
CHAPITRE 3

ETUDE DU DIAGRAMME FER-CARBONE

Contenu :

- ☞ *Transformations allotropiques du Fer*
 - ☞ *Transformations des aciers*
 - ☞ *Transformations des fontes*

Plan du cours

Objectifs généraux

- ☞ Identifier les paramètres microstructuraux des alliages ferreux ;
- ☞ Choisir une structure donnée pour répondre à une exigence industrielle donnée.

Objectifs spécifiques

- ☞ Connaître les phases résultantes des transformations métallurgiques dans des conditions d'équilibre (le cas des aciers et des fontes) ;
- ☞ Appliquer la règle des segments inverses pour déterminer les fractions massiques des phases en présence et déduire leurs compositions chimiques ;
- ☞ Connaître le rôle des défauts cristallins sur les caractéristiques mécaniques des aciers et des fontes ;

Déroulement

Le chapitre sera abordé durant 4 séances de 1h:30min réparties comme suit :

- ☞ Première séance : Etudes du diagramme fer-carbone : Cas des aciers
- ☞ Deuxième séance : Etudes du diagramme fer-carbone : Cas des fontes
- ☞ Troisième séance : correction d'une application de synthèse

Prérequis

- ☞ Les structures cristallines ;
- ☞ Les notions de base des alliages binaires.

Evaluation

Réussir plus de 70% d'une application de synthèse et des TD proposés

Sommaire

Introduction

1. Variétés allotropique et magnétique du fer	42
2. Les différentes phases du système Fer-Carbone	43
2.1. La ferrite α	43
2.2. La ferrite δ	43
2.3. L'austénite γ	43
2.4. La cémentite (Carbone de fer Fe_3C)	43
2.5. La perlite	43
3. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone	44
3.1. Diagramme stable- diagramme métastable	44
3.2. Analyse du diagramme Fer-carbone à cémentite	44
3.3. Influence des éléments d'alliages	46
4. Étude du refroidissement du diagramme métastable Fe_3-C	47
4.1. Cas de l'acier hypoeutectoïde à 0.4%C	47
4.2. Acier hypereutectoïdes 1. 2%C	47
4.3. Acier eutectoïde à 0.77%C	48
5. Transformation dans les fontes	48
5.1. Fonte hypoeutectique à 3%C	49
5.2. Fonte hypoeutectique à 5%C	49
6. Exercices de synthèses	50

Introduction

Les fontes sont des alliages Fer-Carbone, Ils s'agissent 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 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.

1. 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 cubiques 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.

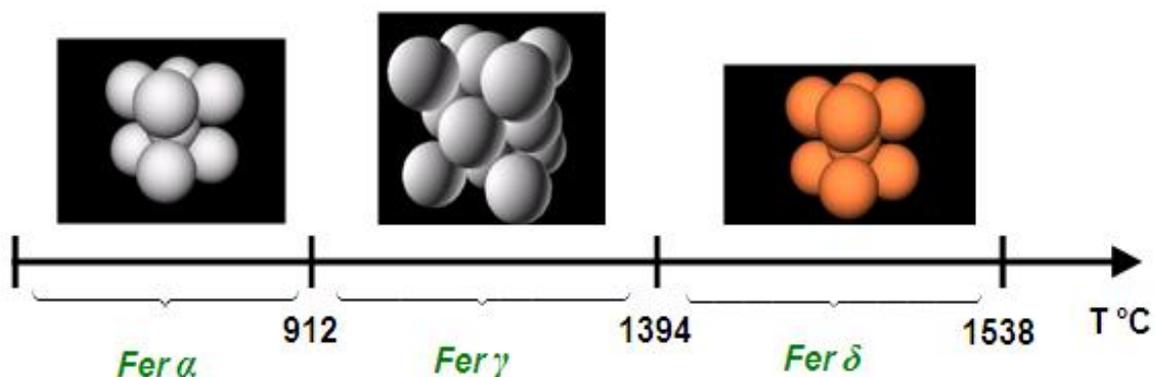


Fig. 1. Transformation allotropique du Fer

2. Les différentes phases du système Fer-Carbone

2.1. 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 ($A \approx 35\%$).

2.2. La ferrite δ

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

2.3. 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. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

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 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.

2.5. 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 ($A \approx 10$).

