

V. AMELIORATION DES PROPRIETES MECANIQUE DES MATERIAUX METALLIQUES PAR TRAITEMENTS THERMIQUES DANS LA MASSE

Les traitements thermiques se divisent en deux grandes catégories principales :

-les traitements thermiques de base nécessaires pour améliorer l'homogénéisation de la structure et rechercher l'état d'équilibre ; il s'agit d'opérations effectuées sur pièces ou lingots bruts de coulée (recuits).

- les traitements thermiques orientés vers les applications pour créer des structures le plus souvent hors d'équilibre et qui permettent d'améliorer la résistance à la déformation, au choc, à l'usure, à la corrosion (trempes et revenus). Pour cette deuxième catégorie le traitement peut être général lorsqu'il est appliqué à toute la pièce, locale ou partielle lorsqu'il concerne une partie de la pièce, généralement la surface mais ce dernier sera développé au chapitre suivant.

Nous avons déjà vu par l'étude du diagramme d'équilibre Fe-C que des transformations en phase solide pouvaient avoir lieu et plus explicitement la transformation de la phase γ (austénite). Mais le diagramme Fe-C reste en ce sens très limité car il ne traduit que les transformations pouvant se faire pour des refroidissements continus à vitesses lentes (recuits).

Mais que se passerait-il si on refroidissait rapidement un acier jusqu'à une température T telle que $M_s < T < A_{c1}$, et qu'on le maintenait à cette température ?

Et si on déviait des conditions d'équilibre en refroidissant un acier d'une manière continue à des vitesses élevées et différentes, quelle serait à chaque fois la microstructure de l'acier et les propriétés mécaniques correspondantes ?

A ces questions importantes aussi bien sur le plan fondamental (compréhension des cinétiques de transformation) que celui de l'ingénierie des matériaux (sélection des propriétés désirées par la sélection du traitement thermique approprié), des courbes expérimentales ont été établies : les courbes TIT et TRC

A. LES COURBES TTT

Nous avons pu d'après le diagramme d'équilibre Fer-Carbone suivre l'évolution de la structure de différents aciers au carbone avec la température, la vitesse de refroidissement étant très lente ; la transformation eutectoïde (transformation perlitique) est la plus importante. Cette transformation peut avoir lieu dans d'autres conditions notamment par maintien de l'acier à température constante pendant des durées plus ou moins longues. Cette température sera inférieure à la température de l'eutectoïde (727°C). Le traitement correspondant consistera à rendre l'acier austénitique par un maintien dans le domaine, puis de le porter rapidement dans un bain à température constante. L'acier est alors maintenu pendant des durées différentes à différentes températures, puis observé pour identifier les phases formées ainsi que le taux d'austénite transformée. Tous les résultats sont reportés sur un diagramme température $\log_{10}t$ (température de transformation, temps, domaine de chaque phase). Les courbes TTT les plus simples se présentent en général comme représenté figure V-1.

