

Si la température de maintien est supérieure à la température de recristallisation, c'est le grossissement de grains qui prend place. La structure résultante est peu dure et très ductile.

Plus le taux d'écroûissage est grand moins la taille des grains régénérés sera importante et plus la température de recristallisation sera basse (fig. V-9)

Les différents recuits qu'on vient de citer sont rarement pratiqués individuellement, le recuit pouvant regrouper le but de plusieurs d'entre eux.

B. LES TRAITEMENTS THERMIQUES "HORS D'ÉQUILIBRE"

1. La trempe

On appelle trempe le refroidissement brutal du matériau préalablement porté à haute température. L'état trempé correspond à un état hors d'équilibre. Jusqu'à des temps relativement approchés, les gens pensaient que la trempe des aciers était liée à l'habileté du forgeron et aux secrets des milieux de refroidissement utilisés, que, d'une certaine manière, elle relevait de la sorcellerie. Aujourd'hui, la trempe n'est plus qu'un traitement classique dans lequel on ne voit plus aucun mystère ... ou presque.

La trempe peut avoir deux objectifs :

-conserver la structure existante à chaud à la température ambiante pour éviter la germination de phases non souhaitées.

-obtenir une phase qui améliore les caractéristiques mécaniques de l'alliage sans changer sa composition.

La température de trempe varie selon la composition, il faut indiquer qu'elle correspond à la température de maintien à haute température avant refroidissement (température d'austénitisation). Elle doit être telle qu'elle fournit la meilleure dureté au matériau :

-Pour les aciers hypoeutectoïdes : $T = A_{C3} + 50$ à 70°C pour éviter la formation de ferrite qui diminue la dureté.

-Pour les aciers hypereutectoïdes : $T = A_{C1} + 50$ à 70°C pour permettre la formation de Cémentite proeutectoïde qui améliore la dureté.

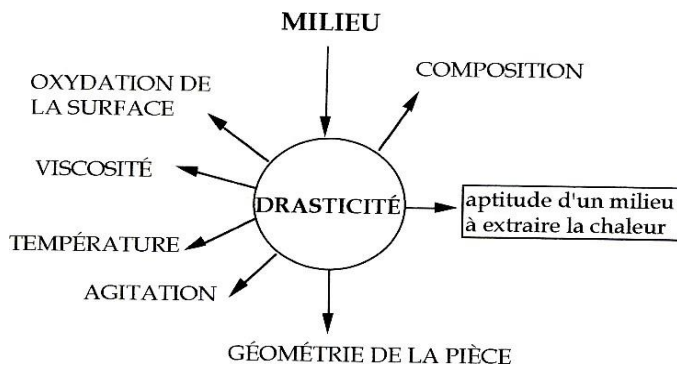
La trempe est un traitement qui, en général, améliore les propriétés de résistance et détériore les propriétés de ductilité.

La température de trempe est un facteur très important pour réussir celle-ci. Une température trop élevée provoque un grossissement de grain qui diminue la dureté et rend la structure susceptible à la fatigue. Elle peut aussi être la cause d'oxydation et de décarburation superficielle.

a) Les milieux de trempe :

La vitesse de trempe va dépendre du milieu de refroidissement ; de celui-ci dépendra la réussite de la trempe.

Un milieu de trempe est caractérisé par son aptitude à extraire la chaleur de la pièce à refroidir ; cette caractéristique est dite **drasticité**. La drasticité d'un milieu est fonction de sa viscosité, sa température, son mouvement (agitation) et sa composition.



Elle peut être traduite de deux manières :

- par la courbe de refroidissement d'une éprouvette définie dans le milieu en question. Cette courbe est utile à tous les points de vue car elle permet de situer les différentes étapes de refroidissement (fig. V-10).

- par le facteur de sévérité de trempe H. Il traduit l'efficacité du milieu, c.à.d. la capacité du milieu de donner pour une barre de diamètre $\langle l \rangle$, un volume à 100% trempé.

Comme l'efficacité de la trempe dépend de la conductivité thermique du métal (λ) et du coefficient d'échange thermique (h) du milieu (qui dépend lui-même de l'agitation du Bain), H est donné par $h/2\lambda$ (mm^{-1}). (Pour les aciers, la conductivité thermique $\lambda = 0,2 \text{ cal/cm.s.}^\circ\text{C}$).

Plus H est élevé et plus le milieu est efficace.