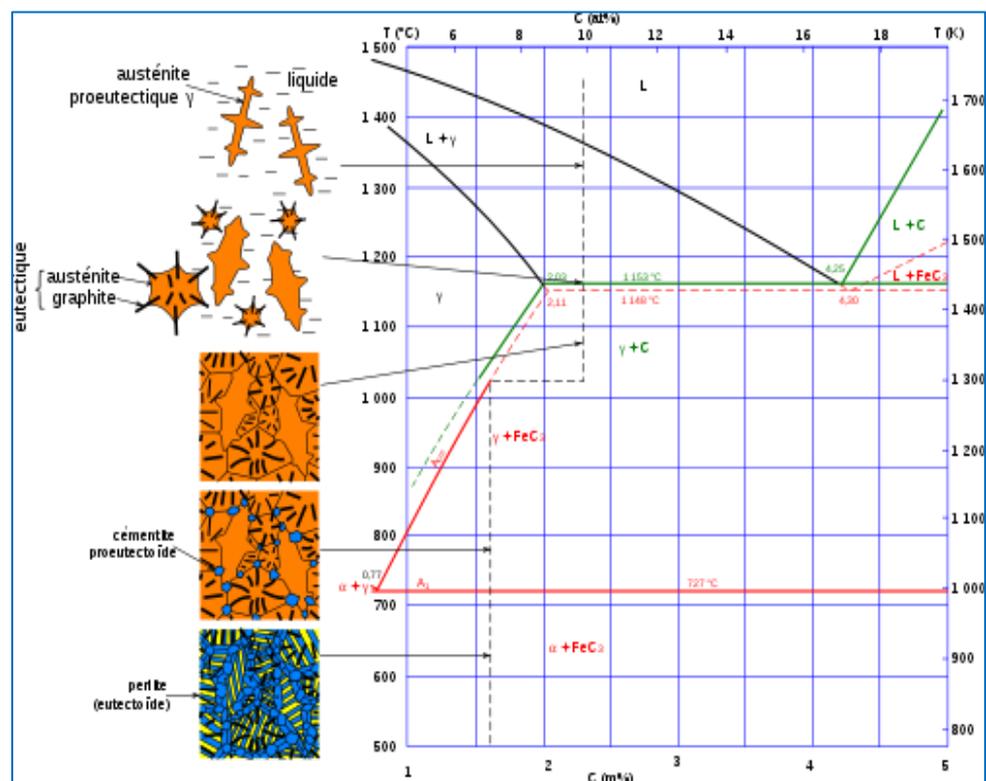


Fig. 2. Illustration schématique des principaux constituants du système Fe_3-C

3. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

3.1. 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.