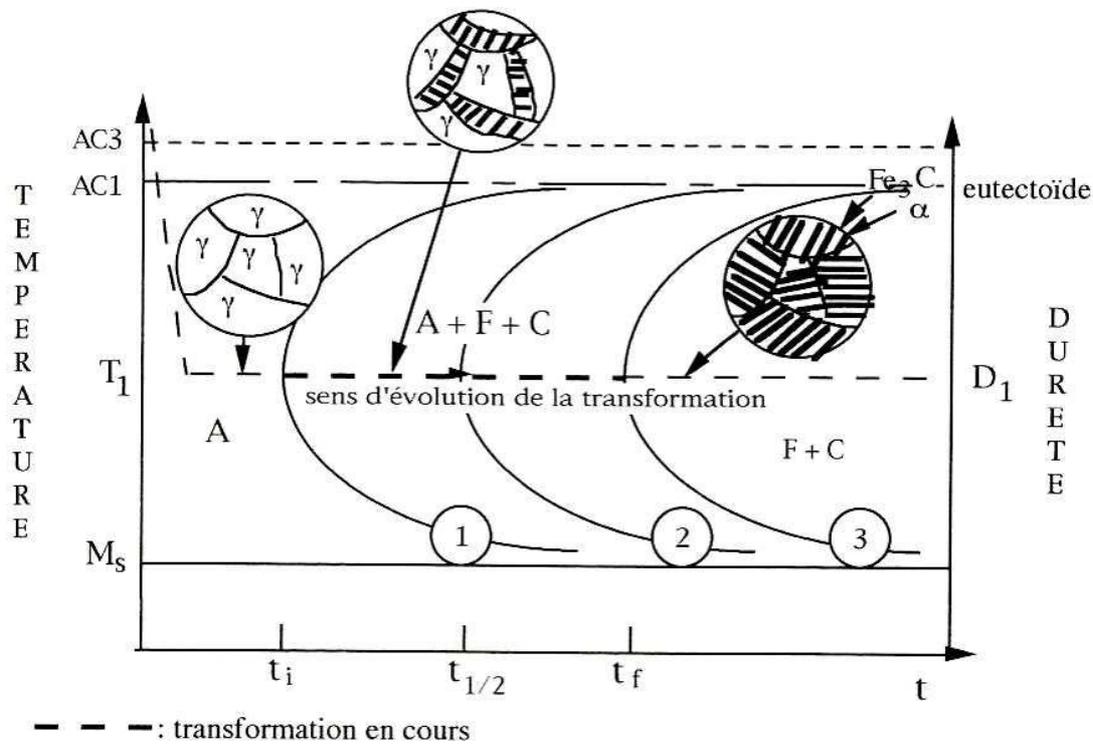


Figure V-1 : Courbe TTT pour un acier eutectoïde

a) Comment lire une courbe TIT :

- * Les courbes TIT sont lues horizontalement de manière à suivre l'évolution de la transformation en fonction du temps.
- * Les différentes phases de l'acier sont notées comme suit :

A : austénite
 F : ferrite
 C : cémentite
 M : martensite

Quand il est noté (FOC), le composé correspondant peut être la perlite ou bainite. La bainite existe pour les basses températures et la perlite pour les températures plus élevées

- 1) : courbe de début de transformation
- (2) : transformation de 50% de l'austénite
- (3) : courbe de fin de transformation

* Les courbes TTT sont limitées dans leur partie supérieure par la température de l'eutectoïde et dans leur partie inférieure par le point Ms. En dessous de ce point le maintien isotherme, d'aussi longue durée qu'il soit, ne fait pas évoluer la transformation martensitique puisque celle-ci est indépendante du temps et ne peut se poursuivre si $dT/dt=0$.

Exemple de suivie de la courbe TTT (figure V-1), pour la température T_r

à t_i : la transformation débute par la formation de ferrite + cémentite à partir de l'austénite. Dans ce cas F+C est la perlite

à $t_{1/2}$: 50% de l'austénite s'est transformée en (F+C)

à t_f : la totalité de l'austénite s'est transformée en perlite

•La verticale limitant à droite le diagramme TTT indique la dureté de la structure finale après un maintien de 24h, les courbes TIT n'étant pas définies en général pour des durées de maintien plus élevées.

En eutectique donc eutectique = $\text{Liq}_{\text{res}} = c$) à $T = T_E - \varepsilon \alpha_{\text{total}} = \frac{m\alpha}{m_{\text{total}}} = \frac{PN}{M_{\text{AN}}}$

* Mécanisme des transformations isothermes : Aux températures élevées (proche de la température d'austénitisation), la tendance à la transformation $A \rightarrow F+C$ est faible puisque le domaine de l'austénite est proche, en effet l'austénite est d'autant plus stable qu'on s'approche de son domaine d'existence.

