

Chapitre 2 : Matériaux métalliques

Partie 3 : Diagramme d'Equilibre Fer-Carbone

III-1 Introduction :

Les fontes sont des alliages fer/carbone se trouvant dans la zone d'influence de la phase eutectique, appelée lédéburite (4,30 %C) dans le diagramme habituel métastable (diagramme à cémentite). Il s'agit d'alliages contenant entre 2,11 et 6,67 % de carbone. Contrairement aux aciers, on ne peut pas obtenir d'austénitisation complète à haute température ; lors d'une coulée, il se forme de la cémentite ou du graphite, nous le verrons plus tard — avant la solidification complète. Le terme « fonte » est parfois utilisé pour désigner des objets moulés, comme par exemple dans l'expression « fonte d'aluminium » (en général de l'alpax). Il s'agit d'un abus de langage.

La fabrication de la fonte a été décrite au chapitre concernant l'élaboration de l'acier. La fonte est une étape intermédiaire dans la fabrication de l'acier à partir du minerai, on parle alors de fonte brute « pig iron » ou fonte de première fusion. Une partie de cette fonte peut être coulée spécifiquement pour être utilisée en tant que telle, on parle alors de fonte élaborée « cast iron » ou de fonte de seconde fusion. On peut synthétiser de la fonte élaborée par fusion d'acier non allié et de graphite.

III-2 Variétés allotropique et magnétique du fer

Le Fer existe sous deux variétés allotropiques différentes, c'est-à-dire avec deux formes cristallines : CC et CFC.

- À des basses températures et jusqu'à 912°C (A3), ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré (CC) : On l'appelle alors Fer α . Le fer α ne dissout pratiquement pas le carbone : 0.02%C au maximum à 723°C, moins de 0.01%C à 300°C.
- À des températures supérieures à 912 °C et jusqu'à 1394°C (A4) le réseau cristallin est du type cubique à faces centrées (CFC) : on l'appelle Fer γ . Le fer γ dissout facilement le carbone : 0.8%C à 723°C, 2.14%C à 1147°C.
- Au-dessus de 1394°C et jusqu'au point de fusion à 1538°C, le fer retrouve la structure cubique centrée du Fer α : On l'appelle alors Fer δ . Il dissout un peu mieux le carbone que le Fer α (0.07%C au maximum à 1493°C).
- Jusqu'à 768°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.

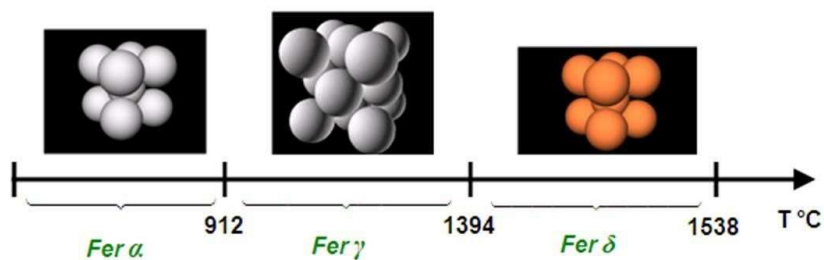


Fig. 1. Transformation allotropique du Fer

III-3 Les différentes phases du système Fer-Carbone

III-3-1 La ferrite α :

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , 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.

III-3-2 La ferrite δ :

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

III-3-3 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°C. Ce constituant n'existe pas à la température ordinaire. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

III-3-4 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 de 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 blanche. Elle est très dure et très fragile.

III-3-5 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 ($A\% \approx 10$).

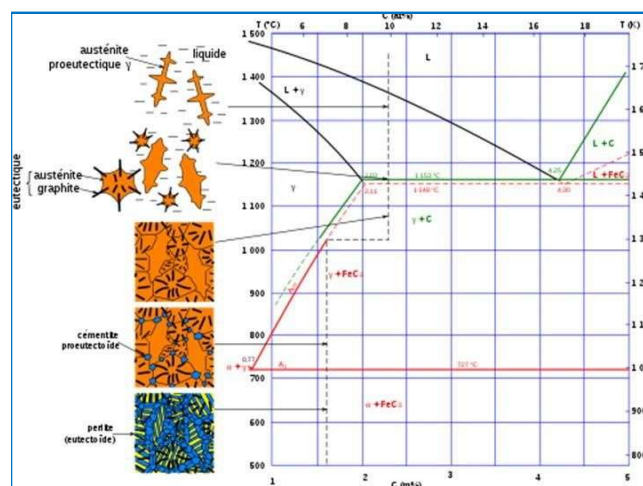


Fig. 2. Illustration schématique des principaux constituants du système Fe_3-C

III-4 Diagramme d'équilibre Fer-Carbonate III-4-1 Diagramme stable- diagramme métastable

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

- 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**.
- La deuxième forme une phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur Cgr, 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.

