

Alliages binaires

Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs matériaux différents et possède des propriétés mécaniques meilleures que celles de chacun de ses constituants. Alliant la légèreté à d'excellentes caractéristiques mécaniques, ce sont des produits d'élection de l'industrie aérospatiale.

Un **alliage binaire** est un composé formé d'un métal et d'un deuxième élément qui peut être un autre métal ou un élément tel que le carbone.

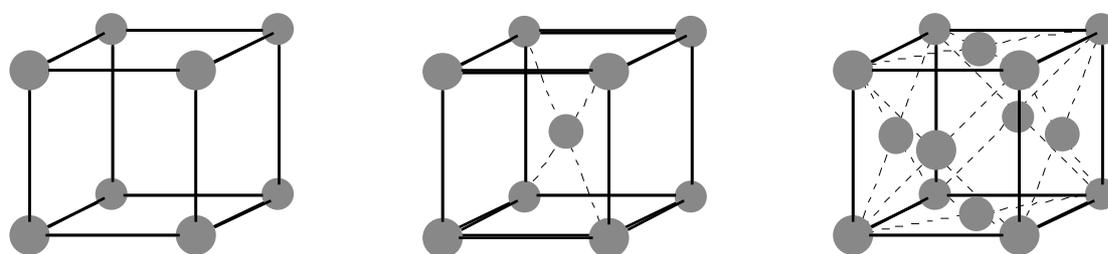
1 Définitions

1.1 Métaux purs

En métallurgie, un métal est pur lorsqu'il est présent à au moins 99% dans le composé.

Les métaux ont une structure cristalline. Les atomes, régulièrement répartis, forment un **réseau** qui reproduit dans l'espace le même motif élémentaire, la **maille**.

Les principaux métaux cristallisent dans le **système cubique**. On trouve aussi la **maille cubique centrée** ou la **maille cubique à face centrée**.



1.2 Structure microscopique des métaux purs

La micrographie ne montre qu'un seul type de grains.

1.3 Structure microscopique des alliages

La micrographie et l'analyse chimique permettent de distinguer différents grains : il y a plusieurs constituants.

Certains alliages montrent une structure uniforme. Ce sont des **alliages homogènes**, ils ne possèdent qu'une seule **phase**.

D'autres alliages comportent plusieurs phases. Ce sont des **alliages hétérogènes**.

1.4 Nature des alliages homogènes

On distingue :

- les **solutions solides** : les deux éléments se dissolvent l'un dans l'autre.
- les **combinaisons chimiquement définies (CCD)** : ce sont des combinaisons chimiques de deux éléments, donc des corps purs. Ils sont représentés par une formule chimique (ex. la cémentite Fe_3C).

1.5 Nature des alliages hétérogènes

Ils sont des juxtapositions de différentes phases pouvant être : des métaux purs, des solutions solides et des combinaisons chimiquement définies.

2 Analyse thermique des alliages

2.1 Définition

L'**analyse thermique** consiste à relever en fonction du temps, l'évolution de la température θ d'un produit. L'alliage, chauffé jusqu'à l'état liquide, se refroidit lentement, sous la pression atmosphérique.

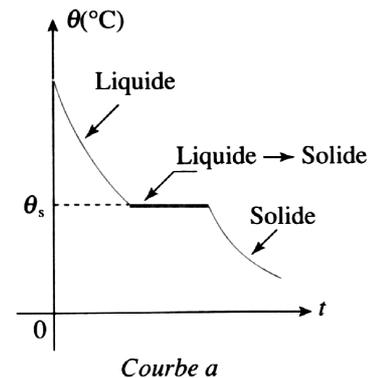
2.2 Courbes de refroidissement des alliages binaires

• **Courbe a: solidification à température constante.**

Pendant toute la durée de la solidification, la température reste égale à θ_s et l'analyse chimique montre que le solide qui se dépose et le liquide conservent la même composition.

