

3.1. Structure cristalline	112
3.1.1. Les atomes	112
3.1.2. La maille	112
3.1.3. Le cristal	112
3.1.4. Les dendrites	112
3.1.5. Les grains	112
3.2. Fusion et solidification d'un métal pur	114
3.2.1. Transformation allotropique	114
3.3. Fusion et solidification d'alliages	116
3.3.1. Alliage donnant une solution solide	116
3.3.2. Alliage donnant lieu à la formation d'un mélange eutectique	118
3.3.2.1. Point eutectique	118
3.3.2.2. Alliages inférieurs ou supérieurs à l'eutectique	118
3.4. Diagramme fer-carbone	120
3.4.1. Etude du diagramme	120

3

3.1. Structure cristalline
(fig. 3-1)

3.1.1. Les atomes

En se solidifiant, les métaux sont formés par une masse de petits cristaux constitués par des atomes. Ces atomes sont toujours disposés de façon régulière dans les cristaux pour former des solides géométriques parfaits.

(Voir introduction, classification périodique des éléments.)
Lorsque les atomes ne sont pas distribués régulièrement, on a une **substance amorphe** non cristalline.

3.1.2. La maille

Les atomes de fer sont disposés selon deux systèmes cubiques:

1. Système cubique centré pour le fer alpha et delta. L'arête mesure 0,29 millièmètre de micron.

Il faudrait, pour former une longueur de 1 mm, environ 3 000 000 d'arêtes.

2. Système cubique à faces centrées pour le fer gamma. L'arête mesure 0,36 millièmètre de micron.

3.1.3. Le cristal

Les mailles formées s'assemblent entre elles et constituent ainsi un réseau, appelé cristal.

3.1.4. Les dendrites

La juxtaposition enchevêtrée des cristaux constitue les dendrites.

Principe:

L'axe principal se forme le premier, puis apparaissent à angles droits des axes secondaires plus courts et à angles

droits de ceux-ci des axes encore plus courts.

Ces divers axes s'allongent et grossissent progressivement. Leur croissance se trouve limitée aux surfaces de rencontre des cristaux issus de centres voisins.

Le nombre de centres de solidification est d'autant plus grand que la solidification est plus rapide.

Une solidification rapide produit donc de petits dendrites et inversement une solidification lente conduit à de gros dendrites.

3.1.5. Les grains

Chaque axe principal ou centre de solidification a engendré un grain.

Ces grains sont aussi appelés macrocristaux.

Le métal solide est alors constitué par un assemblage compact de grains n'ayant aucune forme extérieure géométrique régulière et dont chacun correspond à une orientation cristalline constante dans tout son intérieur.

Remarque

Les rayons X ou le microscope électronique permettent de connaître la structure cristalline.

3.2. Fusion et solidification d'un métal pur
(fig. 3-2)

Principe

Chauffons un échantillon de métal pur par un apport régulier de chaleur, puis relevons l'élévation de température de cet échantillon sur un diagramme, avec en abscisse les temps de chauffage et en ordonnée les températures.

1. La température s'élève régulièrement.
2. La température se fixe dès qu'apparaît une goutte de liquide et reste constante tant qu'on est en présence de liquide et solide.

Cette température constante est le point de fusion du métal à la pression de l'expérience.

Remarques

La chaleur fournie au métal pendant la fusion sert uniquement à la transformation du solide en liquide sans élévation de température.

3. La température continuera de s'élever régulièrement quand toute la masse sera parvenue à l'état liquide.

Inversement, si nous laissons refroidir le liquide:

1. La température s'abaisse régulièrement.
2. La température reste constante à l'apparition de solide dans le liquide (voir cristallisation).

Remarque

La chaleur de solidification est égale à la chaleur de fusion.

3. La chaleur continuera de diminuer quand toute la masse sera parvenue à l'état solide.

3.2.1. Transformations allotropiques

L'étude du refroidissement de certains métaux, fer, nickel, étain, etc., montre que la courbe présente, en plus du palier de solidification, un ou plusieurs autres paliers à l'état solide du métal.