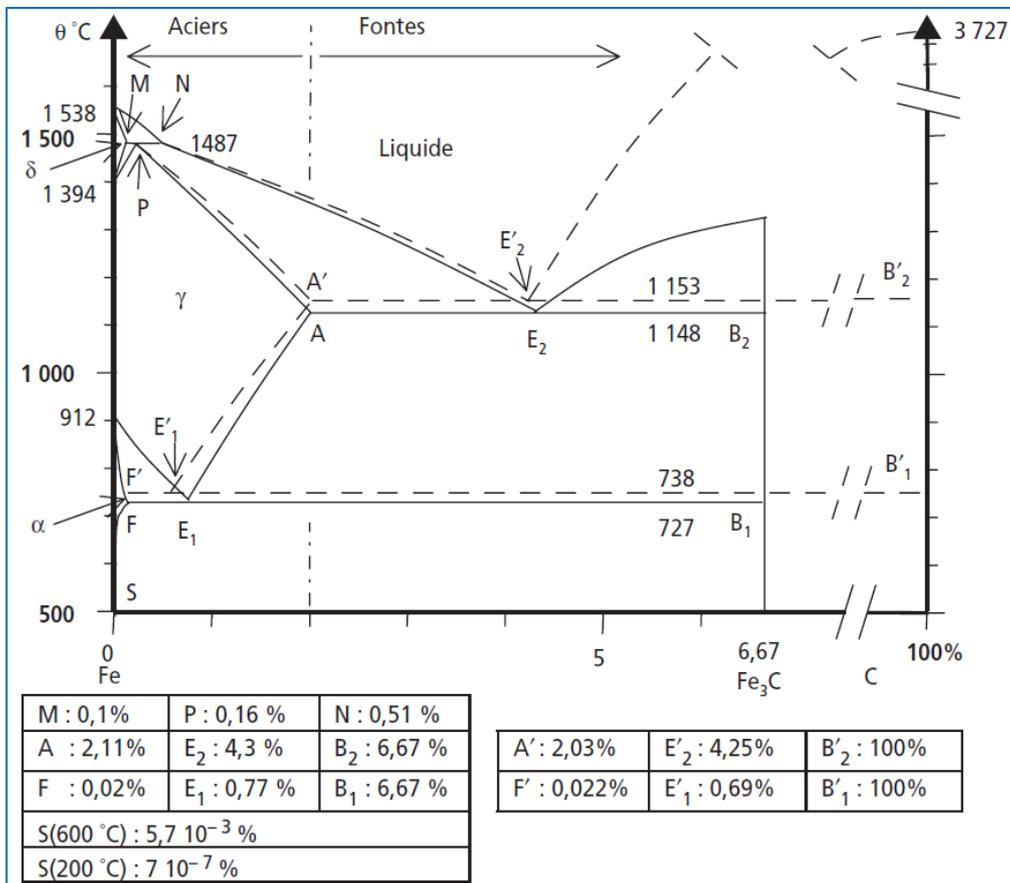
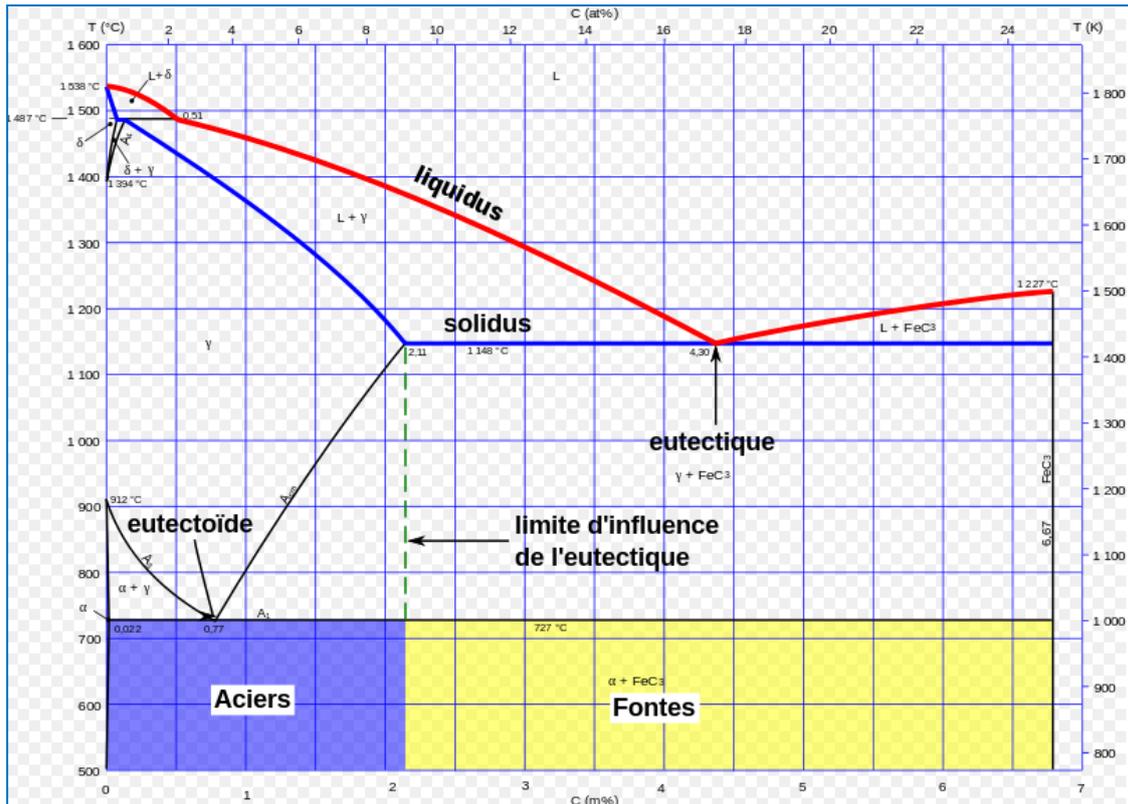


Fig. 3. Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe- Fe_3C .

3.2. 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) 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).

Fig. 4. Diagramme métastable Fe₃-C

a. Courbes

- **A_{cm}** : 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 ≈ 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.
- **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.