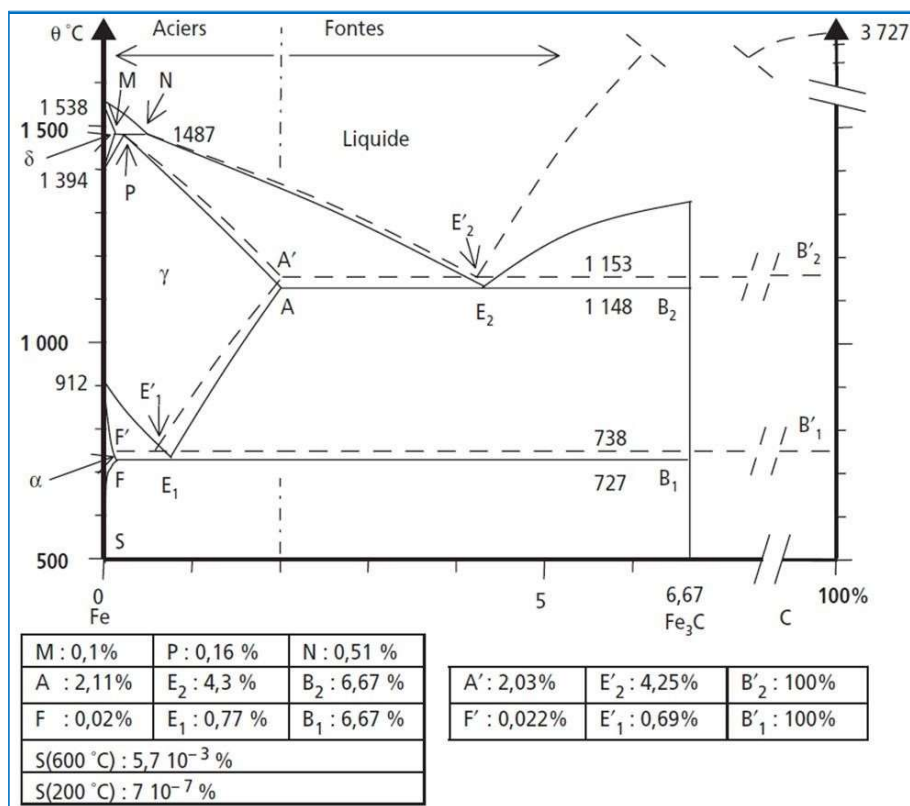


Fig. 3. Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe -Fe₃C.

III-4-2 Analyse du diagramme Fer-carbone à cémentite :

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_3C (6.67%C) est 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).

