

Chapitre VI : Les Traitements Thermiques

Pourquoi étudier le traitement thermique des alliages métalliques ?

Il est important de se rendre compte que les procédés de traitements thermiques permettent de produire des alliages ayant les propriétés mécaniques exigées par certains types d'applications. En outre, il est essentiels de bien comprendre les mécanismes et les effets de ces procédés, ainsi que le rôle de la température et la durée, notamment parce que les propriétés d'un alliage qui a déjà subi un traitement thermique peuvent être modifiées par un chauffage ultérieur (au cour d'une opération de soudage, par exemple).

6.1. Introduction

Dans l'industrie métallurgique, les traitements thermiques des alliages sont monnaie courante. C'est pourquoi, dans le présent chapitre, nous étudierons en détails plusieurs de ces traitements, notamment les recuits, le traitement thermique de trempe des aciers et le durcissement structural (revenu).

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

a) D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

b) De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

c) De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subi une déformation plastique à froid (emboutissage).

6.2. Le recuit

Le recuit est un traitement qui consiste en premier lieu à mettre une pièce à une température élevée, entre 450° et 1100° . La température est déterminée selon les résultats recherchés. En second lieu, il consiste à garder la pièce chauffée à la température pendant un certain temps, puis à la refroidir convenablement pour obtenir le résultat escompté. Habituellement, on se sert du recuit pour obtenir au moins l'un des résultats suivants :

- Eliminer les contraintes résiduelles ;
- Diminuer la dureté ;
- Améliorer la ductilité et la ténacité ;
- Produire une microstructure particulière.

Il existe plusieurs types de recuits. On les caractérise par les transformations qu'ils engendrent et qui modifient les propriétés mécaniques. Dans la plupart des cas, ces transformations sont de nature microstructurale. Tous les recuits comportent trois étapes :

- Chauffage jusqu'à obtention de la température désirée;
- Maintien de cette température pendant le temps d'incubation nécessaire;
- Refroidissement, habituellement à la température ambiante.

Le temps est un facteur important dans les opérations de recuit. Au cours du chauffage et du refroidissement, il existe des gradients de température entre l'extérieur et l'intérieur de la pièce traitée, dont la grandeur dépend des dimensions et de la géométrie de la pièce. Les variations de température trop rapides peuvent engendrer des gradients de température et des contraintes internes susceptibles de donner lieu à des gondolements ou même à des fissures. En outre, le temps consacré au recuit doit être suffisamment long pour que toutes les réactions de transformations puissent se produire. La température de recuit est également un facteur important. Dans bien des cas, on peut accélérer le recuit en augmentant la température, puisque cela met en jeu certains mécanismes de diffusion

6.2.1. Recuit de recristallisation

Le recuit de recristallisation est un traitement thermique servant à atténuer ou à éliminer les effets de l'écrouissage. Autrement dit, il permet d'adoucir un métal préalablement durci par déformation et d'accroître sa ductilité. Dans certains procédés de fabrication, on utilise couramment ce traitement pour préparer les matériaux à subir des déformations plastiques importantes. On réduit ainsi les risques de déchirure et la quantité d'énergie nécessaire au formage. Au cours de la recristallisation, des processus de réagencement peuvent se produire. On cherche généralement à obtenir une microstructure à grains fin; c'est pourquoi on interrompt le traitement thermique avant toute croissance appréciable des grains. On peut empêcher ou atténuer l'oxydation de surface ou le décapement en procédant au recuit dans une atmosphère non oxydante ou à une température relativement basse (mais plus élevée que la température de recristallisation)

6.2.2. Recuit de détente

Les pièces de métal peuvent comporter des contraintes résiduelles internes résultant :

- De processus de déformation plastique tels que l'usinage et le meulage ;
- De leur refroidissement non uniforme consécutif ou à une coulée effectués à haute température ;
- D'une transformation de phase issue du refroidissement lors de laquelle les phases initiale et résultante ne sont pas de même densité.