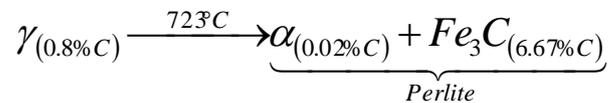
b. Les transformations

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

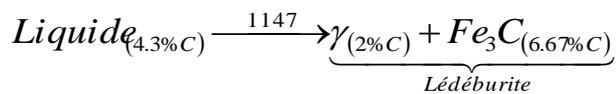
- ❖ **Eutectique à 1147°C** : il marque la température minimale d'existence du liquide.
- ❖ **Eutectoïde à 723°C (A₁)**. Il marque la fin de la transformation au chauffage de la perlite en austénite. Au-dessus de 723°C, la perlite n'existe plus
- ❖ **Péritectique à 1487°C**, mais d'importance négligeable 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 **hypoeutectoïdes** et ceux qui sont plus carburés **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.



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.

**3.3. Influence des éléments d'alliages**

La mise en solution solide d'éléments d'alliage dans le fer modifie la position des points A_3 et A_4 . Ces éléments sont classés selon leurs influences sur la position de ces points.

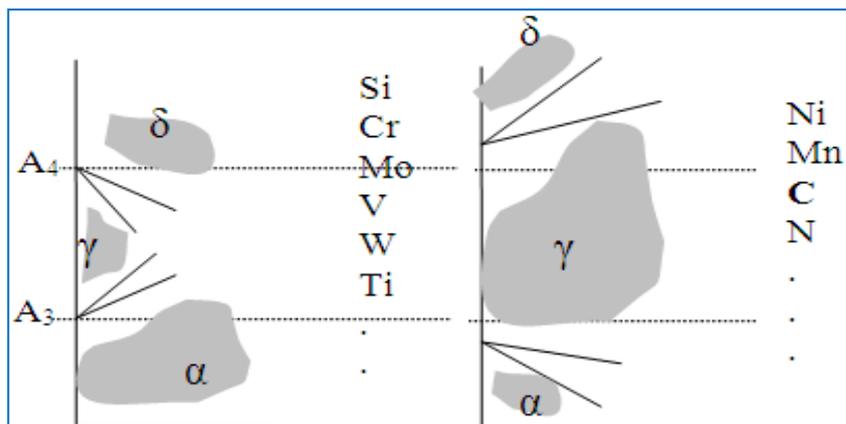


Fig.5. Eléments α -gènes et γ -gènes

- On appelle α -gènes tout élément qui stabilise la phase CC, il élève la température du point A_3 et abaisse celle du point A_4 .
- On appelle γ -gènes tout élément qui stabilise la phase CFC, il abaisse la température du point A_3 et élève celle du point A_4 .

4. Étude du refroidissement du diagramme métastable Fe₃-C

4.1. Cas de l'acier hypoeutectoïde à 0.4%C

À T_1 : apparition des premiers cristaux de la ferrite α proeutectoïde.

À $T = 727 + \epsilon$, les fractions massiques des différentes phases présentes sont :