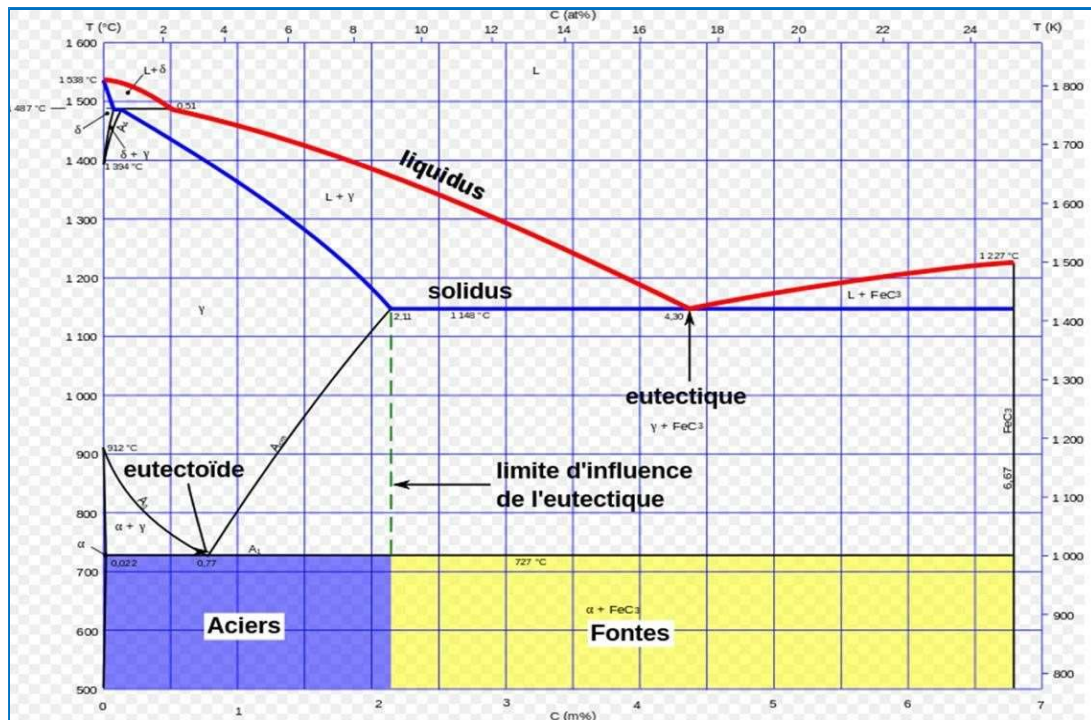


Fig. 4. Diagramme métastable Fe- Fe₃C

a. Courbes :

- **Acm** : indique la fin de la dissolution après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.
- **A0** : (210°C) précise la température de la transformation magnétique de la cémentite.
- **A1** : précise la fin de la transformation au refroidissement de l'austénite. L'austénite n'existe plus au-dessous de cette ligne.
- **A2** : (point de Curie $\approx 768^\circ\text{C}$) précise la température de la perte de magnétisme du Fer α . en générale ce point ne figure pas sur le diagramme Fer-C.
- **A3** : 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 δ et/ou liquide

.L'austénite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

On peut trouver Ac3, Ac4... pour indiquer que le point est tracé en chauffage, ou Ar3, Ar4 lorsqu'il s'agit de refroidissement.

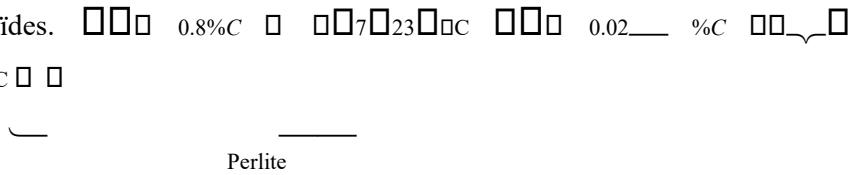
b. Les transformations :

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.

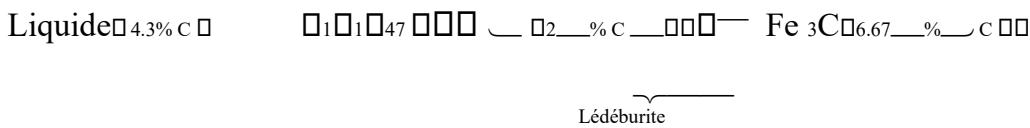
Réaction eutectoïde

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 **hypo**eutectoïdes et ceux qui sont plus carburés **hyper**eutectoïdes.



Réaction eutectique

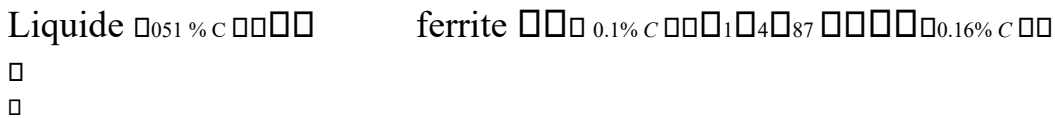
Un deuxième point remarquable doit être noté correspondant à la teneur de 4.3% de carbone à 1147°C, ce point est dit eutectique. A la température eutectique il existe trois phases en équilibre.



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.



III-5 Influence des éléments d'alliages (éléments α-gènes et γ-gènes)

La mise en solution solide d'éléments d'alliage dans le fer modifie la position des points A3 et A4. Ces éléments sont classés selon leurs influences sur la position de ces points.

