme phase qui s'est formée durant le refroidissement dans le domaine de phase  $\alpha+\gamma$ . La ferrite présente dans la perlite est appelée *ferrite eutectoïde*, tandis que l'autre, qui s'est formée au-dessus de  $T_e$ , porte le nom de *ferrite pro-eutectoïde* (fig.5). La figure à gauche de la figure 4 présente une micrographie d'un acier hypo-eutectoïde avec 0,38 % mass. C ; composé de ferrite pro-eutectoïde (phase blanche) et la perlite (phase sombre). Dans ce type d'alliage la précipitation de  $Cm^{III}$  est négligeable entre le point A1 et la température ambiante. La connaissance de la concentration de perlite permet de calculer la concentration massique de Carbone dans les alliages hypo-eutectoïdes (Y%) utilisant la relation suivante :

$$X\% C = 0,77Y\%$$



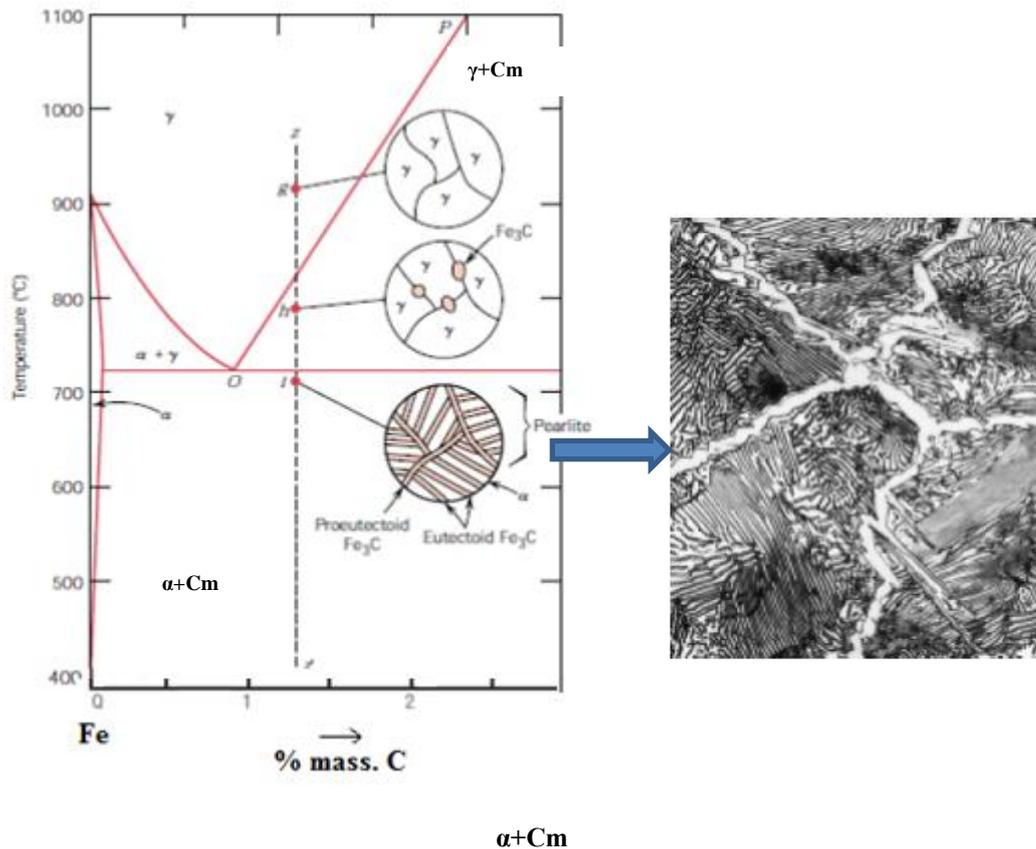


Fig. 6 : Formation de la microstructure lors de refroidissement d'un acier de composition hypereutectoïde partant de la phase austénite  $\gamma$ . La figure à gauche montre la micrographie d'un acier hypereutectoïde, comportant 1.4 % mass. C dont la microstructure consiste en un réseau de cémentite pro-eutectique blanche entourant des colonies de perlite.