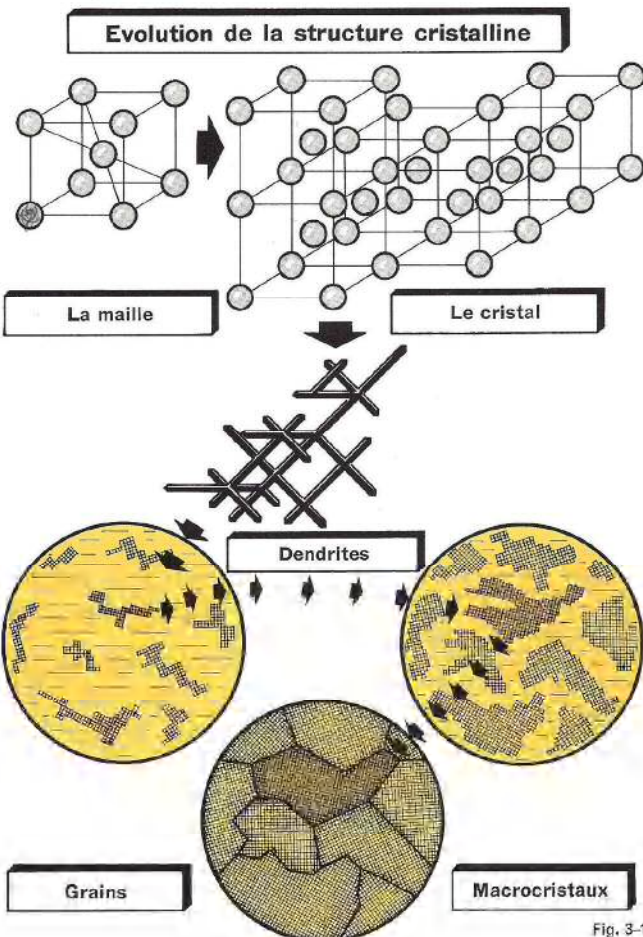
Le palier correspond à une transformation du métal, caractérisée essentiellement par une modification profonde de sa structure cristalline, désignée par transformation allotropique.

La température de transformation, comme pour les changements d'état solide en liquide ou liquide en solide, s'effectue à température constante.

Exemple

Le fer en le chauffant (Ac) subit une première transformation vers 908° C. Le fer alpha se transforme en fer gamma et à 1401° C une deuxième transformation, le fer gamma en fer delta (fig. 3-2).

Les deux transformations sont inversées si on laisse refroidir (Ar) le fer en fusion.