Au fur et à mesure que la température de maintien isotherme diminue, la tendance à la transformation de l'austénite augmente, mais la diffusion devient plus difficile, la structure résultante est donc de moins en moins proche de l'équilibre. Pour une température suffisamment basse (M_s), la transformation se fait dès que le métal atteint

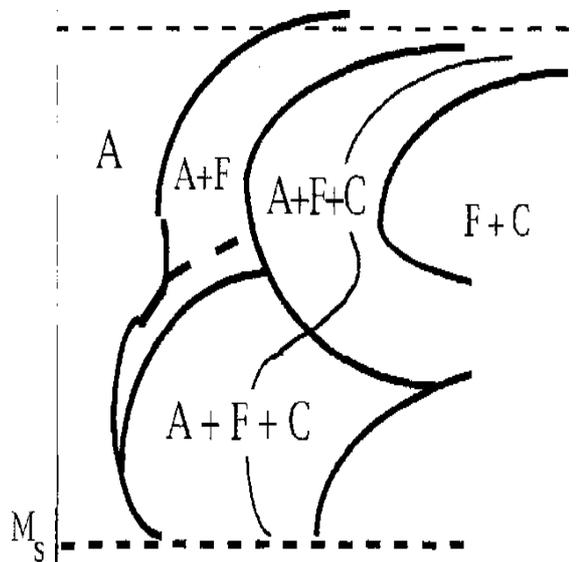
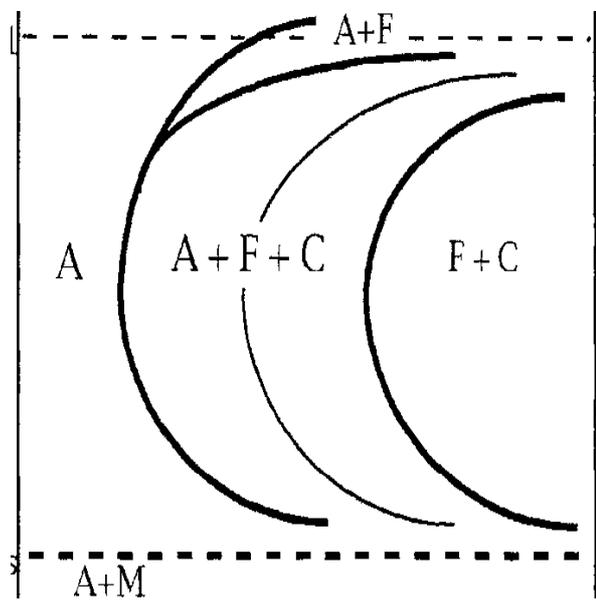
Cette température. Il n'y a pas de diffusion, le carbone reste emprisonné dans le réseau : la martensite est formée.

* *Remarques :*

1) Plus la température de maintien est basse et plus la perlite obtenue est fine.

2) Le type de diagramme TIT présenté est le plus simple. On trouve dans certains diagrammes d'acier des domaines d'existence de la ferrite seule, ainsi qu'une différenciation nette entre les domaines de la perlite et de la bainite (figure V-2).

Figure V-2 : Diagrammes TTT (a) d'aciers au carbone (b) d'aciers alliés



b) Les facteurs influençant la courbe TTT :

- La température d'austénitisation : Avant de procéder à la transformation isotherme, on part d'une structure à 100% austénitique ; à cet effet l'acier est maintenu à une température supérieure à AC_3 (température de début de transformation de l'austénite). Les conditions d'austénitisation seront donc la température et le temps d'austénitisation (T_a et t_a) Ces conditions doivent être spécifiées avant tout traitement isotherme car elles définissent l'état de l'acier avant ces traitements. En effet un temps et une température d'austénitisation plus élevés engendrent une austénite à plus gros grains, donc plus stable ; le domaine de l'austénite sera plus étendu et donc la courbe décalée vers la droite. - Les éléments d'alliage : Les éléments gammagènes (Mn, Ni, Cu, N et C) stabilisent l'austénite, leur action est donc de décaler la courbe vers la droite. Les éléments alfa gènes (Cr, Mo, W, V, Ti, Nb) décalent la courbe vers la droite et modifient sa forme car ils ont tendance à former des carbures qui retardent la transformation de l'austénite et favorisent certaines transformations plutôt que d'autres (la transformation bainitique, par exemple).