Pour éliminer les contraintes résiduelles, qui pourraient produire des distorsions et des gondolement, on peut effectuer un recuit de détente. Ce traitement thermique consiste à chauffer une pièce assez long-temps pour que toutes ses parties soient portées à une même température prédéfinie, puis à la laisser refroidir dans l'air à la température ambiante. En général, la température d'un recuit de détente est relativement basse, de sorte que les propriétés résultant de l'écrouissage ou d'autres traitements thermiques ne sont pas modifiées

6.2.3. Recuit des alliages à base de fer

Plusieurs types de recuits permettent d'améliorer les propriétés des aciers. Cependant, avant de les étudier, penchons-nous sur la dénomination des limites de phase dans le diagramme d'équilibre. **La figure 1** présente la partie du diagramme d'équilibre fer-carbone de fer dans laquelle se produit la transformation eutectoïde. Il est d'usage de désigner par A_1 la ligne horizontale à la température eutectoïde qui correspond à la température limite inférieure de cette transformation, c'est-à-dire la température au dessous de laquelle, dans des conditions d'équilibre, toute l'austénite s'est transformée en ferrite et en cémentite. Les limites de phases désignées par A_3 et A_m représentent respectivement la courbe de la température limite supérieure des aciers hypo- eutectoïdes et celle des aciers hyper-eutectoïdes

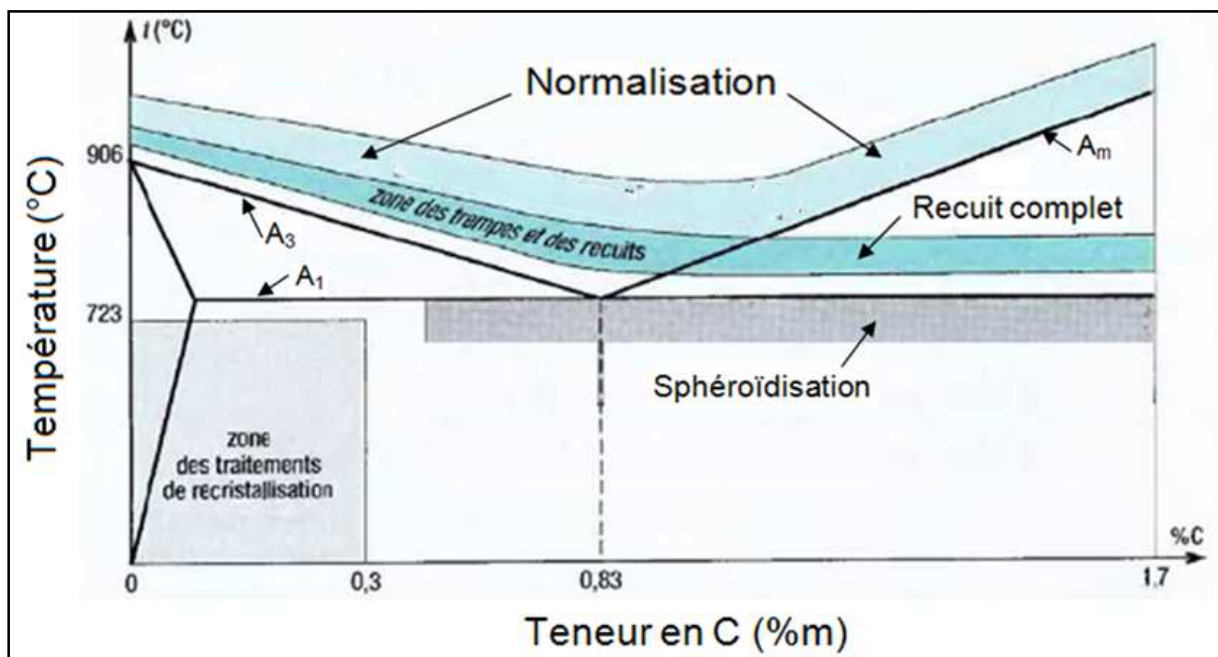


Figure 1: Diagramme fer-carbone au voisinage du point eutectoïde
(Ce diagramme indique les plages de température relatives aux traitements thermiques des aciers au carbone ordinaire).