3

Fig. 3-1

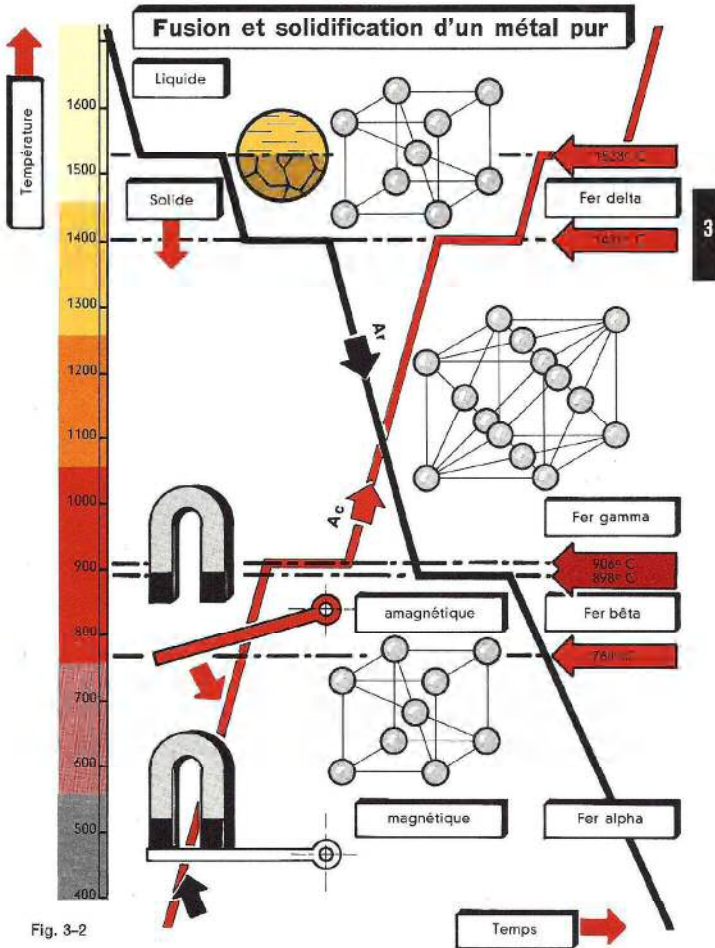


Fig. 3-2

3.3. Fusion et solidification d'alliages

Généralités

Le phénomène de fusion et de solidification pour un seul élément, métal pur, marque une température constante appelée **point de fusion**. Pour le mélange de métaux avec d'autres éléments, métaux ou métalloïdes, l'alliage commence à fondre à une certaine température et passe entièrement à l'état liquide à une température plus élevée ou inversement de l'état liquide à l'état solide à une température plus basse. Entre ces deux points de température l'alliage forme une masse pâteuse constituée de métal liquide et de cristaux solides dont les proportions varient en fonction de la température.

3.3.1. Alliage donnant une solution solide

(fig. 3-3)

Principe

Sur un diagramme portons en abscisse de 0 à 100% de l'élément A et de 100% à 0 pour l'élément B, en ordonnée les températures, puis relevons tous les points de début et de fin de fusion d'alliage des deux éléments A et B suivant leur pourcentage. En joignant tous les points obtenus, nous tracerons une courbe de début de fusion appelée « Solidus » et une autre courbe de fin de fusion appelée « Liquidus ».

Remarque

Les cristaux obtenus de cet alliage

contiennent à la fois les deux éléments A et B. Il est impossible de différencier les deux éléments dans les cristaux. Exemple: L'eau ne se distingue pas du sel dans une solution salée. **L'alliage est à l'état de solution solide.** Les deux métaux restent parfaitement miscibles à l'état solide.

Alliages

Cuivre-nickel, cuivre-platine, fer-molybdène, antimoine-or, etc.