#### 1-4. Microstructure de l'alliage hypo-eutectique

On suppose que le début du refroidissement, correspondant à la coulée, se situe à la température  $T_0$ , soit au point  $m_0$  sur la figure 7. À cet instant, l'alliage comprend une seule phase liquide homogène; jusqu'au point de rencontre avec le liquidus, il se refroidit sans changement. En  $m_1$ , la solidification commence ; une solution solide se dépose sous forme de dendrites s'appelle  $\gamma$  *pro-eutectique* dont la teneur en carbone est celle du point  $C_2$  et la solidification se poursuit ; les dendrites s'épaississent par dépôt de couches successives de plus en plus riches en carbone, au détriment de la phase liquide qui s'enrichit également en carbone. La diffusion du carbone étant très rapide, la solution s'homogénéise plus ou moins au fur et à mesure du grossissement des dendrites. Dans ce cas la concentration en Carbone dans le liquide augmente et devient 4,3% mass. C, donc les conditions de la transformation eutectique sont réalisées. Juste avant 1148°C (point  $m_2$ ) l'alliage comprend une partie solidifiée sous forme de dendrites de solution solide  $\gamma^{pro}$ , baignant dans un liquide contenant 4,3 % de C. Ce liquide se transforme en mélange eutectique s'appelle *ledeburite* et au-dessous

du palier eutectique (point  $m_3$ ), la microstructure de cet alliage constitué des grains de  $\gamma^{\text{pro}}$  entourés des lamelles de l'eutectique. L'austénite eutectique contient une grande concentration en carbone et avec la diminution de la température, l'excès en Carbone se diffuse de l'austénite eutectique vers  $\text{Cm}^{\text{eut}}$  sous forme de  $\text{Cm}^{\text{II}}$  (point  $m_4$ ).

La phase  $\gamma^{\text{pro}}$  se transforme en un mélange eutectoïde (la perlite) ainsi que l'austénite eutectique à  $727^\circ\text{C}$  (point  $m_5$ ) et il reste les traces de leur surface externe à la température ambiante. Ce type d'alliage contient quatre types de cémentite :  $\text{Cm}^{\text{eut}}$ ,  $\text{Cm}^{\text{II}}$ ,  $\text{Cm}^{\text{eut}'}$ ,  $\text{Cm}^{\text{III}}$ .