A) Recuit de normalisation

Les aciers qui ont subi une déformation plastique, notamment par laminage, sont constitués de grains de perlite (et vraisemblablement d'une phase pro-eutectoïde) dont la forme est irrégulière et dont la taille, relativement grande, est très variable. Le recuit de normalisation permet d'obtenir des grains de perlite plus fins ayant une taille plus uniforme. Les aciers perlitiques à grains fins sont plus tenaces que ceux à gros grains. La normalisation commence par un chauffage à une température dépassant d'environ 55°C à 85°C la température limite supérieure, laquelle dépend bien sûr de la composition, comme l'indique la Figure 1. On maintient cette température assez longtemps pour que l'alliage se transforme entièrement en austénite par un processus appelé austénisation- puis on procède à un refroidissement dans l'air.

B) Recuit complet

On a souvent recours à un recuit pour traiter les aciers à faible ou à moyenne teneur en carbone qui sont destinés à l'usinage ou qui devront subir des déformations plastiques importantes au cours d'une opération de formage. Comme l'indique la **figure 1**, l'alliage est d'abord porté à une température dépassant de 15°C à 40°C les températures limites A_3 ou A_1 et y est maintenu jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Ensuite on laisse l'alliage dans le four éteint. Ainsi, la température du four et celle de l'alliage diminuent au même rythme, la température ambiante étant atteinte après plusieurs heures. Ce type de recuit produit une perlite grossière (en plus d'une phase pro-eutectoïde) relativement douce et ductile.

C) Recuit de sphéroïdisation

Les aciers à forte ou à moyenne teneur en carbone peuvent être trop durs pour qu'il soit aisé de les usiner ou de les déformer, même lorsque leur microstructure renferme de la perlite grossière. Les aciers sphéroïdisés sont très doux et très ductile; ils sont donc faciles à usiner ou à déformer. Le traitement thermique qu'on appelle recuit de sphéroïdisation consiste à chauffer l'alliage à une température légèrement inférieure au point eutectoïde (la ligne A_1 dans la figure 1), soit à environ 700°C dans le domaine de $\alpha + Fe_3C$ du diagramme d'équilibre. Si la microstructure d'origine contient de la perlite, la sphéroïdisation dure de 15 à 25 heures: au cours de cette période, la coalescence du Fe_3C produit des particules sphéroïdales (Fig.2)

Figure 2: Micrographie d'un acier doté d'une microstructure de sphéroïdale.



6.3. Traitement thermique des aciers (Trempe)

En général, les procédés de traitement thermique traditionnellement utilisés pour produire un acier martensitique à partir d'un acier austénitisé comportent une étape de refroidissement rapide et ininterrompu dans un milieu de trempe (eau, huile, air). Les propriétés optimales d'un acier trempé et durci ne peuvent être obtenues que si ce refroidissement est suffisamment rapide pour que la majeure partie de l'austénite se transforme en martensite. Si le refroidissement n'est pas assez rapide, on ne pourra pas obtenir la meilleure combinaison de caractéristiques mécaniques possibles à cause de la formation de perlite ou de bainite. Cependant, il est impossible de refroidir uniformément toutes les parties d'une pièce métallique; la surface refroidit toujours plus vite que l'intérieur. Ainsi, la transformation martensitique se produit sur une certaine plage de température et donne lieu à des variations de microstructure et de propriétés en fonction de l'emplacement au sein d'une pièce.

Pour réussir le traitement thermique d'une pièce, c'est-à-dire pour obtenir une pièce dont la microstructure est essentiellement martensitique dans toutes ses parties, il faut tenir compte de trois facteurs principaux: 1) la composition de l'alliage; 2) les caractéristiques du milieu de trempe; 3) la taille et la forme de la pièce.

6.3.1. Trempabilité

On appelle trempabilité la capacité d'un acier de composition donnée à se transformer en martensite dans des conditions de refroidissement données. Chaque acier se caractérise par un rapport précis entre ses propriétés mécaniques et la vitesse de refroidissement. Il ne faut pas confondre dureté et trempabilité. La dureté désigne la résistance à la pénétration. La trempabilité est plutôt une mesure qualitative de la diminution de la dureté d'une pièce en fonction de l'augmentation de la distance sous sa surface, en raison d'une teneur martensitique moindre. Un acier de grande trempabilité durcit non seulement en surface mais aussi à l'intérieur dans son ensemble.