B. LES COURBES TRC :

Il est possible de connaître à partir des courbes de transformation isothermes la stabilité d'un acier à l'état austénitique dans les différents domaines de température. Cependant les cycles thermiques que subissent généralement les pièces industrielles ne correspondent pas à des transformations isothermes. En effet, dans la majorité des cas les pièces subissent des traitements à refroidissement continu. C'est les courbes TRC (**Transformation à Refroidissement Continu**) qu'il faut alors considérer.

Ces courbes permettent de déterminer pour différentes conditions de refroidissement, allant de refroidissement très rapides à des refroidissements très lents, la nature des constituants formés lors de ces refroidissements, les températures de transformation et la dureté de la structure à l'ambiante. Comme pour les transformations isothermes, l'alliage est préalablement austénisé.

Les courbes sont tracées suivant une échelle semi-logarithmique. Des courbes de refroidissement correspondant à des lois de refroidissement différentes sont tracées (figure V-3). Le point d'origine de ces courbes sur l'axe des températures est la température d'austénitisation.

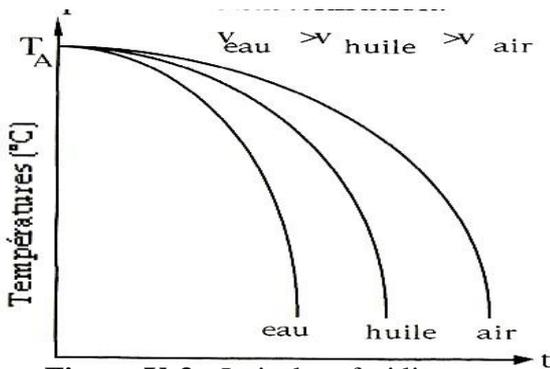


Figure V-3 : Lois de refroidissement correspondant à des milieux différents de pièces, dans un même milieu de refroidissement

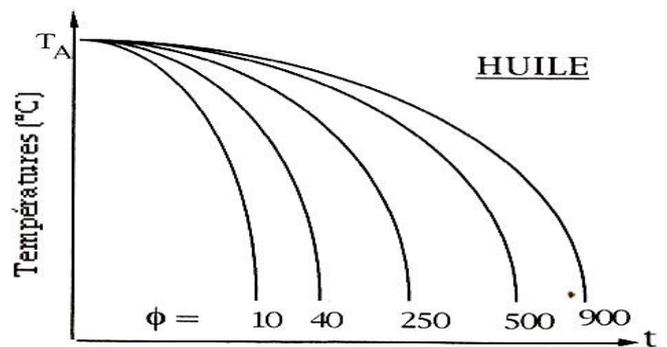


Figure V-4 : Lois de refroidissement correspondant à des différents diamètres

(K_3 %) et de la bainite (K'_3 %), de la martensite et de l'austénite résiduelle. D_3 est la dureté de la structure à la suite de ce traitement.

Remarque : Quand une courbe de refroidissement traverse le domaine de la bainite, on commence à avoir une structure hors d'équilibre. L'austénite n'est dans ce cas jamais transformée à 100%; il reste donc à la fin de la transformation de l'austénite qui est dite résiduelle.

* **vitesse v_2 :** La courbe de refroidissement coupe le domaine de la bainite à T'_1 . A cette température débute la transformation bainitique qui s'arrête à T'_2 . A cette même température, l'austénite qui reste se transforme en partie en martensite, il restera donc de l'austénite à la température ambiante. La structure finale sera : bainite (% : K_2) + (martensite + austénite résiduelle) (% = $100-K_2$). La dureté de cette structure sera D_2 .

* **vitesse v_1 :** La courbe ne coupe pas le domaine de la bainite, la seule transformation qui a lieu est la transformation martensitique qui débute à M_s . La structure finale contiendra : martensite+austénite résiduelle, sa dureté est D_3 . Si M_{50} est supérieur à la température ambiante, on aura dans la structure finale plus de 50% de martensite. La quantité de martensite sera d'autant plus importante que M_s est grande.

b) Facteurs influençant la courbe TRC :

1- La température et le temps d'austénitisation :

Plus ils sont élevés, plus l'austénite sera stable. La courbe sera décalée vers la droite et on aura à l'ambiante un taux plus élevé d'austénite résiduelle.