Trois cas se présentent :

- s'il s'agit d'un **métal pur** (100% de M,) ce palier est normal, car un corps pur fond et se solidifie à température constante.
- si c'est un alliage homogène, c'est une **combinaison chimiquement définie (CCD)**;
- si l'alliage est hétérogène, c'est un mélange particulier appelé: **eutectique**.

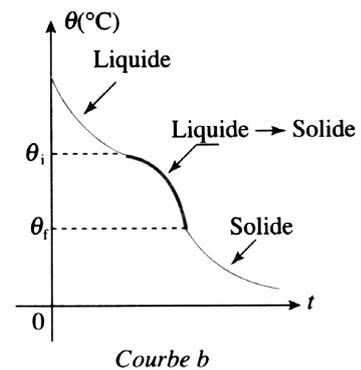


• **Courbe b: solidification à température variable.**

Le premier cristal apparaît à la température θ_1 et la dernière goutte de liquide disparaît à la température θ_p .

Pendant cette solidification, l'analyse chimique montre que les compositions, différentes, du liquide et du solide varient : l'alliage est un mélange.

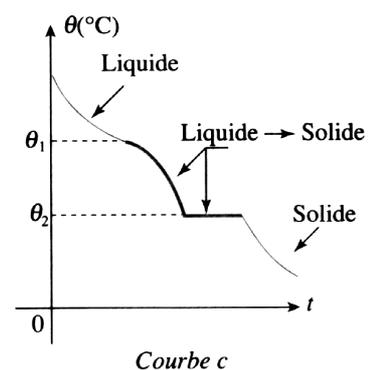
Il s'agit d'une **solution solide**.



• **Courbe c: solidification en deux parties (superposition des courbes a et b).**

Grâce à la micrographie, on constate que, de θ_1 , à θ_2 , il se dépose un **solide homogène** (métal pur, CCD ou solution solide); à la température θ_2 constante, le solide devient **hétérogène**, par formation d'un **eutectique**.

Il s'agit d'un **alliage hétérogène**.



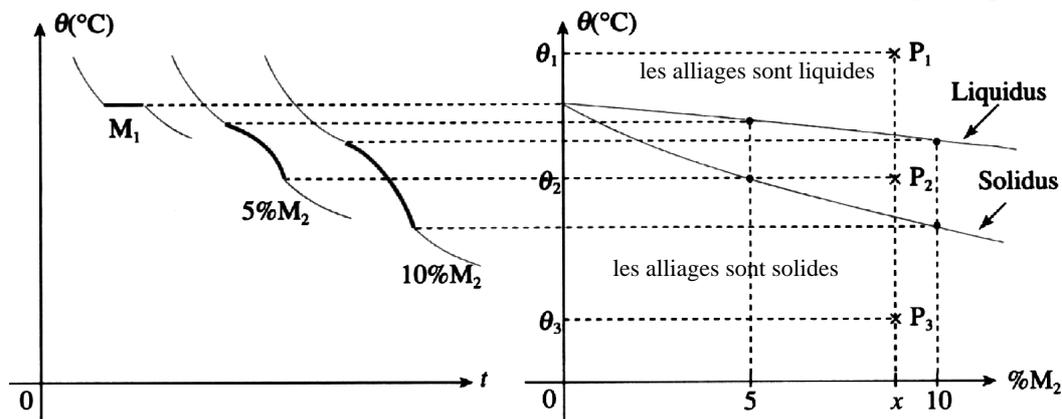
Remarque : les transformations qui accompagnent le refroidissement d'un alliage sont mises en évidence par l'analyse thermique complétée par l'analyse chimique et l'examen micrographique.

3 Diagrammes de solidification des alliages binaires

3.1 Construction du diagramme

Avec les deux composés M_1 et M_2 (dont l'un au moins est un métal) on forme des alliages de composition variable. On réalise leur analyse thermique et l'on reporte, en fonction de leur composition centésimale en masse, les températures de début et de fin de solidification :

- les températures de début forment une courbe appelée **liquidus** ;
- les températures de fin forment une courbe appelée **solidus** ;
- l'ensemble constitue le **diagramme de solidification** des alliages M_1 et M_2 .