A) Essai Jominy

On évalue couramment la trempabilité des aciers au moyen d'une méthode normalisée qu'on appelle Essai Jominy. Cette méthode fixe tous les paramètres qui influent sur la profondeur de trempe (condition de refroidissement, taille et forme de l'échantillon), à l'exception de la composition de l'alliage. Pour effectuer un essai Jominy, on utilise une éprouvette cylindrique de 25.4 mm de diamètre et 100 mm de longueur. Après une austénisation dont la durée et la température sont prédéfinies, on sort l'éprouvette du four et on la monte rapidement sur un appareil (**Fig.3a**). L'extrémité inférieure de l'éprouvette est alors refroidie par un jet d'eau dont la température et le débit sont précisément déterminés. De cette façon, la vitesse de refroidissement est maximale à l'extrémité trempée et diminue graduellement à mesure qu'on s'en éloigne. Lorsque l'échantillon est à la température ambiante, on

meule un plat d'une profondeur de 0,4 mm (Fig.3b). Sur les premiers 50,8 mm de l'éprouvette, on mesure la dureté Rockwell tous les 1,6 mm sur une distance de 12,8 mm, puis tous les 3,2 mm sur les 38 mm restants. Ces mesures servent ensuite à tracer une courbe de trempabilité, qui indique la dureté en fonction de la distance par rapport à l'extrémité trempée

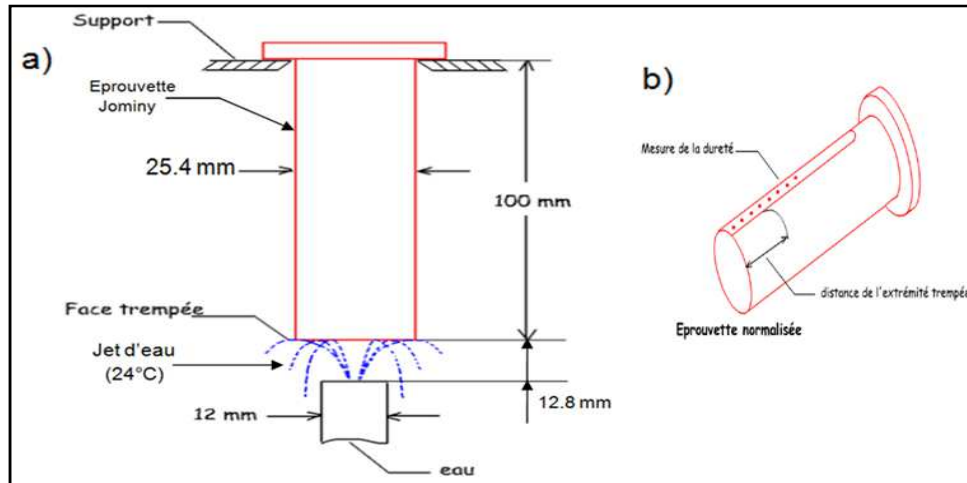


Figure 3: Représentation schématique de l'essai Jominy

B) Courbes de trempabilité

Ayant refroidi plus rapidement, l'extrémité trempée présente la dureté maximale, qui correspond à une teneur en martensite de 100% dans la plupart des aciers. A mesure que la distance à l'extrémité augmente, la vitesse de refroidissement diminue et la dureté décroît, comme l'indique **la figure 4**, parce que la transformation de l'austénite dure plus longtemps, ce qui permet une plus grande diffusion du carbone et la formation d'une grande proportion de perlite fine (qui peut mêlée de bainite et de martensite). Pour les aciers à forte trempabilité, la dureté mesurée demeure élevée jusqu'à une distance relativement grande de l'extrémité contrairement aux aciers à faible trempabilité.