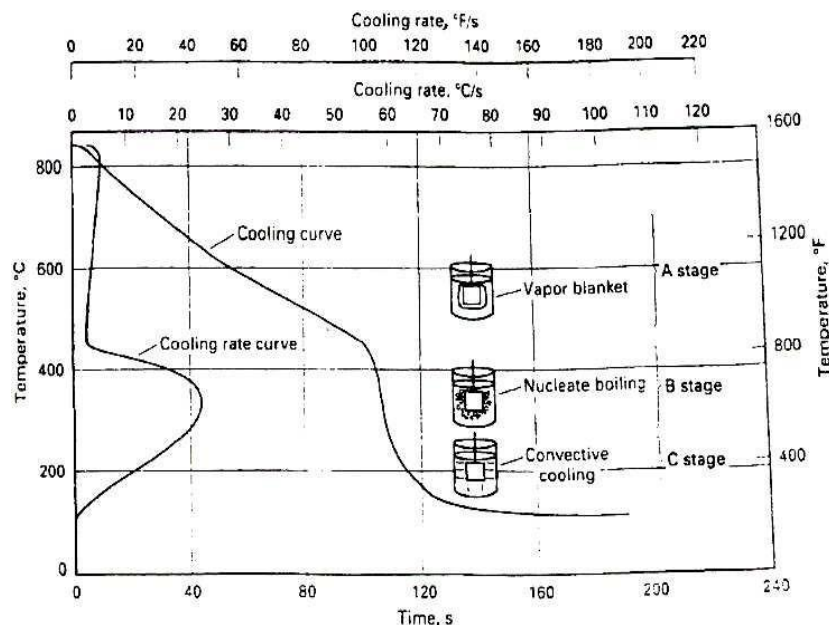


Figure V-10 : Courbe de refroidissement et courbe correspondante de vitesse de refroidissement. Les différentes étapes du refroidissement sont indiquées : évaporation (étape A), ébullition (étape B) et convection (étape C).

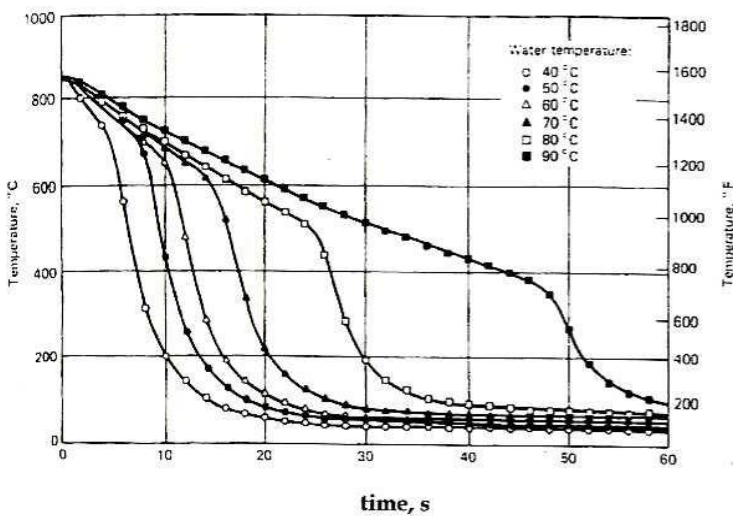
a)

MILIEU <input type="checkbox"/>	Air	Huile	Eau	Eau salée
CIRCULATION				
Pas de circulation	0,02	0,25 -0,3	0,9-1	2
Circulation modérée		0,35-0,4	1,2-1,3	
Bonne circulation		0,4-0,5	1,4-1,5	
Forte circulation	0,05	0,5-0,8	1,6-2	
Circulation violente		0,8-1,1	4	5

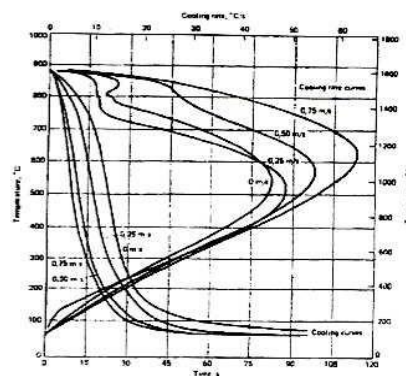
Tableau V-1 : Valeur de H en fonction du milieu de trempe (d'après Ref 1, p.143)

Il apparaît que pour améliorer l'efficacité d'un milieu, différentes précautions sont à prendre :

- La masse du bain de trempe doit être deux fois supérieure à celle de la pièce à tremper pour éviter un échauffement excessif du bain car quand T augmente la drasticité diminue (Fig. V-11a).
- Il faut agiter la pièce dans le bain de trempe au cours du refroidissement pour améliorer l'échange thermique. Cependant, ceci n'est pas recommandé pour les pièces de formes irrégulières qui doivent être manipulées avec cure (fig. V- 11b).
- Prendre en compte la géométrie de la pièce ; en effet, une pièce présentant des épaisseurs différentes ne subira pas un refroidissement homogène, exemple : trempe d'un engrenage (Fig. V-11 c et d)
- Les milieux de trempe doivent satisfaire un certain nombre de conditions : bonne conductibilité, viscosité faible, non inflammable, bonne absorption de la chaleur, volatilité basse.



(a)



(b)

b) La vitesse critique de trempe :

Le but de la trempe étant d'obtenir une meilleure dureté, elle sera d'autant plus efficace qu'il est possible d'avoir une structure martensitique. C'est ainsi qu'on définit une vitesse limite au dessus de laquelle la structure sera exclusivement martensitique. Cette vitesse est appelée vitesse critique de trempe qu'il est possible de déterminer à partir des courbes TRC

(Fig. V-6).