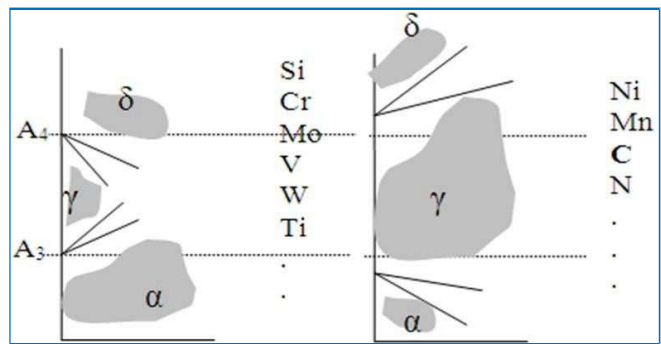


Fig.5. Eléments α-gènes et γ-gènes

- On appelle α-gènes tout élément qui stabilise la phase CC, il élève la température du point A3 et abaisse celle du point A4.
- On appelle γ-gènes tout élément qui stabilise la phase CFC, il abaisse la température du point A3 et élève celle du point A4.

III-6 Étude du refroidissement du diagramme métastable Fe₃-C III-6-1 Cas de l'acier hypoeutectoïde à 0.4%C

À T₁ : apparition des premiers cristaux de la ferrite α proeutectoïde.

À T = 727 + ε, les fractions massiques des différentes phases présentes sont :

$$y_{\text{proeutectoïde}} = y$$

$$\frac{0.77 - 0.4}{0.77 - 0.02} = \frac{0.5 - 0.4}{0.77 - 0.02}$$

□

$$\frac{0.4 - 0.02}{0.77 - 0.02}$$

□□□

$$\frac{0.5 - 0.02}{0.77 - 0.02}$$

□

$$0.77 - 0.02$$

À cette température l'austénite a une composition chimique très proche à celle de l'eutectoïde soit ≈ 0.77%C.

À T = 727 : température de transformation eutectoïde, L'austénite γ subit la transformation eutectoïde pour donner naissance à la perlite.

La structure finale typique des aciers hypoeutectoïdes à la température ambiante est : Ferrite_{proeutectoïde} + perlite

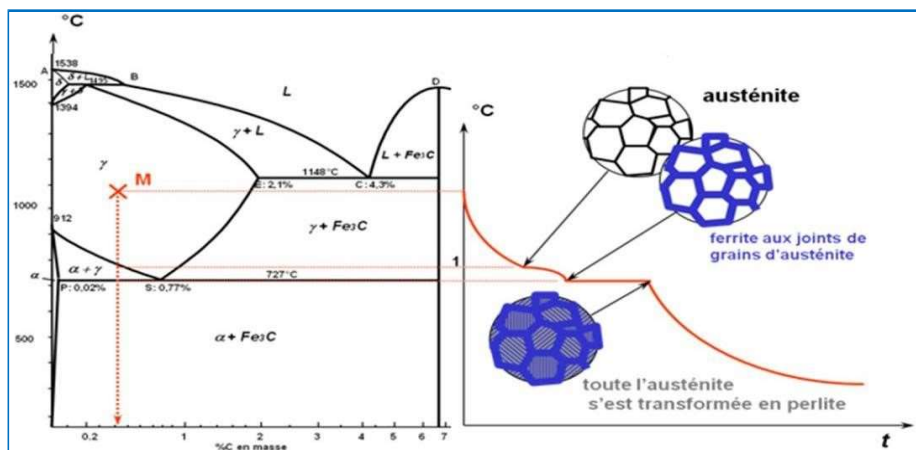


Fig. 6. Acier hypoeutectoïde à 0.4%C

III-6-2 Acier hypereutectoïdes 1. 2%C

La description du refroidissement des aciers hypereutectoïdes est semblable à ceux des aciers hypoeutectoïdes sauf que cette fois ci la phase proeutectoïde est la cémentite. La structure finale typique des aciers hypereutectoïdes à la température ambiante est : Cémentite_{proeutectoïde} + perlite.