2- La composition chimique :

Les éléments gammagènes élargissent le domaine de l'austénite ils décalent donc la courbe vers la droite. Les éléments alfa gènes décalent aussi la courbe vers la droite, de plus ils favorisent la transformation bainitique pour laquelle ils font apparaître le domaine distinctement du domaine perlitique. Le seul élément qui décale les courbes TRC à gauche est le cobalt.

c) Détermination des vitesses critiques :

A partir de la courbe TRC il nous est possible de définir les différents traitements thermiques ainsi que leurs buts.

Nous remarquons d'après cette courbe qu'il existe une vitesse limite au delà de laquelle la structure obtenue est uniquement de la martensite (à gauche du diagramme), et une autre vitesse en deçà de laquelle la structure obtenue est une structure d'équilibre (à droite). Ces vitesses sont appelées respectivement vitesse critique de trempe (V_{CT}) et vitesse critique de recuit (V_{CR}) (figure V-6).

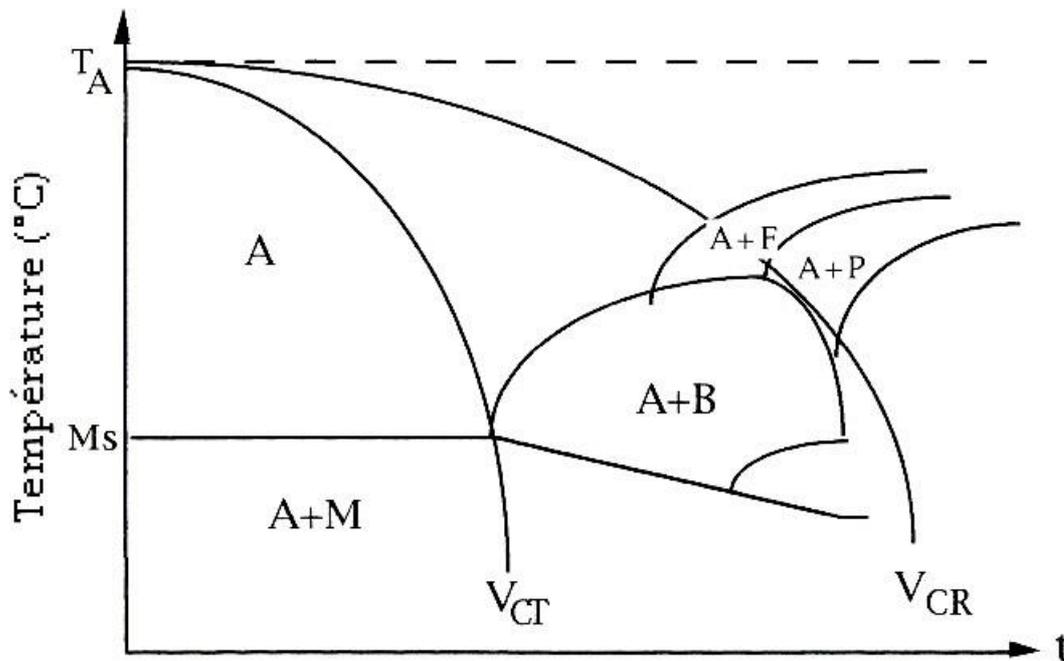


Figure V-6 : Détermination des vitesses critiques de trempe et de recuit

v_{CR} : **vitesse critique de recuit**

$v > v_{CR}$: on obtient des structures hors d'équilibre

$v < v_{CR}$: ferrite+perlite

Lorsque v s'approche de v_{CR} la structure de la perlite devient de plus en plus fine (les