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

Si $v < v_{CT}$: structure mixte

Les aciers dont la vitesse critique de trempe est inférieure à la vitesse de refroidissement à l'air sont dits **auto trempant**, c'est à dire qu'ils sont martensitiques même refroidi à l'air, leur vitesse critique de trempe est inférieure à la vitesse de refroidissement à l'air

(Exple: Z200C12)

Les courbes TRC sont des courbes établies à partir d'éprouvettes creuses et de faible épaisseur. Leur utilisation pour des pièces massives donnera des résultats approximatifs puisque le résultat d'une trempe à la surface d'une pièce en acier n'est pas le même qu'au cœur. On a alors établi des essais qui renseigneraient sur l'évolution de la dureté de la surface d'une pièce massive à son cœur. C'est ainsi qu'ont été introduite la notion de trempabilité et l'essai qui lui correspond.

c) La trempabilité :

La trempabilité d'un acier est son aptitude à former de la martensite dans tout le volume de la pièce trempée ; on appelle aussi cette propriété aptitude à la pénétration de trempe. Lorsqu'on trempe une pièce massive, la surface de la pièce va être refroidie plus vite que le cœur, et au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface la vitesse de refroidissement subie par les différentes parties de la pièce va diminuer. Ainsi, certaines parties vont subir une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse critique de

a) Essai Jominy (normalisé AFNOR A 04-303) :

L'éprouvette est maintenue à la température de trempe pendant 30 mn, puis elle est soumise à sa base à un jet d'eau bien étudié afin qu'il n'éclabousse pas les surfaces latérales

(Durée du jet == 10 mn) (Fig. V-13)

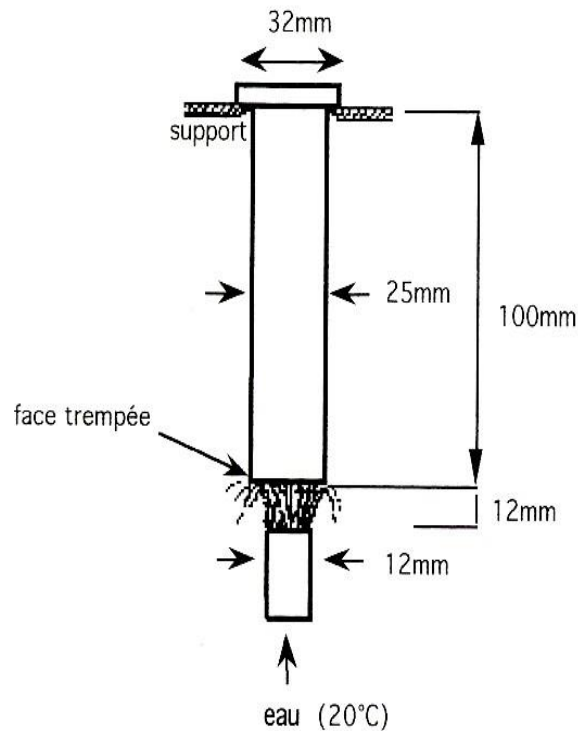


Figure V-13 : Schéma du dispositif de l'essai Jominy (NF- A04 -303)

L'éprouvette Jominy est cylindrique, meulée suivant 2 génératrices pour la mesure de la dureté. La dureté est relevée en différents points des méplats à partir de la base arrosée. On trace ainsi la courbe représentant la dureté en fonction de la distance à la base (fig. V-14).

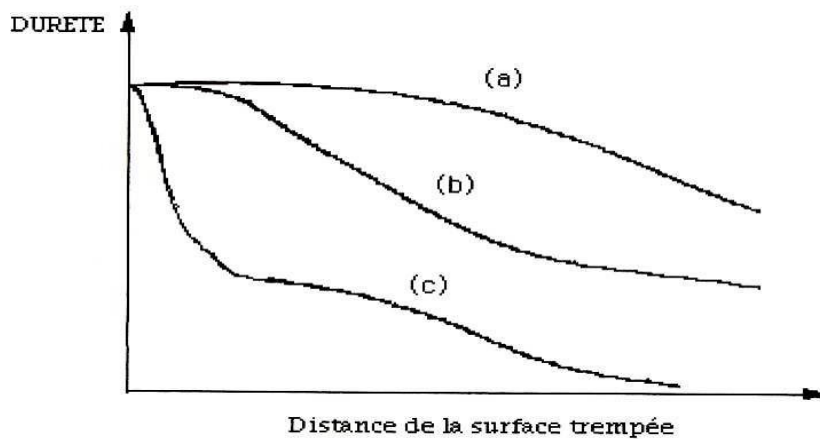


Figure V-14 : Courbes de trempabilité relatives à différents Types d'acier

Les différentes courbes de la figure V-14 expriment 3 comportements différents :

(a) la dureté varie très lentement de la surface arrosée au cœur, le matériau a une bonne trempabilité

(b) la dureté varie plus rapidement, le matériau a une mauvaise trempabilité (c) la dureté varie considérablement de la surface trempée au cœur.