$$y_{\alpha_{\text{proeutectoïde}}} = \frac{0.77 - 0.4}{0.77 - 0.02} = 0.5$$

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

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

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**

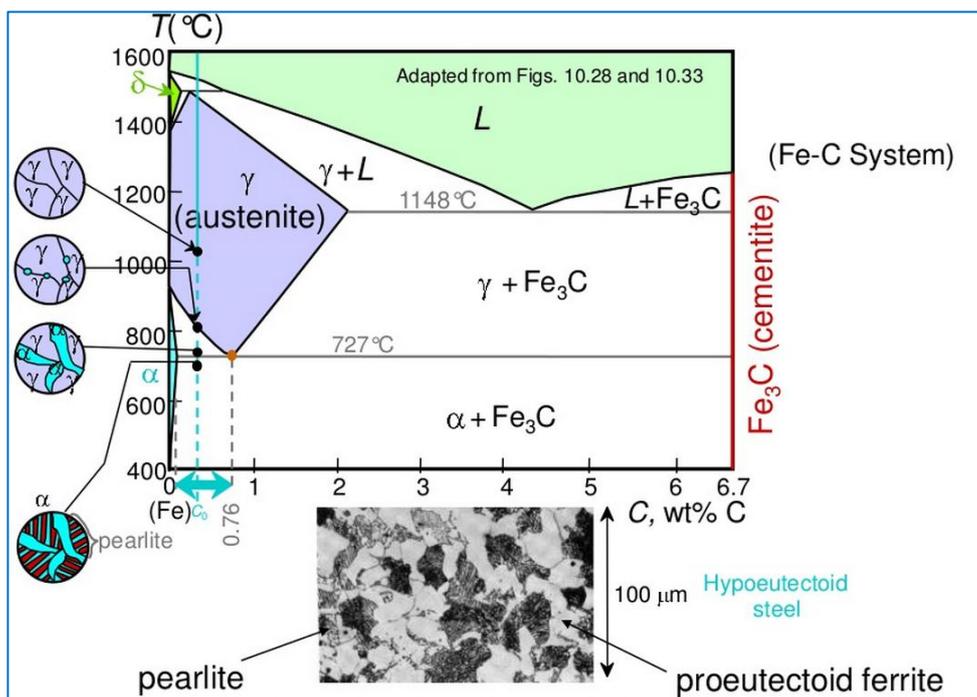


Fig. 6. Acier hypoeutectoïde à 0.4%C

4.2. 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.

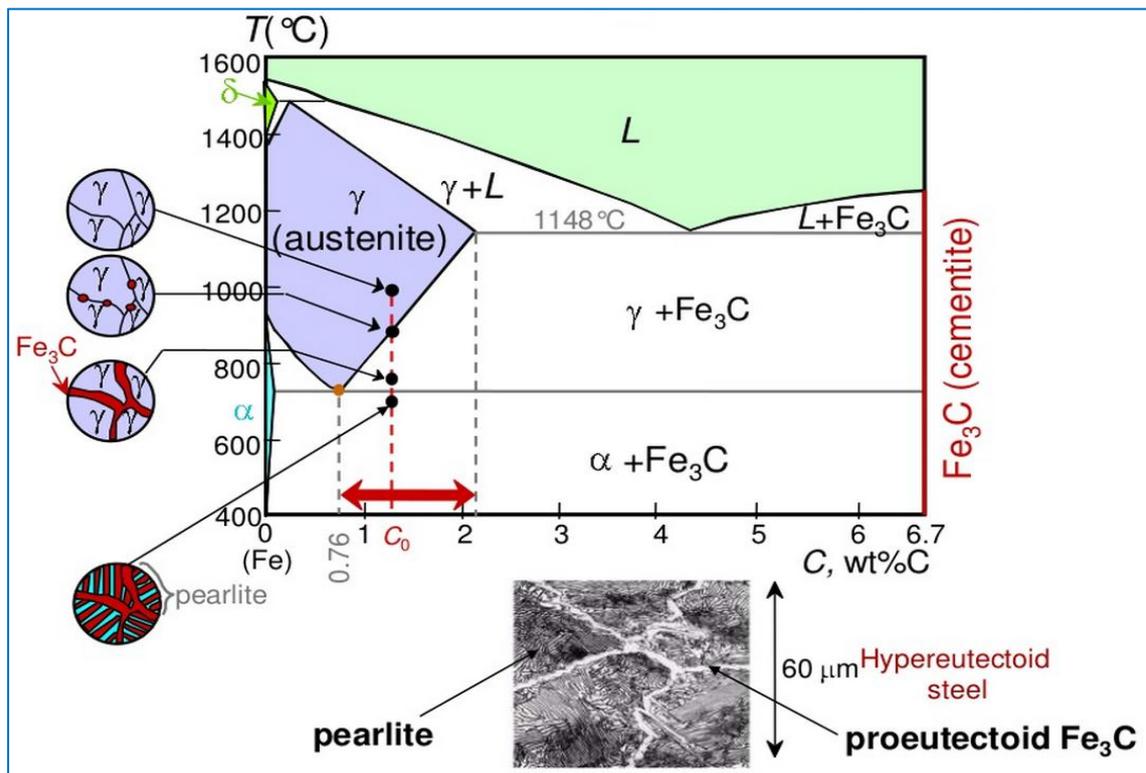


Fig. 7. Acier eutectoïde à 1.2%C [réf]