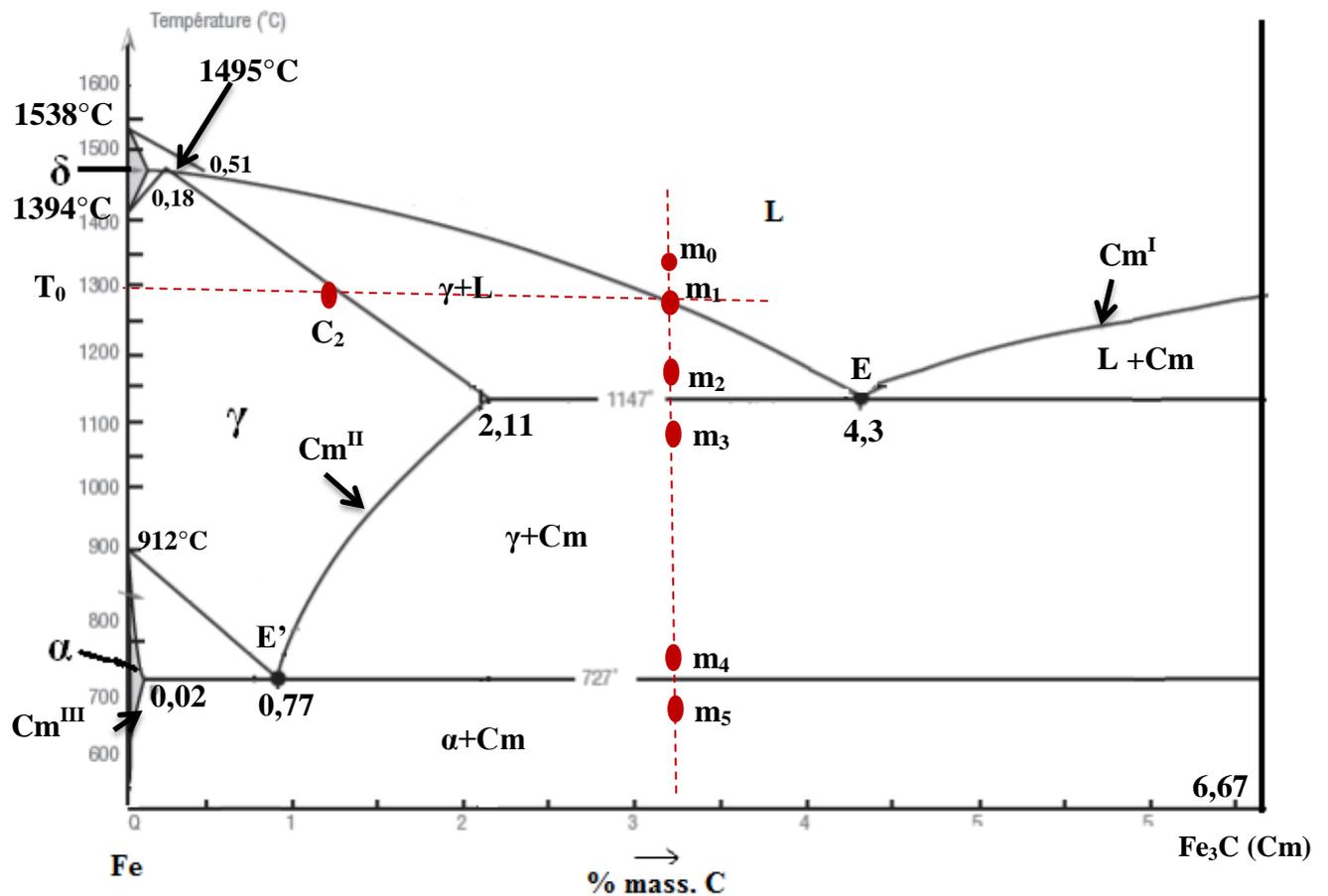


Fig. 7 : Diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C représente la position de l'alliage hypo-eutectique.

### 1-5. Microstructure de l'alliage eutectique

Lors de refroidissement de l'alliage de composition eutectique (4,3 % mass. C) à partir de liquide (point  $n_0$ ) dans la figure 7 vers le bas. Au départ l'alliage ne contient que la phase

liquide (point  $n_0$ ). Lorsque l'alliage se refroidit lentement sous la température eutectique (point  $n_1$ ), il est constitué des couches alternées (ou lamelles) des deux phases ( $\alpha^{eut}$  et  $Cm^{eut}$ ) qui se forme simultanément durant la transformation au point (E) de la figure 8, est appelée *ledeburite*. L'austénite eutectique contient une grande concentration en carbone et avec la diminution de la température, l'excès en Carbone se diffuse de l'austénite eutectique vers  $Cm^{eut}$  sous forme de  $Cm^{II}$  (point  $n_2$ ). Avec la diminution de la température l'austénite eutectique se transforme en un mélange eutectoïde (la perlite) à  $727^\circ C$  (point  $n_3$ ) et il reste les traces de leur surface externe à la température ambiante. Ce type d'alliage contient quatre types de cémentite :  $Cm^{eut}$ ,  $Cm^{II}$ ,  $Cm^{eut'}$ ,  $Cm^{III}$  où la concentration de  $Cm^{III}$  est très faible.