De la surface arrosée jusqu'à l'autre bout de l'éprouvette, la vitesse de refroidissement diminue ; donc chaque partie de l'éprouvette aura une structure différente donnée par la courbe TRC (fig. V-15).

La courbe déduite de l'essai Jominy permet de connaître la variation de dureté transversale d'une pièce de diamètre quelconque (de la surface au cœur) de la manière suivante :

Soit J_x la distance à la surface trempée de l'éprouvette Jominy

e) Les éléments améliorant la trempabilité

Il ne faut pas confondre trempabilité et capacité de durcissement par trempe. Un acier A1 peut avoir après trempe une martensite plus dure qu'un autre acier A2 car il contient plus de carbone. Ceci ne préjuge en aucun cas de sa trempabilité. L'acier A2 peut avoir une meilleure trempabilité s'il contient plus d'éléments d'alliage

Un acier qui a une courbe TIT (ou TRC) dont le nez de la perlite (ou domaine de la bainite) est très proche de l'axe des ordonnées a une faible trempabilité car au cours de la trempe il va se former quelque soit la vitesse de trempe, des composés (perlite, bainite) qui amoindrissent la dureté. Plus la vitesse critique de trempe n'est faible, plus la trempabilité de l'acier est bonne.

Tous les éléments d'alliage (à part le cobalt) décalent vers la droite la courbe TIT (ou TRC), ils vont donc améliorer la trempabilité de l'acier, nous en citons : Cr, Mo, W, Ti, V, Nb, etc ...

2. Le revenu

La trempe confère aux aciers une structure dure mais particulièrement fragile, une telle structure ne peut être mise en service. Ainsi on procède toujours à un traitement après trempe pour remédier aux effets néfastes de celle ci tout en maintenant à un niveau assez élevé les autres propriétés (dureté, ...). Le revenu est le traitement qu'il faut faire subir au matériau afin d'arriver à un compromis (conditions optimales) entre les propriétés de résistance et celles de ductilité. Il consiste à réchauffer le métal à une température inférieure à la température de début de transformation (AC_1 pour les aciers au carbone). Ce réchauffage va éliminer ou atténuer les tensions internes dues à la trempe et causes de fragilité Les caractéristiques de résistance (R_e , R_m , et HB) vont diminuer au cours de revenu alors que la résilience augmente ; la température idéale de revenu serait celle qui correspond au point d'intersection de ces deux caractéristiques. Notons, cependant, que le revenu peut être un traitement qui conduit à l'amélioration simultanée des propriétés de résistance et de ductilité. Mais ceci n'a lieu que dans certains types d'acier qui subissent ce qu'on appelle un "durcissement secondaire" (voir § durcissement par revenu).

a) L'objectif du revenu :

a - Soit supprimer les contraintes de trempe (relâchement); on dit que le matériau a subi un adoucissement

b - Soit ; suivant la composition; former d'autres phases qui ont tendance à améliorer la résistance du matériau, on dit qu'il a subi un durcissement.

b) Les paramètres du revenu :

Pour réussir un revenu un certain nombre de paramètres est à prendre en considération :

(1) Temps de revenu (température fixe) :

Lorsque la durée de revenu augmente, la dureté diminue sensiblement pour les temps courts ; puis au fur et à mesure que la durée augmente, la dureté ne décroît plus et reste sensiblement constante. La diminution ne se fait donc que pour les premiers temps. Ainsi, on définit une durée limite de revenu au delà de laquelle il n'y a plus de variation sensible de la dureté et donc il sera inutile de chauffer au delà de cette durée. La durée de revenu choisie pratiquement est d'une heure. En général, il y a interchangeabilité entre la durée (t) et la température (T) de revenu. Une même dureté peut être obtenue pour une faible température et une longue durée, ou une température élevée et une durée courte. Cette interchangeabilité est donnée par un paramètre dit paramètre de revenu =

$T (20 + \log_e t) \cdot 10^{-3}$. (T : Kelvin, t : heure). Cette formule est à utiliser avec prudence pour les aciers présentant un durcissement secondaire. La durée de revenu généralement adoptée est une heure.

(2) Température de revenu (temps fixe) :

La température de revenu dépend de la nature de l'acier et du but du revenu. Pour les aciers au carbone ou faiblement alliés, la température de revenu se situe entre 200 et 600°C, cependant il existe des matériaux qui subissent des revenus à la température ambiante (20°C), le temps de revenu qui correspond au durcissement (qu'on appelle aussi vieillissement) est d'environ 4 jours. On dit que l'alliage a subi un revenu de durcissement. En effet, pour certains matériaux, le revenu peut faire précipiter des carbures qui vont durcir la structure (voir § "durcissement par revenu" plus loin). Pour les aciers au carbone et de construction (%C : 0,25-0,6), la conséquence du revenu dépend de la température utilisée.