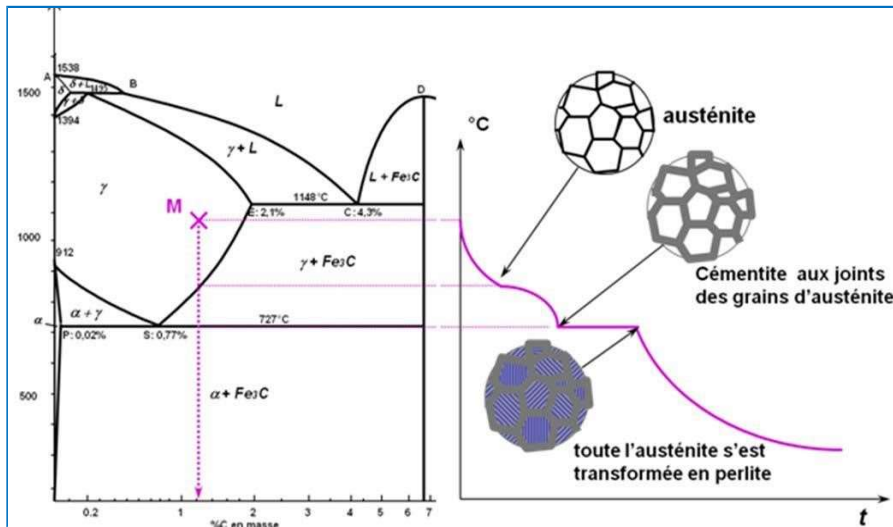


Fig. 7. Acier hypereutectoïde à 1.2 %C

III-6-3 Acier eutectoïde à 0.77%C

La spécificité de cet acier c'est qu'il ne possède pas de phase proeutectoïde donc sa structure à la température ambiante est **100% de perlite**

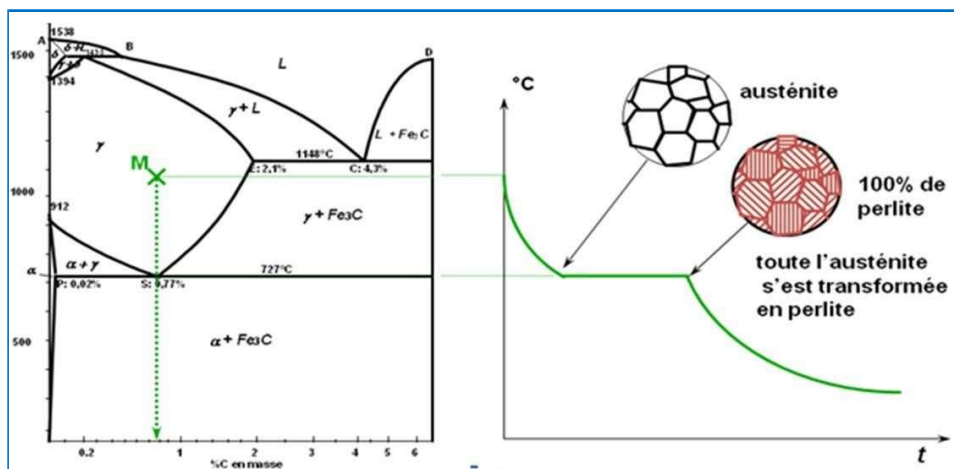


Fig. 8. Acier eutectoïde à 0.77%C

III-6-4 Transformation dans les fontes

Les fontes contiennent plus de 2 %C et toutes terminent leur solidification au palier eutectique à 1 148 ou 1 153°C : leur aptitude au moulage et leur nom de « fontes » proviennent de cette basse température de solidus. Ce sont des matériaux bon marché mais dans l'ensemble plus fragiles que les aciers. Comme les aciers, elles peuvent subir des traitements thermiques de trempe et revenu, et contenir des éléments d'alliages.