Alliage donnant une solution solide

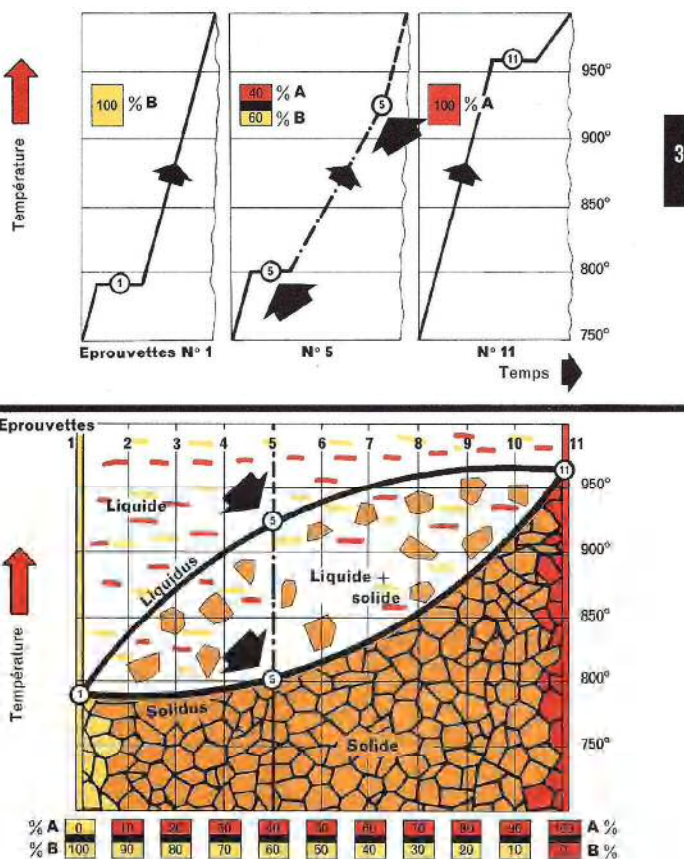


Fig. 3-3

3.3.2. Alliage donnant lieu à la formation d'un mélange eutectique

(fig. 3-4)

Principe

Sur un diagramme avec en abscisse de 0 à 100% de l'élément X et 100% à 0 pour l'élément Y, relevons en ordonnée les températures des points de fusion des éléments X et Y ainsi que tous les points de début et de fin de fusion des alliages formés par X-Y suivant leur pourcentage.

3.3.2.1. Point eutectique

En joignant tous les points obtenus, nous constatons que les deux courbes de liquides se rejoignent en un point **C** appelé:

point eutectique.

Ce mot dérive du grec, et signifie « fondant bien ».

La température de l'alliage eutectique est constante pour le passage de l'état solide à l'état liquide ou inversement du liquide au solide, elle est inférieure au point de fusion des deux métaux.

Remarque

La masse, appelée mélange eutectique, est constituée par un enchevêtrement de cristaux très petits de chacun des deux éléments.

3.3.2.2. Alliages inférieurs ou supérieurs à l'eutectique

Le mélange solide obtenu n'est pas homogène, les deux métaux ne sont pas miscibles à l'état solide. Dans la partie inférieure, il y aura des cristaux de Y et un mélange eutectique. Dans la partie supérieure, il y aura des cristaux de X et un mélange eutectique.

Alliages

Plomb-étain, plomb-cadmium, plomb-antimoine, étain-cadmium, béryllium-silicium, etc.

Alliage donnant lieu à la formation d'un mélange eutectique

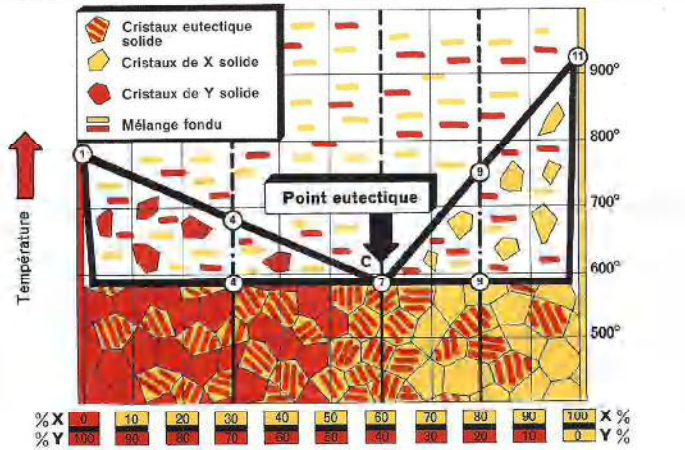
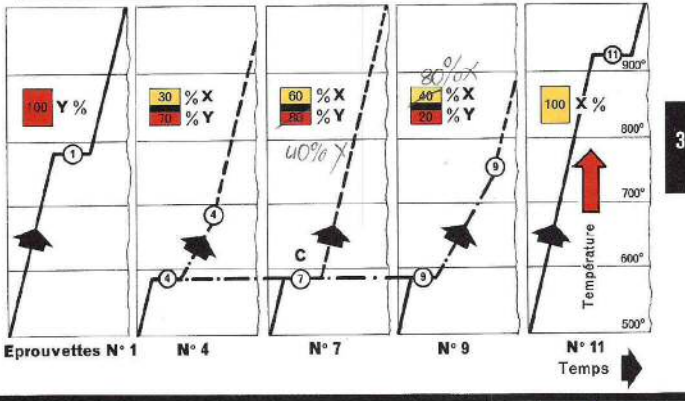