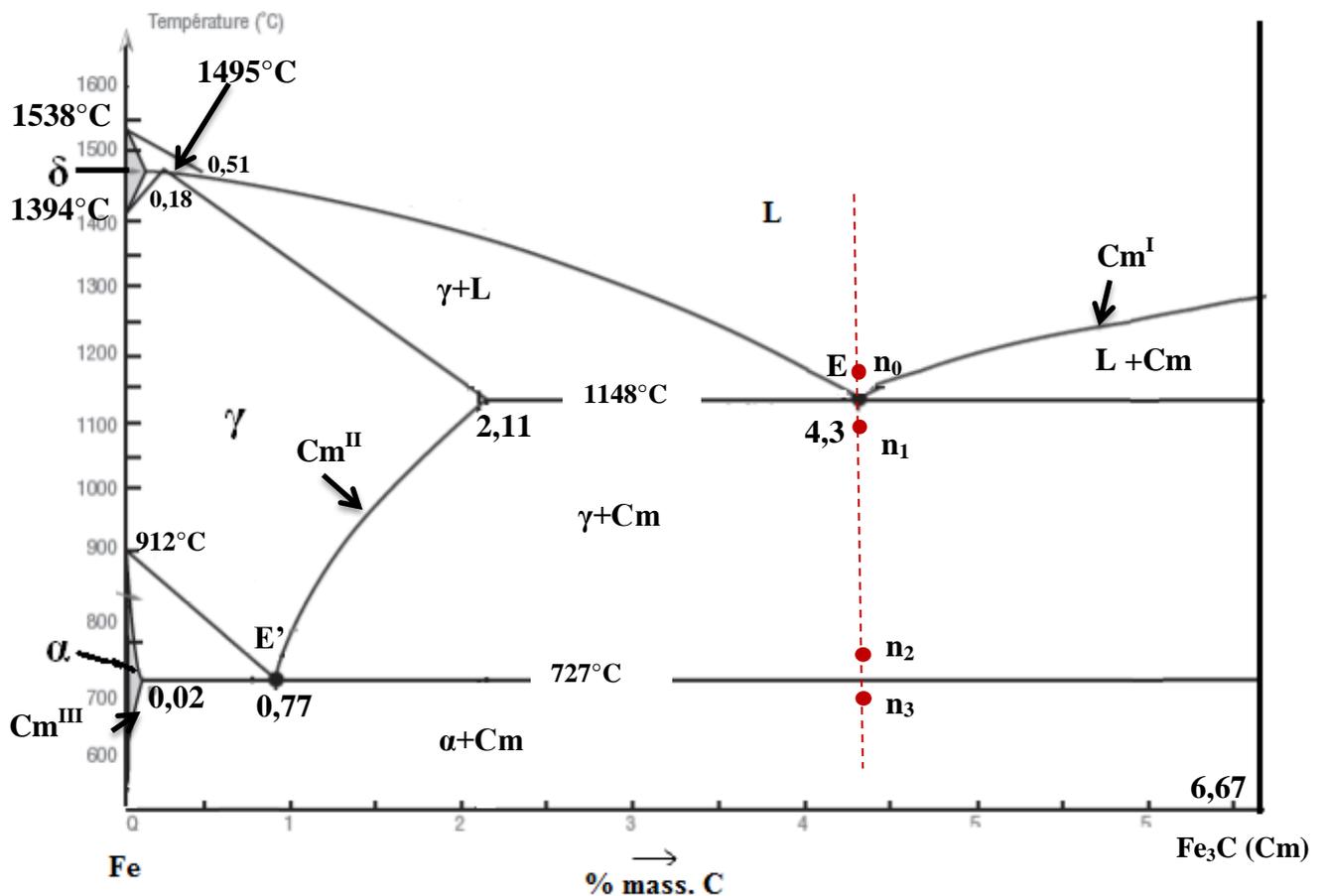


Fig. 8 : Diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C représente la position de l'alliage eutectique