III-6-5 Fonte hypoeutectique à 3%C

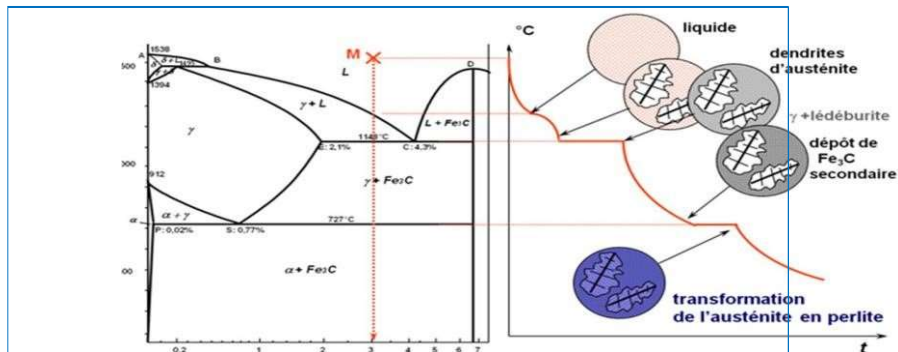


Fig. 9. Fonte hypoeutectique à 3%C

À T_1 : début de solidification, il y a formation de cristaux d'austénite, en général sous forme dendritique. La température étant relativement élevée, l'homogénéisation par diffusion des phases liquides et solide est rapide.

À $T = 1148^\circ\text{C} + \varepsilon$: l'alliage est biphasé et constitué de dendrites d'austénite à environ 2% de C et de liquide à 4,3% C

La fraction de l'austénite = $(4,3 - 3) / (4,3 - 2,1) = 0,59$

À 1148°C : température eutectique

Le liquide se transforme en un agrégat eutectique (lédéburite) formé d'ilots d'austénite à 2% C dans une matrice de cémentite. Les dendrites d'austénite proeutectique ne subissent aucune transformation.

En dessous de 1148°C jusqu'à 727°C :

Il y a appauvrissement en C (de à 0,8 %) de la phase austénite avec formation de cémentite proeutectoïde (ou secondaire).

À $T = 727^\circ\text{C} + \varepsilon$: la fraction massique de l'austénite est de l'ordre de 0,37.

À $T = 727^\circ\text{C}$: l'austénite va se transformer en perlite.

À l'ambiante : une fonte blanche hypoeutectique est donc constituée par une matrice de cémentite (eutectique + proeutectoïde) et de blocs de perlite.

III-6-6 Fonte hypoeutectique à 5%C

Les transformations sont alors celles décrites pour les fontes hypoeutectiques. Sauf que cette fois ci la phase proeutectique est la cémentite (cémentite primaire).

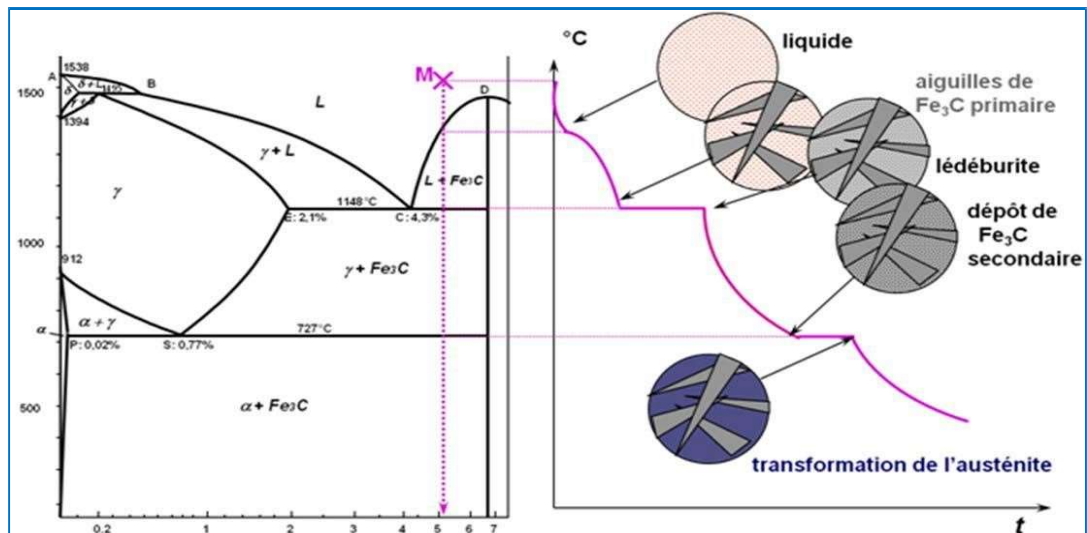


Fig. 10. Fonte hypoeutectique à 5%C

Conclusion

Selon la teneur en carbone, les alliages Fer-Carbone sont classés en acier et fonte. On s'intéresse pour la suite du cours, à étudier les traitements thermiques de l'acier afin d'améliorer ses propriétés.