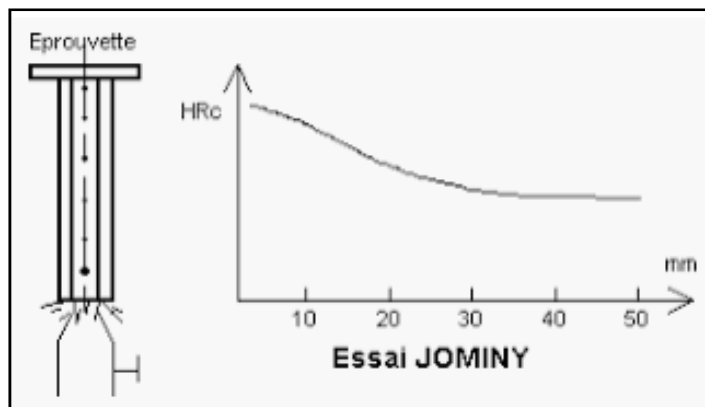


Figure 4: Exemple de courbe de trempabilité

6.3.2. Milieux de trempe, taille et géométrie des pièces trempées

On emploie souvent l'expression sévérité de trempe pour désigner la vitesse de refroidissement : plus le refroidissement est rapide, plus la trempe est sévère. Par ordre décroissant de sévérité de trempe, les trois milieux de trempe les plus couramment utilisés sont l'eau, l'huile et l'air. Le degré d'agitation du milieu de trempe influe aussi sur le taux de dissipation de la chaleur. En augmentant la vitesse d'écoulement du milieu de trempe sur la surface de la pièce traitée, on accroît la sévérité de trempe. Les trempes à l'huile conviennent au traitement thermique de nombreux aciers alliés. En fait, pour les aciers à forte teneur en carbone, les trempes à l'eau sont trop sévères et peuvent causer des fissures et des gondolements. Pour les aciers au carbone ordinaires qui ont été austénisés, les trempes à l'air produisent une microstructure presque entièrement perlitique.

Puisque c'est à la surface de la pièce que l'énergie thermique se dissipe dans le milieu de trempe, la vitesse de refroidissement dépend également de la forme de la pièce, ou plus précisément du rapport entre sa surface et sa masse. Plus ce rapport est grand, plus le refroidissement est rapide et plus la trempe est profonde.

6.4. Durcissement structural (revenu)

La résistance et la dureté de certains alliages métalliques peuvent être améliorées par une série de traitements thermiques qui provoquent la formation de très fines particules d'une deuxième phase, réparties uniformément dans la matrice initiale. Cette série de traitements constitue un processus nommé durcissement structural, et les fines particules qui en résultent sont appelées précipités. En outre, la résistance des alliages qui ont subi un durcissement par vieillissement. Voici quelques alliages dont la dureté peut être accrue par durcissement structural : Aluminium-Cuivre, Cuivre-Béryllium, Cuivre-Etain et magnésium-aluminium, ainsi que certains alliages ferreux.

Le durcissement structural résulte de la précipitation d'une nouvelle phase. Pour simplifier les choses, nous utilisons le diagramme d'un système binaire hypothétique A-B (**Fig.5**). Dans le diagramme d'équilibre d'un tel alliage, il faut que deux données essentielles soient représentées:

- 1) La solubilité maximale (à l'équilibre) du composant B dans le composant principal A. qui doit être de l'ordre de quelques pour cent ;
- 2) La limite de solubilité de B dans A, qui doit diminuer rapidement à mesure que la température baisse.

La solubilité maximale est indiquée par le point *M*, et la limite des domaines de solubilité des phases α et $\alpha+\beta$, qui correspond à la courbe qui va du point *M* au point *N*, passe rapidement de la concentration maximale à une concentration très faible de B dans A.