### 1-6. Microstructure de l'alliage hyper-eutectique

En raisonnant comme pour le cas de l'alliage hypo-eutectique, on constate au refroidissement, à partir de  $p_0$  à  $p_5$  (figure 9). Une solidification progressive par dépôt de cristaux de cémentite pro-eutectique (ou primaire  $Cm^I$ ) au point  $p_1$  avec appauvrissement en

carbone du liquide restant et avec la diminution de la température la concentration de  $Cm^I$  augmente au détriment de liquide (point  $p_2$ ). À 1148 °C, il y a formation de l'eutectique à 4,3 % mass. C dans le liquide. Au-dessous du palier eutectique (point  $p_3$ ), la microstructure de cet alliage constitué de  $Cm^I$  entourés des lamelles de l'eutectique. L'austénite eutectique contient une grande concentration en carbone et avec la diminution de la température, l'excès en Carbone se diffuse de l'austénite eutectique vers  $Cm^{eut}$  sous forme de  $Cm^{II}$  (point  $p_4$ ). L'austénite eutectique se transforme à la perlite à 727°C (point  $p_5$ ) et il reste les traces de leur surface externe à la température ambiante. Ce type d'alliage contient quatre types de cémentite :  $Cm^{eut}$ ,  $Cm^{II}$ ,  $Cm^{eut}$ ,  $Cm^{III}$ . Avec la diminution de la température, le Carbone diffuse de ferrite eutectoïde et se précipite sus forme de  $Cm^{III}$  jusqu'à la température ambiante.