Fig. 3-4

3. 4. Diagramme fer-carbone

(fig. 3-5)

Principe

Le diagramme est formé en abscisse:
 - à gauche 100% de ferrite (le fer pur);
 - à droite 100% de cémentite (le carbure de fer), combinaison chimique de fer et de carbone, dont la molécule est Fe₃C;
 - en ordonnée la température.

Remarque

Pratiquement, il est important de connaître la teneur en carbone d'un tel alliage, c'est la raison de l'introduction de l'échelle du carbone.
 Poids atomique du fer 55,84.
 Poids atomique du carbone 12.
 Poids atomique de la molécule de Fe₃C = 55,84 · 3 + 12 = 179,52 pour 12 de carbone.
 Pour 100% de cémentite pur il y a : $\frac{12}{179,52} \cdot 100 = 6,67\%$ de carbone.

3. 4. 1. Etude du diagramme

Pour étudier d'une manière logique le diagramme fer-carbone, il est nécessaire de distinguer:

1. Nous avons affaire à un système binaire avec l'existence de deux diagrammes d'équilibre suivant l'influence de la vitesse de refroidissement:

A. **Diagramme métastable** (traits pleins)
 Refroidissement assez rapide, le carbone se trouve à l'état de carbure de fer ou cémentite. **Fontes blanches.** (Les éléments tels que le Mn ou le Cr favorisent la formation de la cémentite.)

B. **Diagramme stable** (en pointillés)
 Refroidissement lent, le carbone se trouve à l'état de graphite.

L'alliage ne subit aucune modification sous l'action de la chaleur. **Fontes grises.**

(Les éléments tels que le Si, Al, jouent le rôle de catalyseurs, ils favorisent la formation d'un équilibre stable.)

2. Une zone liquide, au-dessus du **Liquides.**

Une zone solide, au-dessus du **Solides.**

Deux zones de transformation de liquide en solide ou de solide en liquide, selon le sens de variation de la température (état pâteux).

3. **Point eutectique C** = Lédéburite. Point de formation bien déterminé pour:

4,3% de carbone à 1145° C. Cette température constante est inférieure au point de fusion du métal le plus fusible.

Passage de l'état liquide homogène au solide à deux composants distincts: **Austénite + Cémentite**

4. **Point eutectoïde** (Perlite). Même propriété que l'eutectique mais se forme à partir de **corps solidifiés** à:

721° C pour 0,83% de carbone. L'austénite, dont le carbone est intimement mélangé au fer γ à l'intérieur même du cristal, se transforme par

perte de chaleur en un agrégat. **Chaque grain sera composé par juxtaposition de réseaux de cristaux de fer α et de réseaux de carbure de fer (cémentite).**

Transformations allotropiques de fer γ en fer α à température constante.

5. **768° C point de Curie.** Perte du magnétisme du fer α .

6. **210° C.** Perte du magnétisme de la cémentite.

APPELLATIONS	% de carbone	COMPOSITIONS
Les aciers hypoeutectoïdes	0% à 0,83%	Grains de ferrite + grains de perlite
Les aciers eutectoïdes	0,83%	Grains de perlite
Les aciers hypereutectoïdes	0,83% à 1,7%	Grains de perlite + ce la cémentite, formant un réseau autour des grains
Les fontes hypoeutectiques	1,7% à 4,3%	Perlites + cémentite + lédéburite
Les fontes eutectiques	4,3%	Les deux constituants présents, perlite et cémentite, sont juxtaposés et forment une matrice homogène.
Les fontes hypereutectiques	4,3% à 6,67%	Lédéburite + cémentite.