Entre les deux courbes, les alliages sont en cours de solidification.

L'intérêt de ces diagrammes est de connaître la composition d'un alliage

3.2 Diagramme à solution solide unique : Or-Argent

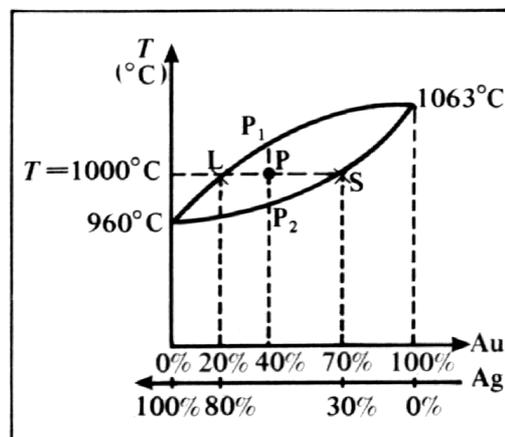
Considérons l'alliage représenté par le point P composé de 40% d'or et 60% d'argent. C'est un alliage dit **une solution solide à 40% d'or**.

Règle de l'horizontale

A 1000°C l'alliage est composé d'une phase liquide à 20% d'or (donc 80% d'argent) et d'une phase solide à 70% d'or (donc 30% d'argent).

Règle des segments inverses

A 1000°C le point P correspond à un alliage de $PS/LS=30/50=60\%$ de liquide et $LP/LS=20/50=40\%$ de solide.

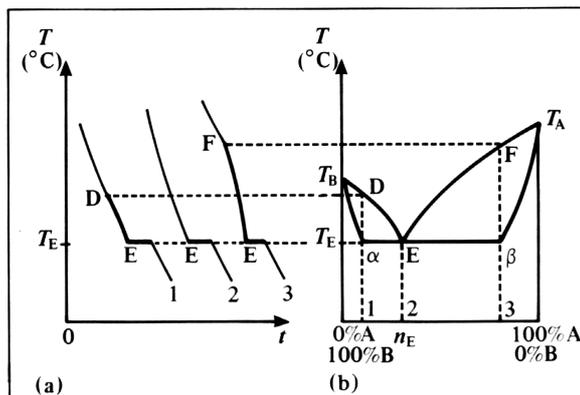


3.3 Diagramme à deux solutions solides

3.3.1 Principe de construction

Le point E correspond à un alliage hétérogène eutectique.

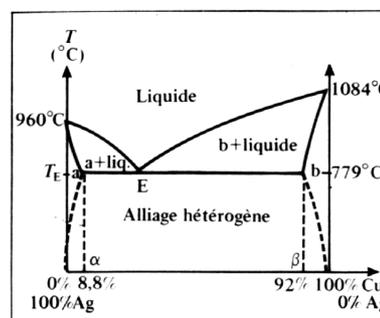
Rappel : un alliage eutectique se solidifie à température constante.



3.3.2 Interprétation - diagramme cuivre-argent

Ces deux métaux ont des rayons atomiques différents (cuivre: 0,255 nm, argent: 0,288 nm).

Ils sont solubles l'un dans l'autre, à l'état solide, mais dans des proportions limitées (zones a et b du diagramme). A 780°C, l'argent dissout au maximum 8,8 % de cuivre (**solution solide α**) et le cuivre 8 % d'argent (**solution solide β**). Au-dessous du palier eutectique, l'alliage est hétérogène (non-miscibilité des solutions solides α et β).