4.3. 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**

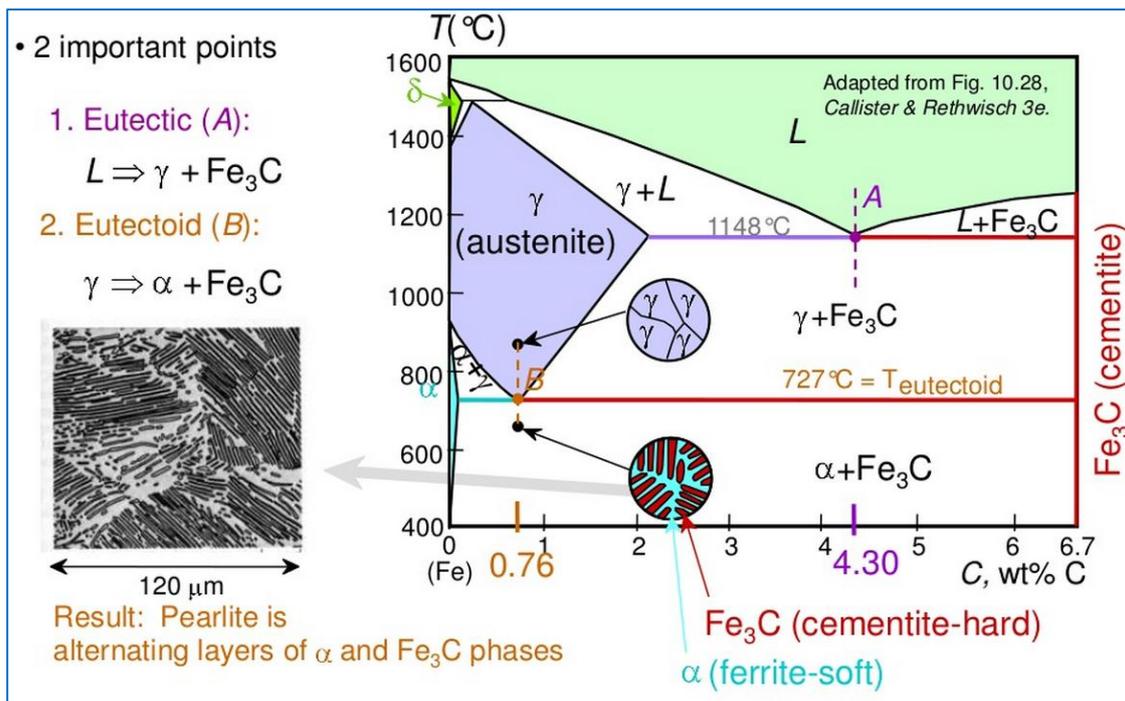


Fig. 8. Acier eutectoïde à 0.77%C [réf]

5. 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.

5.1. Fonte hypoeutectique à 3%C

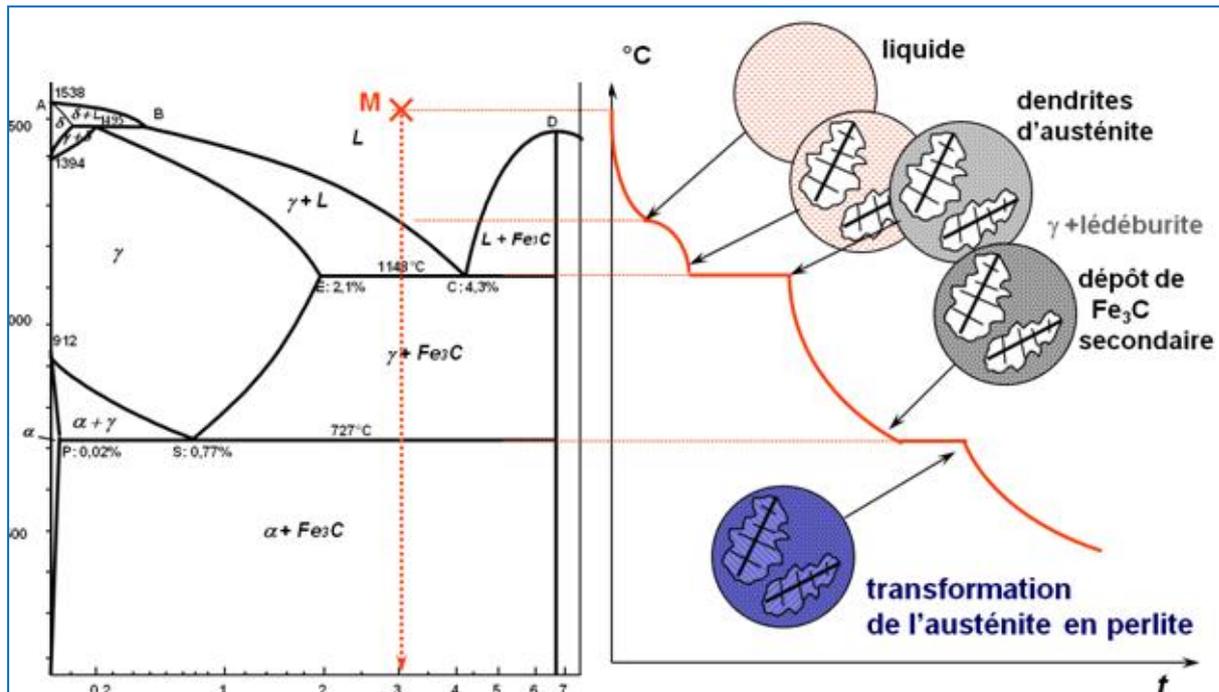


Fig. 9. Fonte hypoeutectique à 3%C

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.