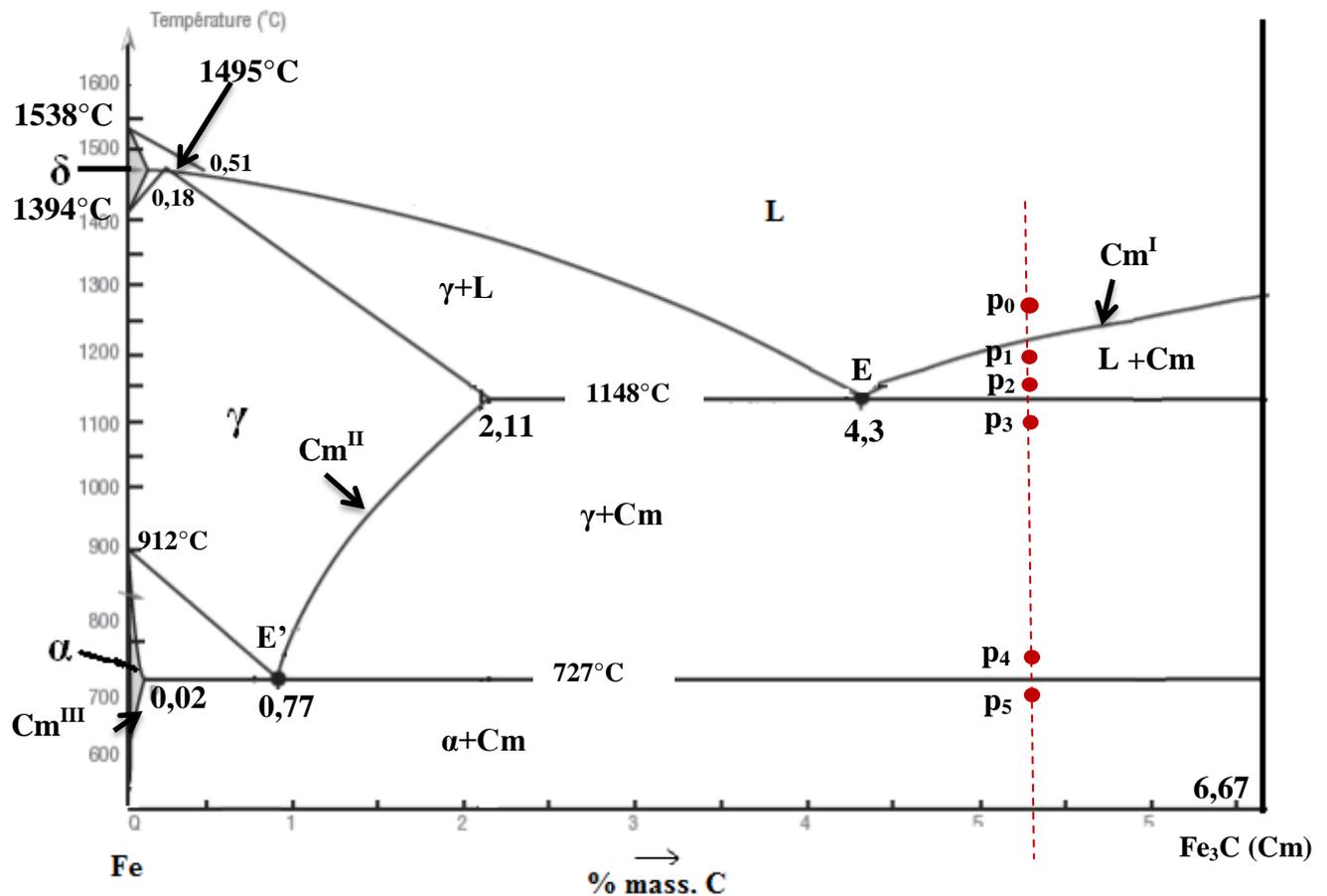


Fig. 9 : Diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C représente la position de l'alliage hyper-eutectique

## Les phases **hors équilibre** dans le système Fe-C :

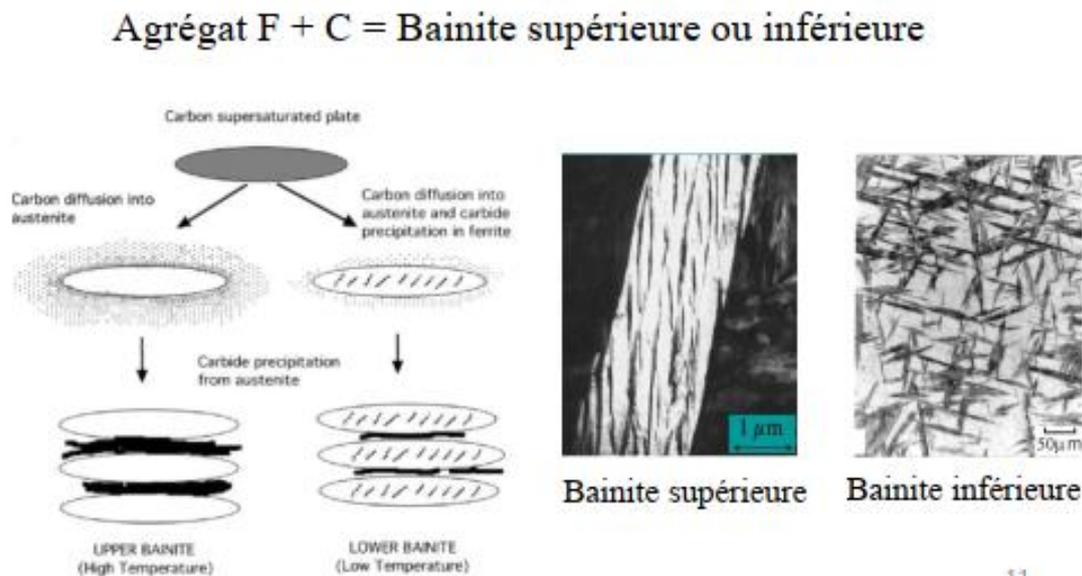
### 1. Troostite

C'est une perlite extrêmement fine obtenue pour des vitesses de refroidissement assez importantes (huile). Les nodules de troostite qui se développent à partir des joints de grains sont constitués par des lamelles de ferrite-cémentite non séparables en microscopie optique.