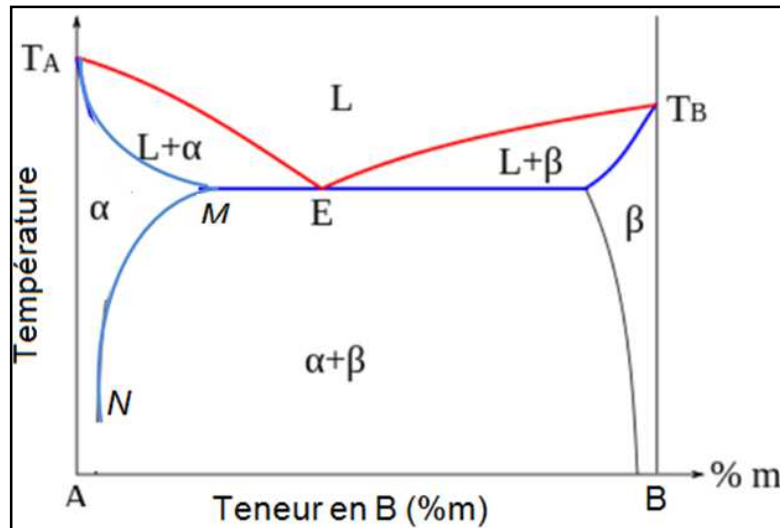


Figure 5 : diagramme d'équilibre hypothétique

Le durcissement structural se réalise à l'aide de deux traitements thermiques :
 Le premier consiste en une ***mise en solution*** de tous les atomes de l'élément d'addition. Il en résulte une solution solide constituée d'une seule phase. La mise en solution consiste à chauffer l'alliage jusqu'à une température T_0 située dans le domaine de la phase α et à maintenir cette température jusqu'à ce que la phase β soit entièrement dissoute. Le deuxième traitement thermique consiste à chauffer la solution solide sursaturée α jusqu'à une température intermédiaire T_2 du domaine biphasé $\alpha+\beta$. Ce traitement est appelé ***vieillissement***, ou ***vieillissement*** accéléré (Fig.6).

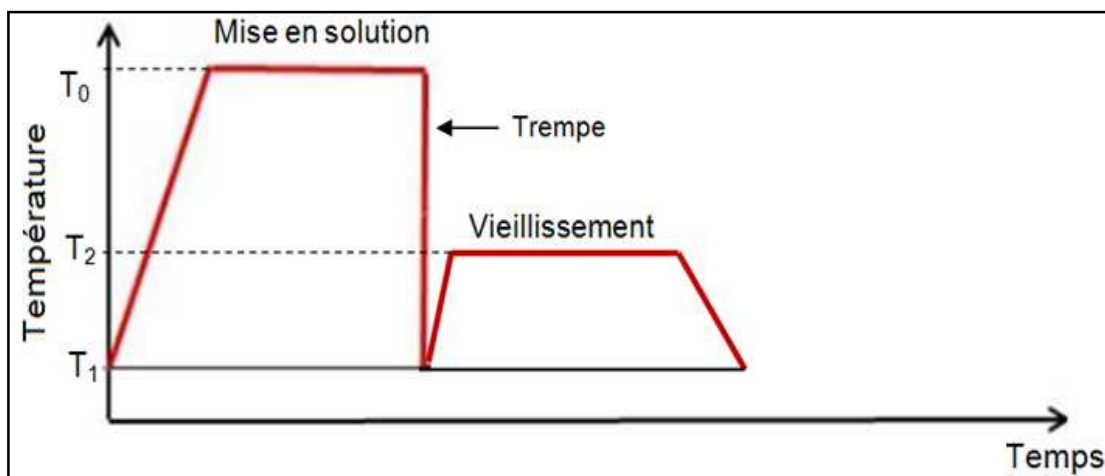


Figure 6: Graphique indiquant la variation de la température au cours du durcissement structural par mise en solution et vieillissement

Résumé

Dans ce chapitre, nous avons décrit des traitements thermiques qui servent à modifier les propriétés mécaniques des alliages. On appelle recuit un traitement qui consiste à porter un matériau à une température élevée durant une période assez longue avant de le laisser refroidir lentement à température ambiante. Il existe plusieurs types de recuit.

Dans le cas des aciers très résistants, on obtient la meilleure combinaison lorsqu'une microstructure martensitique se développe dans tout le volume de la pièce durant la trempe qui suit le traitement thermique. La trempabilité mesure la capacité d'un alliage à base de fer à se transformer en martensite à partir d'une température dépassant sa température limite supérieure et dans des conditions de refroidissement données. On évalue la trempabilité en effectuant un essai Jominy, une méthode normalisée dont les résultats peuvent être représentés par une courbe de trempabilité.

La résistance de certains alliages peut être améliorée par le durcissement structural, un processus qui provoque la formation de très fines particules de seconde phase, appelées précipités. On contrôle la taille de ces particules, et par la suite la résistance, par deux traitements thermiques.