- revenu à basse température (150-200°C) : la ductilité est légèrement améliorée (contraintes résiduelles diminuent), la dureté reste élevée.

- revenu à température intermédiaire (350-500°C) : C'est le domaine des compromis où les propriétés de résistance et ceux de ductilité sont correctes. Il existe un domaine "dangereux" de température de revenu (250-350°C) où la ténacité diminue dangereusement (augmentation de la fragilité). Ce domaine de température est dans la pratique toujours évité (voir § "fragilisation de revenu").

- revenu à haute température : C'est les températures où on a la meilleure résilience, par contre la résistance à la traction et la dureté chutent considérablement (adoucissement). La figure V-19 montre l'influence de la température de revenu sur K, R_e et R_m , ainsi que sur la dureté et la ductilité (A %, Z%).

Figure V-19 : Courbes représentant la variation de certaines propriétés mécaniques (Z% : réduction in area, A % Elongation, dureté : hardness, R_m : tensile strength, R_e : yield strength, Résilience : Izod impact energy) en fonction de la température de revenu d'un acier faiblement allié (Ref23)

Pour les aciers à % en carbone élevé ($\%C > 0,6$), les duretés atteintes après trempe sont très élevées et le revenu ne les diminue que légèrement. Il n'est pas possible pour ces aciers d'obtenir par revenu des niveaux de ténacité élevés ; le revenu provoque même parfois (pour les températures basses) une légère augmentation de la dureté. Ainsi, ce type d'acier est utilisé pour les applications où une grande dureté et une résistance à l'usure élevée sont requises, et où une faible ténacité ne peut pas avoir de conséquences désastreuses Exemple : poinçons pour estampage, matrices, ...

(3) Le chauffage de revenu

Les températures de revenu étant plus ou moins faibles, il est toujours conseillé d'utiliser des bains d'huile ou de sels afin que le chauffage soit homogène dans toute la pièce, chose difficile dans un four électrique, par exemple. Certains sels utilisés : mélange de nitrate de potassium et de sodium.

(4) Le refroidissement après revenu

Il est plus prudent de le faire à l'air ambiant pour ne pas provoquer d'éventuelles déformations. La vitesse de refroidissement après revenu n'affecte pas les propriétés de résistance (dureté, R_m , ...) mais peut diminuer la résistance aux chocs (donc la ténacité). C'est le cas de certains aciers au chrome-nickel (aciers faiblement alliés)

qui doivent être refroidis après revenu soit à l'eau, soit à l'huile sous risque d'obtenir un produit très fragile (formation de carbures). Il s'agit de la fragilité de revenu qui conduit à une mauvaise résilience et une mauvaise ductilité (à voir plus loin).

c) Les courbes de revenu (figure V-20) :

Elles donnent l'évolution de la dureté en fonction de la température de revenu pour une durée de revenu fixe. Elles peuvent ainsi fixer l'utilisateur sur la température de revenu à choisir pour obtenir la dureté voulue

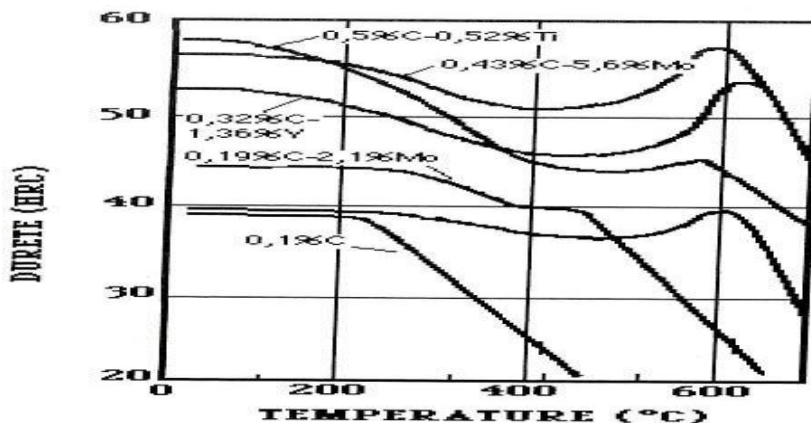
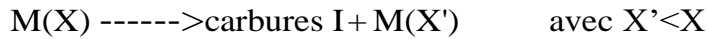


Figure V-20 : Courbes de revenu de certains aciers, influence des éléments d'alliage sur le comportement au revenu

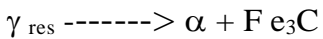
d) Transformations structurales au cours du revenu :

Le revenu se fait toujours sur une structure trempée, donc généralement sur une structure martensitique. Rappelons que la martensite est une phase sursaturée en carbone et instable (structure hors d'équilibre); ainsi elle aura tendance sous l'effet de la température à rejoindre l'état d'équilibre par un réarrangement des atomes. Le revenu va amorcer un tel processus dont la force motrice sera donc la sursaturation en atomes de carbone. Notons que toutes les phases présentes susceptibles de se transformer seront concernées par la transformation au revenu. Ainsi, à côté de la martensite, l'austénite résiduelle se transformera aussi. Les transformations au revenu vont se faire d'une manière graduelle suivant généralement- 3 étapes :