Cette microstructure est caractérisée d'une trempe douce. Les caractéristiques mécaniques de troostite sont assez importantes ( $H_V \approx 450$ ).

### 2. Bainite

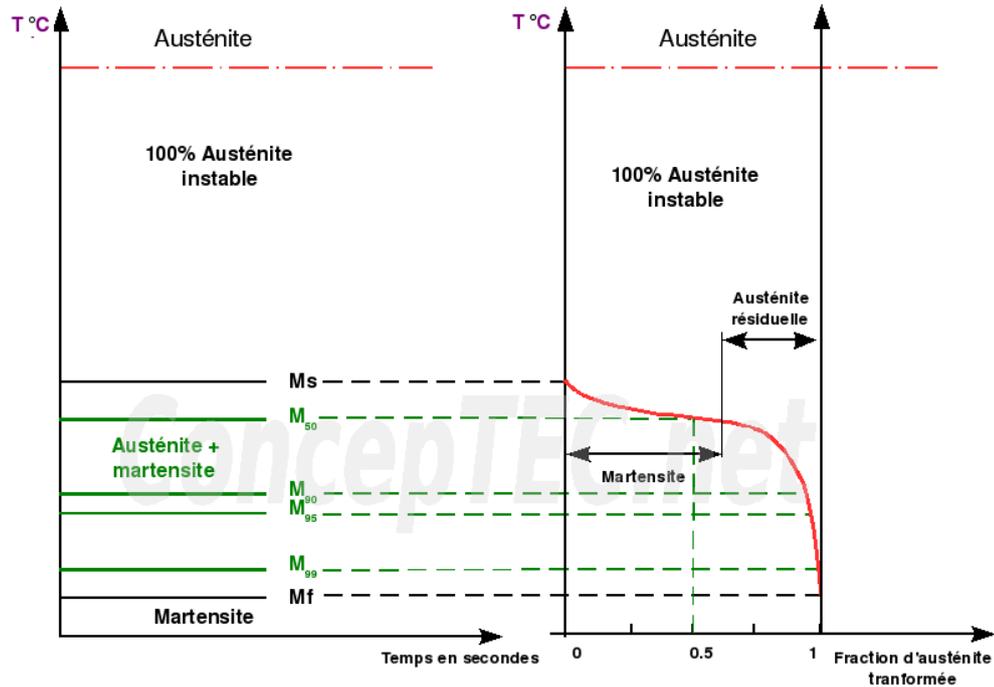
Ce constituant qui présente une morphologie aciculaire est obtenu après des vitesses de refroidissement élevées. On distingue des bainites supérieures qui peuvent être considérées comme étant des plaquettes de ferrite contenant des carbures apparaissant parallèlement à l'axe de la plaquette, et des bainites inférieures qui s'assimilent à des plaquettes de ferrite contenant une fine précipitation de carbures dispersés dans la plaquette de ferrite. Les caractéristiques mécaniques associées à une texture bainitique approchent celles d'une structure martensitique.



**Microstructure bainitique**

### 3. Martensite

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est la caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température de l'austénitisation, et elle coexiste souvent avec la bainite et la troostite. La martensite possède une grande dureté ( $HV = 700$  à  $900$ ), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite.



### 4. Sorbite

Ce constituant n'est plus un produit de décomposition directe de l'austénite puisqu'il correspond, en fait, à un stade de décomposition de la martensite pour des températures supérieures à environ  $400^{\circ}\text{C}$ . C'est un mélange complexe de carbure finement réparti dans une matrice ferritique désordonnée. Elle conduit à des propriétés mécaniques intéressantes. Par exemple la dureté reste encore élevée ( $H_V \approx 300$  à  $400$ ) pour une bonne résilience.