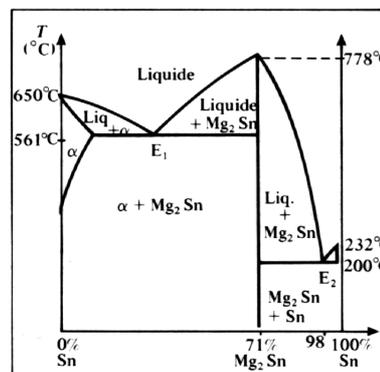


3.4 Présence d'un composé défini (CCD) - diagramme magnésium-étain

Outre la présence de deux points eutectiques nous notons le comportement particulier d'un alliage à 71% d'étain: il se solidifie à température constante et ne subit pas de transformation à l'état solide. Cet alliage correspond à un **composé chimiquement défini (CCD)**. Il peut être représenté par la formule chimique Mg₂Sn. Ce composé fond à 778 °C, température plus élevée que les températures de fusion du magnésium et de l'étain.

Ce diagramme est divisé en deux parties par ce composé défini :

- les alliages dont la teneur en étain est inférieure à 71% sont des alliages hétérogènes formés de solution solide α et de composé défini Mg₂Sn ;
- les alliages dont la teneur en étain est supérieure à 71% sont des alliages hétérogènes formés de composé défini Mg₂Sn et d'étain.



4 Etude du diagramme simplifié fer-carbone

Le diagramme s'applique à des alliages binaires à faible teneur en carbone.

Selon la vitesse de refroidissement et la présence d'éléments chimiques étrangers, on distingue deux diagramme :

- le **diagramme fer-graphite** ou **diagramme d'équilibre stable**, caractérisé par la présence de carbone libre C, correspond aux **fontes grises** ;
- le **diagramme fer-cémentite** ou **diagramme d'équilibre métastable**, caractérisé par la présence de cémentite Fe_3C , correspond aux **aciers** et aux **fontes blanches**.

4.1 Diagramme fer-cémentite

1. Lignes du diagramme

Liquidus: AE, EC.

Solidus: AB, BD, CD.

Lignes de transformations: QS, BS, QP, PR, PO.

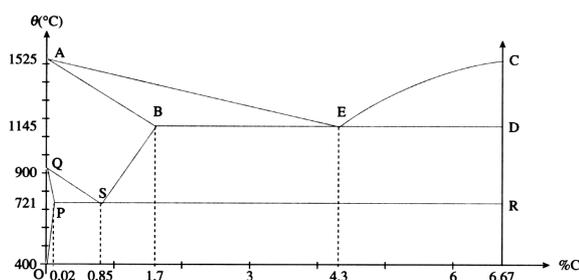
2. Points particuliers

Q: transformation allotropique du fer.

C: combinaison chimiquement définie (cémentite Fe_3C).

E: eutectique appelé lédéburite.

S: eutectoïde appelé perlite.



3. Domaines et phases

Au-dessus du liquidus AEC: alliages liquides (phase liquide).

Domaine ABE: liquide + solution solide du carbone dans le fer appelée austénite.

Domaine ECD: liquide + cémentite.

Domaine ABSQ: austénite.

Domaine QPO: solution solide du carbone dans le fer α appelée ferrite; ce domaine très limité, est parfois négligé.

Domaine QSP: austénite + ferrite.

Domaine BDRS: mélanges hétérogènes d'austénite et de cémentite.

Domaine OPR 6,67%: mélanges hétérogènes de ferrite et de cémentite.

4. Composition de la lédéburite à 1145° C

L'eutectique est un alliage hétérogène, mélange de deux phases: de l'austénite à 1,7% de carbone (point B) et de la cémentite à 6,67% de C (point D).

5. Composition de la perlite à 721° C

L'eutectoïde est aussi un alliage hétérogène, dont les phases sont: de la ferrite à 0,02% de C (point P) et de la cémentite (point R).

6. Aciers et fontes blanches

On appelle aciers les matériaux titrant moins de 1,7% de carbone, et fontes blanches ceux dont la teneur est plus élevée. Remarquons qu'à la température ambiante, les aciers et les fontes blanches sont des alliages hétérogènes, mélanges de ferrite et de cémentite.