Lamelles se rapprochent, $d < 0,2 \mu m$)

v_{cr} : vitesse critique de trempe Si

$v > v_{CT}$: structure martensitique Si

$v < v_{CT}$: structure mixte

C. LES TRAITEMENTS THERMIQUES D'ÉQUILIBRE

Les traitements traités dans ce paragraphe sont des traitements appliqués pour homogénéiser la structure, améliorer la ductilité, réduire les contraintes internes et/ ou améliorer l'usinabilité des aciers. Ces traitements donnent lieu à des structures d'équilibre et à des distributions différentes de ferrite et cémentite qui conditionneront les propriétés mécaniques. Ces traitements consistent en un chauffage à une certaine

Température (T), un maintien pendant un certain temps (t) et un refroidissement lent pour lequel on définira la vitesse (V_R). Suivant ces 3 paramètres, on définit différents recuits.

Un traitement thermique sera défini à priori comme étant un traitement d'équilibre si V_R est inférieure à la vitesse critique de recuit V_{CR} précédemment définie (fig.V-6).

1. Le recuit (ou recuit complet) "full annealing" :

Il consiste en un chauffage et maintien à une température supérieure à AC_3 (température de début de transformation) ($AC_3+50^\circ C$) puis un refroidissement lent au four. Ce traitement effectué, la structure obtenue est celle d'équilibre à basse dureté et excellente ductilité. Ce traitement est généralement effectué sur des pièces à usiner ou à déformer à froid qui ont déjà subi des traitements thermiques ou mécaniques. La température de recuit ne doit pas être trop élevée sous risque de provoquer un grossissement de grains fragilisant. La vitesse de refroidissement est très lente (refroidissement au four) et la structure résultante est en général $\alpha +$ perlite (ou $Fe_3C +$ perlite) où α est equiaxe et la perlite constituée de lamelles de distance interlamellaire d assez élevée. Une fois la transformation de γ totale, la vitesse peut augmenter sans danger et ceci pour diminuer le temps de recuit et améliorer ainsi la rentabilité.

2. Recuit d'homogénéisation "homogenizing" :

Ce recuit est effectué sur les aciers bruts de coulée afin d'éliminer tous les phénomènes dus à la ségrégation mineure (au niveau du grain) ou majeure (au niveau du lingot); donc d'hétérogénéité chimique. Ce traitement doit donc favoriser la diffusion des atomes, pour ce faire il sera effectué à des températures très élevées mais toujours dans le domaine de l'austénite ($Ac_3+200^\circ C$, entre 1000 et 1200 $^\circ C$) pour des durées prolongées.

3. Recuit de normalisation "normalizing" :

C'est un recuit qui est effectué sur les aciers non alliés et qui permet d'obtenir une structure plus fine (grains fins). La température est supérieure à celle du recuit complet ($Ac_3 + 75^\circ C$), ainsi que la vitesse de refroidissement qui se fait à l'air calme, on a ainsi une perlite fine (faible distance interlamellaire).

4. Recuit de coalescence ou sphéroïdisation "spheroidizing"

Comme nous l'avons déjà vu, la perlite est un composé constitué de α (phase ductile) et de Fe_3C (phase dure). La dureté de ce constituant dépend de l'énergie interfaciale entre α et Fe_3C qui sera d'autant plus importante que la surface de contact entre ces 2 phases est grande. Réduire la dureté et par là même la fragilité consistera à réduire cette surface de contact. L'énergie interfaciale minimale correspond à une répartition de sphères de Fe_3C

Dans une matrice α . D'où la tendance à SPHEROÏDIFIER Fe_3C dans les structures d'aciers où la ténacité est une propriété très importante. C'est la structure la moins dure possible dans les aciers. La sphéroïdisation est particulièrement requise pour les aciers chargés en carbone qui doivent subir un usinage important avant leur durcissement. Elle consiste à maintenir l'acier à des températures proches mais plus faibles qu' AC_1 , pendant des temps assez longs. Plus la perlite de départ est fine, moins le temps de maintien est long.