5.2. 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).

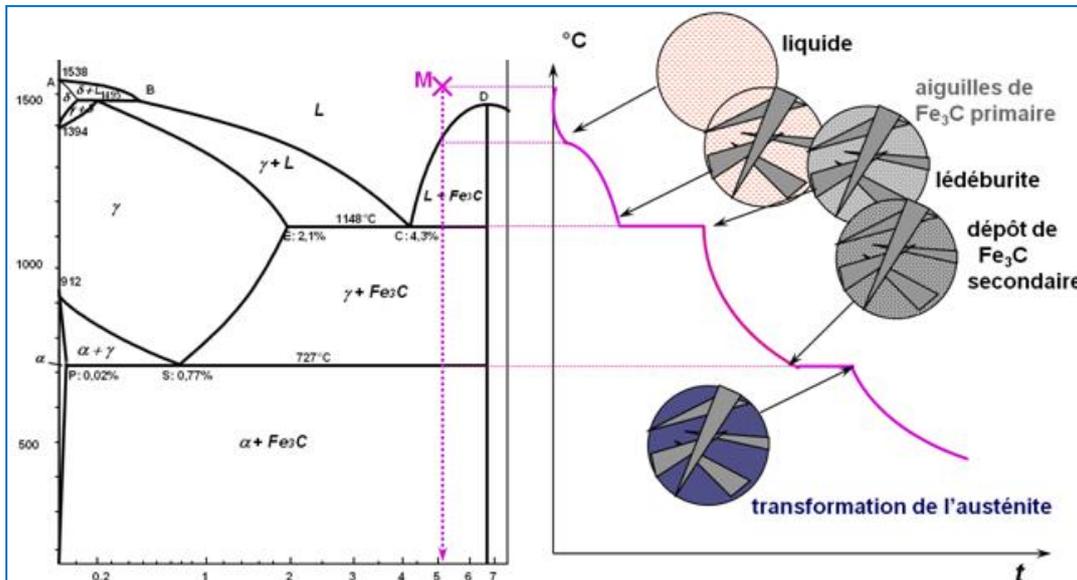


Fig. 10. Fonte hypoeutectique à 5%C

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.

6. Exercices de synthèses

Exercice N°1:

Considérez le diagramme d'équilibre « fer – carbone » (Fe-FeC) donné en cours. E pour un acier à 0.6% de carbone, répondre aux questions 1 et 2 ci-dessous.

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.
2. Lequel des schémas présentés ci-dessous représentent la microstructure de cet alliage aux températures suivantes : 1460 °C, 1400 °C, 724 °C et 20 °C ?

Légende :

- L Liquide
- Austénite
- Ferrite
- Perlite

Considérez maintenant un acier de composition eutectoïde.

3. Identifier phases en présence et leur proportion à la température ambiante (20°C)?
4. Quelles sont les températures de début et de fin de solidification de cet acier ?
5. Lequel des schémas (Fig. 1) représentent la microstructure de cet acier à 1420 °C ?

Exercice N°2:

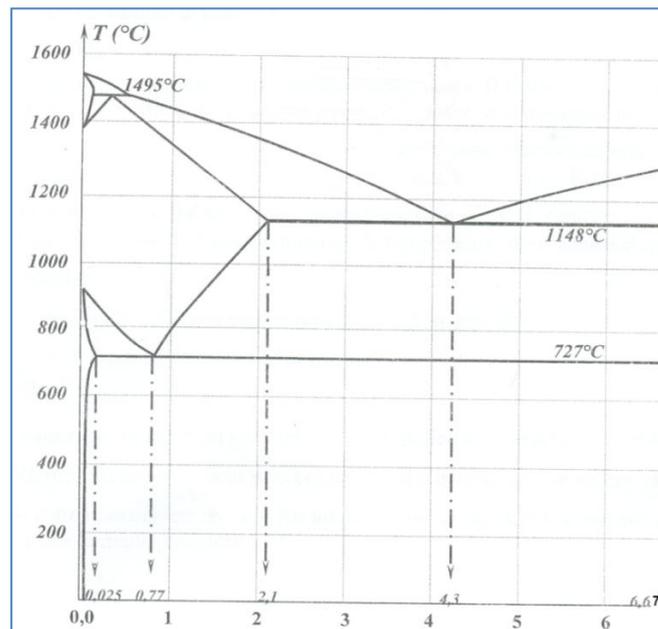
L'observation micrographique d'une pièce en acier non allié permet d'évaluer une présence d'environ 20% de ferrite et 80% de perlite dans la structure.