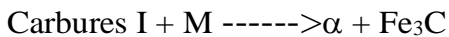
Etape 1 : Diffusion du carbone en dehors de la martensite et formation de carbures de transition. Le % en carbone de la martensite diminue en principe de 0,25% :



Etape 2 : L'austénite résiduelle se transforme en ferrite et cémentite :



Etape 3 : Transformation des carbures et de la martensite de l'étape 1 en ferrite et cémentite :



Suivant la température et la durée de revenu mises en œuvre, toutes les étapes ou seulement une partie seront exécutées. Ces transformations expliquent donc l'évolution des propriétés mécaniques au cours du revenu. En effet, la transformation de la martensite (structure hors d'équilibre) en ferrite et cémentite (structure d'équilibre) fait passer la structure de dure à moins dure. La première étape fait moins diminuer la dureté dans la mesure où la martensite bien que diminuée en carbone existe toujours.

e) Le durcissement par revenu :

Le revenu peut être un traitement qui durcit le matériau par un mécanisme que nous allons voir. Pour les aciers, le principe est le même : tout durcissement après revenu est dû à la précipitation d'une nouvelle phase (solution solide, composé défini, ...). Ainsi, seront sujets au durcissement par revenu, les aciers qui contiennent des éléments d'alliage favorisant la formation des phases précipitées. Cette étape du revenu est dite étape 4.

Exemples :

1- Les aciers alliés : Il existe un domaine de température de revenu (entre 450 et 550°C) pour lequel la dureté s'arrête de diminuer, voire augmente. Ce retard à l'adoucissement et/ ou cette augmentation de la dureté sont dus à la formation de carbures (autres que la cémentite) à partir des éléments carburigènes qui existent dans la composition de certains aciers alliés (V, Mo, Ti, W, Cr, ...). Ces éléments étant plus avides de carbone que le fer peuvent -pour ces températures- arracher le carbone de la cémentite provoquant ainsi sa dissolution, et naître. Plus le % en éléments carburigènes est important, plus la quantité de carbures générés est grande. Ces carbures sont en général très fins et dispersés. C'est leur taille, leur répartition et leur densité qui sont responsables du **durcissement par revenu** (ce

qu'on appelle aussi, dans ce cas, durcissement secondaire). En effet, si la température dépasse le domaine défini, ces carbures grossissent et se regroupent (coalescence), et on assiste à une diminution de la dureté (adoucissement). La susceptibilité d'un acier à subir un durcissement secondaire est une propriété très importante dans la mesure où elle peut être mise à profit pour certaines structures qui travaillent à des températures relativement élevées tels que les **aciers à outils**. En effet, de tels aciers ne risquent pas l'adoucissement en service mais, bien au contraire, un renforcement de leurs propriétés de résistance.

2- Les aciers "Maraging" : (Martensite Aging : vieillissement de la martensite)
 Ces aciers sont à base de fer, 18 à 20% de Ni, 8 à 18% de Co, avec des additions de Mo et Ti et contenant des % en carbone extrêmement faibles. La présence de cobalt dans ces aciers entraîne la naissance d'une série de phases durcissantes (pas forcément des carbures) et décale le processus d'adoucissement par revenu vers les hautes températures. Le durcissement dans ce type d'acier se fait après trempe par un maintien de 3 à 12 heures à une température entre 450 et 500°C. Ce séjour en température est appelé **vieillissement**. Dans les aciers maraging, la martensite peut se former pour des vitesses de refroidissement assez lentes (présence d'une quantité importante d'éléments d'alliage), en outre, elle ne sera pas très dure puisque ces aciers contiennent très peu de carbone. Ainsi, le traitement de revenu ou vieillissement qui se fait sur ce type de martensite conduit à des structures à très hautes résistances mécaniques (Re : 1500 à 2500 MPa), combinées à une bonne ductilité et ténacité.

f) Fragilité de revenu :

Les aciers trempés et revenus sont susceptibles de se fragiliser au cours du revenu. Cette fragilité est traduite par une diminution de la résilience à la température ambiante et une augmentation de la température de transition ductile fragile (figure V-21).