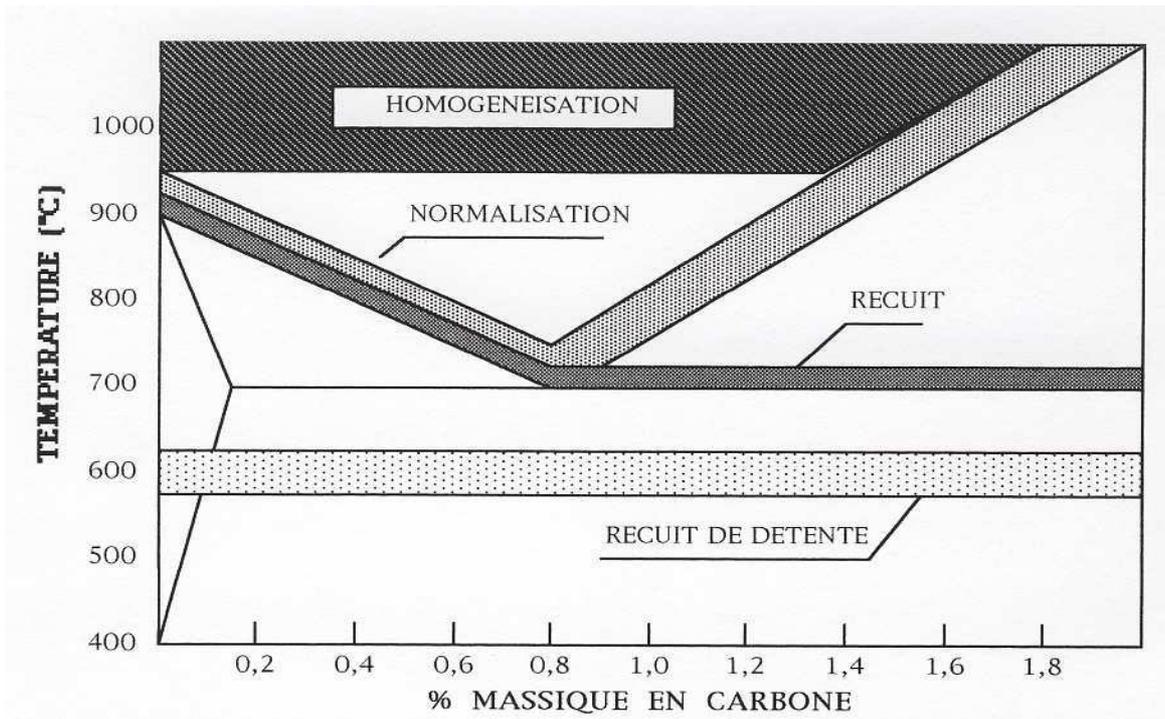


Figure V-7 : Domaines de températures des différents types de recuit

5. Recuit de détente "stress relieving" :

Ce recuit s'effectue à des températures basses, inférieures même à la température de début de transformation (AC_1) : $550 < T < 650^\circ C$. Il est exécuté sur les pièces qui ont subies une déformation plastique sévère (mise en forme, usinage, ...). Le soudage aussi, du fait de la contraction de solidification, provoque des contraintes dans les zones adjacentes au cordon de soudure. Ainsi, pour relâcher ces contraintes, le recuit de détente est effectué. Ce type de recuit peut aussi être effectué entre deux opérations d'usinage ou de mise en forme, soit précéder la trempe une fois l'usinage fini. Le chauffage et le refroidissement doivent être très lents pour ne pas introduire d'autres contraintes. Le recuit de détente ne change pas les propriétés mécaniques d'une manière significative ; il évite, cependant, une rupture prématurée en service ou pendant le traitement thermique.

6. Recuit de recristallisation " recrystallization annealing» :

Pendant la mise en forme par déformation plastique (laminage, forgeage, ...), les grains de la structure vont s'orienter suivant la direction de mise en forme. Ce type de structure n'est généralement pas souhaité (contraintes, anisotropie des propriétés électriques, thermiques et mécaniques, etc...), c'est pourquoi pratique-t-on des traitements de recristallisation à des températures inférieures à AC_1 afin de régénérer des grains équiaxes (sans orientations particulières). Ceci se fait d'abord par l'élimination des défauts cristallins produits par la déformation plastique (étape restauration), puis pour des maintiens plus longs, par la germination et croissance de nouveaux grains non déformés (étape recristallisation).