3

au lieu de cet état solide on trouve dans la cémentite Fe₃C, carbone dissous dans le fer gamma. Ce qui aggrave le fait de cémentite en fines lamelles formant une structure homogène.

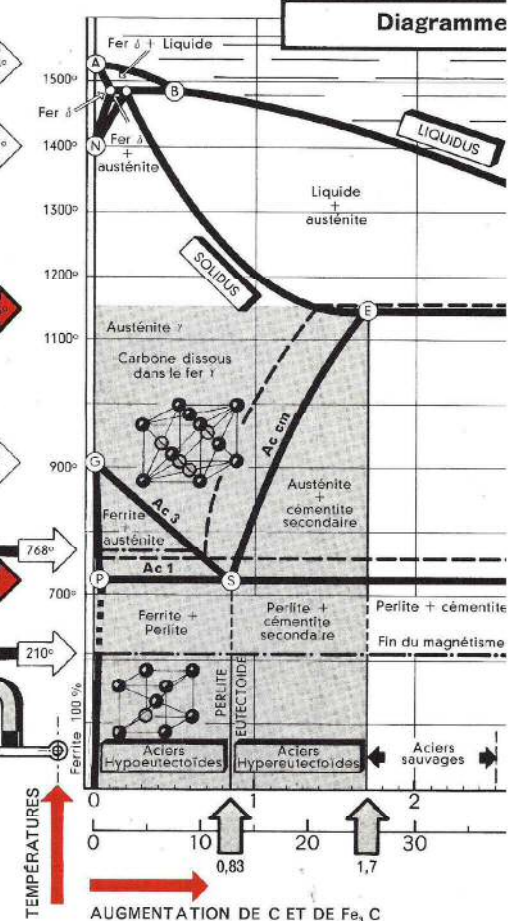
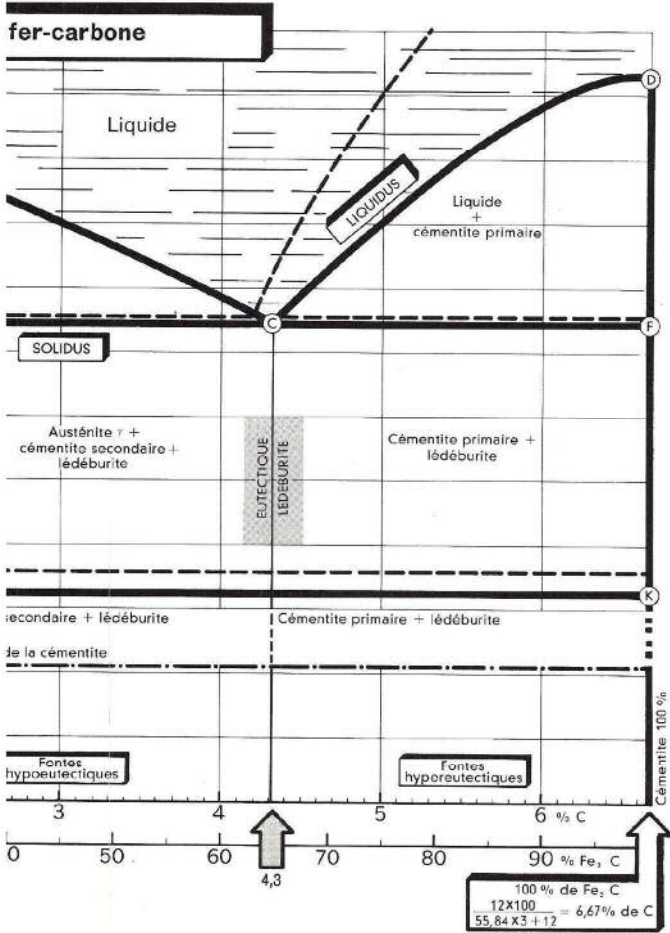


Fig. 3-5



43