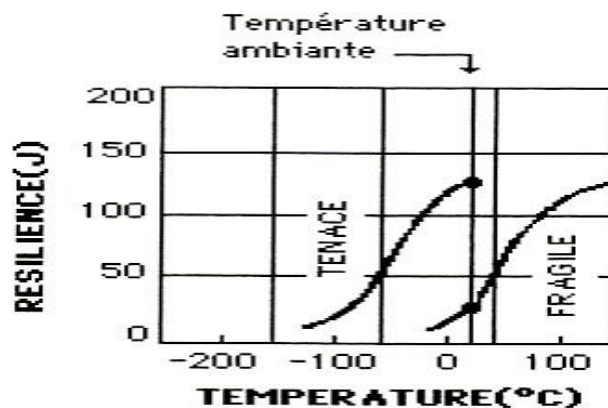


Figure V-21 : Courbes de résilience (acier tenace - acier fragile)

Il existe 2 types de fragilisation par revenu : fragilisation de la martensite revenue (FMR) et fragilité de revenu (FR). Le premier type de fragilisation (FMR) se fait dans un domaine de température entre 260 et 370°C (durée : 1 heure). Cette fragilisation semble être associée à la deuxième étape du revenu c'est à dire à la transformation de l'austénite résiduelle en cémentite. La morphologie de cette cémentite est telle qu'elle fragilise la structure résultante (fines lamelles entre les lattes de martensite). D'ailleurs, la rupture se fait

Justement au niveau de ces lamelles de cémentite. Contrairement à la fragilisation de la martensite revenue, la fragilité de revenu intervient lorsque les durées de revenu sont très importantes. C'est à dire que si un matériau ne subit pas de FMR, il peut subir une FR. Le domaine de température dans lequel ce type de fragilisation peut avoir lieu est 375-575°C.

La FR est due à la présence même discrète (<100ppm) d'impuretés généralement inévitables dans les aciers telles que : P, Zn, As, Sb. Ces éléments ségrègent dans les anciens joints de grains d'austénite causant une rupture fragile à ce niveau.

Ce type de fragilisation est important à connaître surtout pour les pièces à sections importantes qui sont généralement revenues à des températures élevées pour assurer un bon compromis entre les propriétés de résistance et de ductilité. Les grands arbres et rotors pour générateurs de puissance, par exemple, sont très susceptibles à la FR car même si le revenu est pratiqué à des températures supérieures à 575°C, du fait de leurs diamètres importants, la vitesse de refroidissement au cœur sera très faible et le séjour dans le domaine de température dangereux est inévitable.

Il est possible de remédier à la FR en maintenant le matériau à 575°C pendant quelques minutes. Les phénomènes microstructuraux responsables de la fragilisation et défragilisation par revenu restent encore à éclaircir et approfondir.

g) Revenu et éléments d'alliage :

Les éléments d'alliage peuvent intervenir au moment du revenu pour retarder l'adoucissement, c. à. d. pousser ce phénomène à avoir lieu vers les plus hautes températures.

Les éléments non carburigènes (Ni, Si, Al, Mn) ont un effet très peu sensible sur la dureté après revenu. Les éléments carburigènes (Cr, Mo, W, V, Nb, Ti), par contre, durcissent la structure pendant le revenu par la formation de carbures aux hautes températures (voir l'exemple des aciers à outils).

h) Technologie du revenu :

Le revenu se fait dans différents types de four. Le choix se fera en fonction du type de pièces à traiter et de la finalité du revenu.

Ainsi on trouve :

- Les fours à convection (circulation d'air chaud) qui œuvrent entre 50 et 750°C.

Ils sont adaptés aux grandes pièces mais le contrôle de la température y est difficile.

- Les fours à bain de sel œuvrant entre 160 et 750°C. Ils permettent un chauffage uniforme des pièces. Cependant le nettoyage après séjour dans ce type de four étant nécessaire, les pièces à géométries complexes ne peuvent pas y être traitées (nettoyage difficile).

- Les huiles chaudes ($T \leq 250^\circ\text{C}$) : bien adaptées pour les traitements de longue durée.

- Les bains de métal fondu (Pb ou eutectique Pb-X, $T > 390^\circ\text{C}$) : Ils sont de moins en moins utilisés car ils sont toxiques.

Le revenu peut être :

- sélectif (ne concerne que quelques parties des pièces), dans ce cas c'est les fours à induction qui sont utilisés.

- massif : concerne toute la pièce, c'est le cas le plus courant.

- multiple : il consiste en plusieurs étapes qui peuvent avoir des températures et des durées différentes.

- double : il est appliqué aux aciers fortement alliés contenant des éléments

gamma gènes qui vont stabiliser γ . Celle ci peut se transformer en martensite au cours du refroidissement après revenu. Ainsi un deuxième revenu s'impose pour relâcher les contraintes dues à cette transformation.

E. LES ACCIDENTS DUS AUX TRAITEMENTS THERMIQUES :

1. Accidents durant le chauffage :

Les accidents pouvant avoir lieu pendant le chauffage peuvent être résumés comme suit : - Chauffage trop rapide qui crée des contraintes dans les zones externes spécialement pour les pièces assez épaisses. Ceci est du à un gradient de température entre la surface et le coeur et une différence de dilatation thermique.