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.

Données : Désignation des aciers non alliés, C22, C25, C30, C40, C50, C60, C70.

Exercice N°3:

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.

Correction des exercices

Exercice N°1:

Transformations allotropiques du fer pur à l'état solide

Température (°C)	910	1394	---
Transformation	$\alpha \leftrightarrow \gamma$	$\gamma \leftrightarrow \delta$	---

Microstructure d'un acier à 0,6 %m. C à diverses températures

Température (°C)	1460	1400	724	20
Microstructure	e	c	f	h

Phases et proportions dans un acier eutectoïde à 20 °C

Phase	α	Fe_3C	---
Proportion (%)	88	12	---

Températures de début et de fin de solidification d'un acier eutectoïde

	Température (°C)
Début	1480
Fin	1400

Microstructure d'un acier eutectoïde à 1420 °C

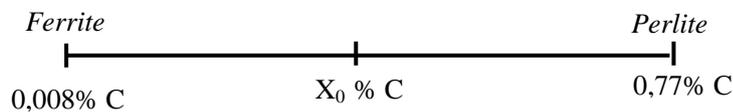
Schéma = e

Exercice N°2

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

1. L'acier est hypœutectoïde.

Appliquons la règle de segment inverse :



$$f_{(ferrite)} = \frac{0,77 - X_0}{0,77 - 0,008} = 0,2 \Rightarrow X_0 = 0,61\%C \Rightarrow \text{La nuance de l'acier est C60}$$

2. $X_{(\alpha)} = 0,008\%$ de carbone

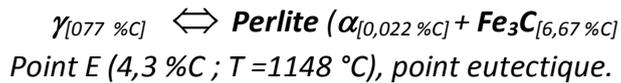
$$f_{(ferrite)} = \frac{0,77 - 0,60}{0,77 - 0,008} = 22,3\%$$

$X_{(perlite)} = 0,77\%$ de carbone

$$f_{(Perlite)} = \frac{0,60 - 0,008}{0,77 - 0,008} = 77,7\%$$

Exercice N°3

- 1- Diagramme d'équilibre métastable.
 3- Point E' (0,77%C ; T = 727 °C), point eutectoïde.
 ⇒ Transformation eutectoïde.



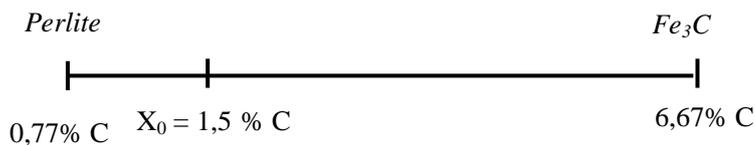
⇒ Transformation eutectique.



- 4- Alliage à 1,5 % de carbone.

On a la présence de deux phases [Perlite + Cimentite].

- Appliquons 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 hypereutectoïde**.

Exercice N°4:

$X_0 = 0,45\% \text{ de carbone}$.

- $T > 1495\text{ °C}$: présence de phase liquide contenant 0,45% de carbone.
- $T = 1495\text{ °C}$: apparition du premier germe d'austénite (γ).
- $1450 < T < 1495\text{ °C}$: $\text{Liq} + \gamma_{(\text{solide})}$.
- $T = 1450\text{ °C}$: fin de solidification de l'austénite.
- $740 < T < 1450\text{ °C}$: unique solution solide (austénite).
- $727 < T < 740\text{ °C}$: présence de deux phases (austénite + ferrite).
- $T = 727\text{ °C}$: présence de trois phases (ferrite + austénite + Perlite $[\alpha_{\text{eut}} + \text{Fe}_3\text{C}]$).
- $T < 727\text{ °C}$: présence de deux phases (ferrite + Perlite).