7. Constituants des aciers à la température ambiante

La nature des constituants dépend de la teneur en carbone; on distingue:

$C < 0,85\%$: aciers hypoeutectoïdes, constitués de ferrite et de perlite;

$C = 0,85\%$: acier eutectoïde, constitué de perlite;

$C > 0,85\%$: aciers hypereutectoïdes, constitués de cémentite et de perlite.

Les caractéristiques mécaniques des aciers dépendent de la nature et des proportions des constituants.

8. Constituants des fontes blanches à la température ambiante

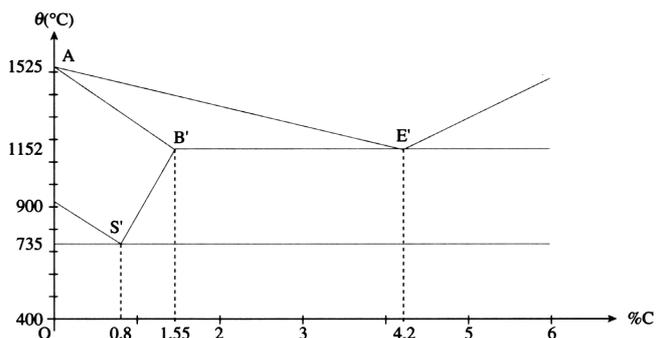
Selon la teneur en carbone, on distingue:

$C < 4,3\%$: fontes hypoeutectiques, constituées de lédéburite et de perlite;

$C = 4,3\%$: fonte eutectique, constituée de lédéburite;

$C > 4,3\%$: fontes hypereutectiques, constituées de lédéburite et de cémentite.

4.2 Diagramme fer-graphite



Le diagramme d'équilibre stable correspond au refroidissement des fontes grises, produits titrant au moins 2% de carbone.

Ce diagramme ressemble beaucoup au précédent, les coordonnées des points particuliers étant voisines. Cependant la verticale du solidus correspondant à la cémentite (à 6,67% de carbone) n'existant plus, le diagramme se poursuit jusqu'au carbone pur: dans l'analyse précédente, il suffit donc de remplacer le terme cémentite par graphite, mais l'étude se limite aux faibles teneurs en carbone.

4.3 Remarque

En réalité, les phénomènes sont plus complexes que ceux que nous venons d'évoquer; citons, par exemple:

- pendant le refroidissement, le carbone devient moins soluble dans le fer γ (ligne BS), puis l'austénite se transforme en S en perlite: la composition de la lédéburite évolue ;
- les lignes des deux diagrammes étant différentes, pendant le refroidissement on pourra passer du diagramme fer-graphite au diagramme fer-cémentite, et obtenir finalement un mélange de fontes grise et blanche.

Notre étude ne constitue donc qu'une approche de ces diagrammes.

4.4 Quelques caractéristiques

A titre indicatif, nous donnons quelques caractéristiques remarquables d'alliages particuliers du diagramme fer-carbone:

- la résistance à la traction de la perlite est supérieure à celle de la ferrite, alors que pour la cémentite, corps très fragile, ce paramètre n'est pas mesurable ;
- la ferrite supporte un allongement 5 fois plus important que la perlite. La cémentite ne s'allonge pas ;
- la cémentite est dix fois plus dure que la ferrite et 3,5 fois plus dure que la perlite (dureté Brinell).

5 Vocabulaire

métaux pur
 alliage binaire
 réseau
 maille
 maille cubique, centrée, à faces centrées
 alliage homogène
 phase

alliage hétérogène
 solution solide
 combinaison chimiquement définie (CCD)
 eutectique
 liquidus
 solidus
 diagramme de solidification

De nombreux schémas et certains commentaires sont issus de :

- Terminale génie mécanique – Delva, Leclercq, Trannoy - éd. Hachette
- Terminale génie mécanique – Mérat, Moreau – éd. Nathan