- Chauffage non uniforme (surchauffe locale, chauffage d'un seul côté)
- Chauffage à trop haute température et/ ou pendant un temps très long.

a) Oxydation :

$\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}_2$ C'est un phénomène assez courant et normal dans certaines limites. L'oxydation peut ne pas être considérée comme un accident étant donné qu'en général les traitements ont lieu dans une atmosphère contenant de l' O_2 (air). La couche d'oxyde formée peut s'enlever par décapage ou rectification mécanique. Cependant, si la température et/ou la durée du chauffage sont trop importantes, l'oxydation peut conduire à une rupture. En effet, dans ces conditions, l'oxygène va diffuser vers les joints de γ et les oxydes ainsi formés sont fermement ancrés dans la structure. Ceci provoque au niveau de la surface des défauts qu'on appelle "peau d'orange" ou "peau de crocodile" du fait de leur aspect suggestif. Ces défauts sont des amorces faciles de fissures quand le matériau se déforme (en service ou pour la mise en forme)

b) Décarburisation :

$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$. La décarburisation a très souvent lieu en relation avec l'oxydation puisqu'elle fait aussi intervenir l'action de l' O_2 sur le matériau, mais elle peut aussi faire intervenir dans certains cas l' H_2 (hydrogène). La décarburisation par l' O_2 se fait par diffusion du C vers la surface et son dégagement sous forme de gaz. La proportion de C perdu est proportionnelle à la racine carrée du temps de maintien. Le coefficient de diffusion du C dans γ est plus bas que celui du fer α , c'est pourquoi la décarburisation diminue quand on passe du domaine α vers le domaine γ . Cependant, quand l'oxydation intervient avec la décarburation, celle ci ne devient importante que dans le domaine γ ($T > 800^\circ\text{C}$). (Quand T augmente, la décarburation est favorisée et l'oxydation défavorisée). La décarburisation superficielle provoque une diminution de la dureté, de la trempabilité et de la résistance à l'usure. Elle diminue aussi considérablement la résistance à la fatigue. Dans les parties décarburees, Ms augmente entraînant ainsi la formation de la martensite plus tôt par rapport aux autres zones, ce qui conduit à la création de contraintes locales.

c) Surchauffe/brûlure :

Quand T_γ augmente exagérément, des précipités d'oxydes ou de silicates se forment aux joints du grain γ surchauffé. Ces joints se ramperont facilement durant la mise en forme de la pièce. La présence de tels précipités indique qu'une brûlure a eu lieu. Ce type d'accident ne peut être guéri par traitement thermique. La surchauffe est un

grossissement exagéré du grain, ce qui diminue considérablement la résistance à la propagation de fissure en fatigue et augmente la sensibilité à la rupture fragile. Cet accident peut être guéri par un recuit de régénération. Ainsi, les températures d'austénitisation doivent être choisies judicieusement pour éviter ce genre d'accident ; elles sont très souvent spécifiées (courbes TRC, manuels, ...).

d) Non uniformité du chauffage :

Elle peut conduire à la création de contraintes responsables de la rupture prématurée des pièces. Ce type de problème est rencontré pour les matériaux à conductivité thermique très faibles tels que les aciers rapides (les aciers alliés ont une conductivité plus faible que celle des aciers au carbone). Leur chauffage doit donc être effectué lentement et d'autant plus lentement que la pièce est grosse. Il ne faut jamais mettre une pièce froide dans un four porté au rouge. Par ailleurs, il faut que le séjour en température se fasse pendant des durées suffisantes pour égaliser la température au cœur et à la surface de la pièce.

2. Accidents durant le refroidissement :

a) Les tapures :

Ce sont des fissures dues à un gradient de température important à l'intérieur de la pièce qui crée des tensions internes dépassant la limite à la rupture du matériau. La pièce se fend ou éclate. La naissance des gradients de température peut être due à des variations de dimensions dans une seule pièce ou à des angles vifs.

Solutions : trempe moins vigoureuse (choix d'un matériau qui trempe bien à l'huile). Pour les pièces à sections différentes, il faut plonger d'abord la partie de ϕ plus faible. Dans certains cas, il est préférable d'opter pour une trempe étagée. Le choix du milieu ou du processus de trempe dépend beaucoup du dessin de la pièce. Plus celle-ci comporte de changements de section, d'angles vifs ou d'évidements, plus la vitesse de trempe doit être faible. L'acier à choisir doit donc être trempable dans le milieu choisi. Certains procédés peuvent éviter ces accidents de trempe comme le bouchage provisoire de trous ou évidements pendant la trempe.

b) Les déformations :

Ce sont des variations de dimensions et de la forme de la pièce consécutives au traitement thermique. Elles ont lieu lorsque la limite élastique est dépassée. Elles peuvent être dues à un échauffement trop rapide et inégal des pièces de forme irrégulière (exemple : vilebrequin)

Solutions : Il faut surdimensionner les pièces de manière à pouvoir effectuer un redressement après traitements et amener la pièce aux côtes désirées. Les déformations peuvent aussi être évitées en choisissant la trempe à l'air plutôt qu'une trempe liquide. Une trempe par étapes (bain de sel +air) peut aussi faire l'affaire et donner des duretés plus élevée