Si la première étape se fait pour des températures faibles, l'étape de recristallisation proprement dite se fait à des températures entre 1/3 et 1/2 de la température de fusion du matériau. L'étape de restauration affecte peu ou prou les propriétés mécaniques, l'étape de recristallisation, par contre, provoque une chute spectaculaire de la résistance et la dureté et un accroissement notable de la ductilité (fig. V-8).

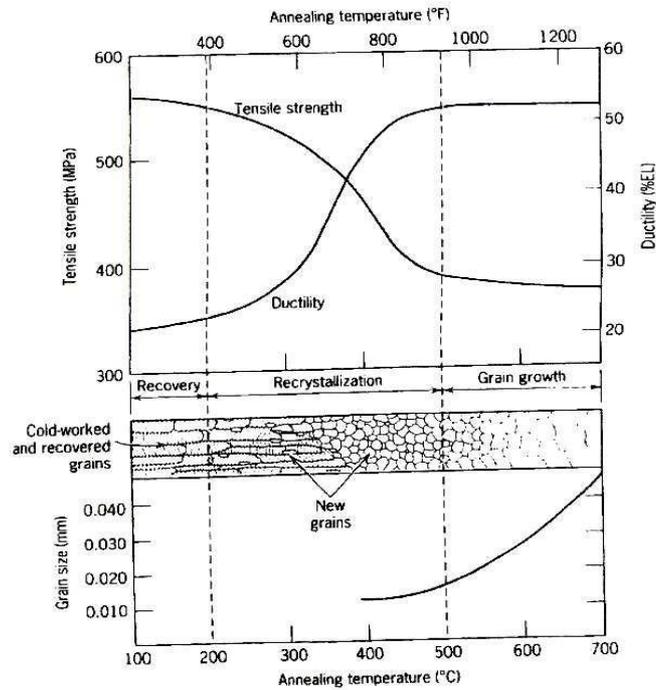


Figure V-8 : Influence de la température de recuit sur la résistance maximale (tensile strength), et la ductilité d'un laiton (Cu-Zn). La taille des grains (grain size) est schématisée et éventuellement indiquée en fonction de la température. Les différents stades sont indiqués : restauration (recovery), recristallisation (recrystallization), croissance des grains (grain growth). (D'après Ref26, p.171)

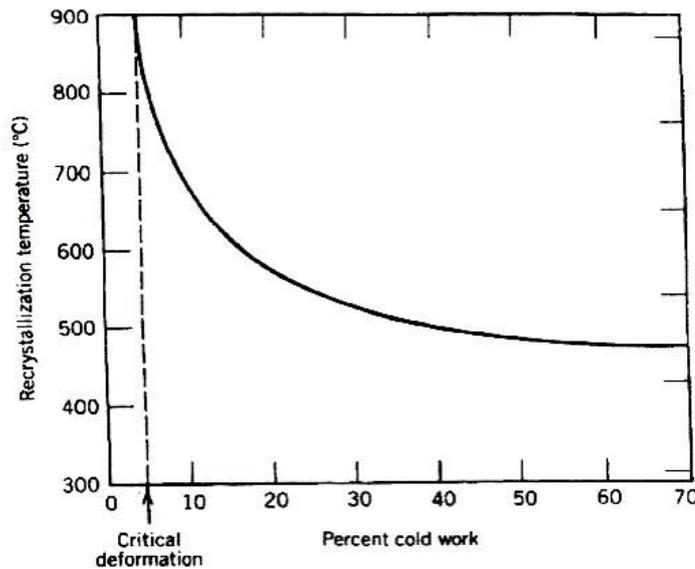


Figure V-9 : Variation de la température de recristallisation en fonction du taux d'écroissage (percent cold work) pour le fer. La recristallisation n'a pas lieu en deçà d'un seuil critique D'écroissage (critical deformation) (d'après Ref26, p.172)