

6 Traitements thermiques

6.1 Introduction

La plupart des matériaux métalliques, métaux et alliages sont susceptibles de subir des traitements thermiques. Les modifications structurales obtenues par ces traitements permettent, de conférer à un matériau des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation sous forme de pièce finie, ou à sa mise en oeuvre dans les meilleures conditions, sous forme de demi-produit ou d'ébauche. Ces améliorations contribuent très souvent à une diminution des coûts, car elles permettent l'emploi d'alliages bon marché quand on sait les traiter convenablement, ou la diminution du nombre de nuances à utiliser pour un type de fabrication donné, en choisissant un traitement bien adapté à chaque propriété recherchée.

6.2 Les traitements thermiques des aciers

La notion de traitements thermiques recouvre un ensemble d'opérations ayant pour but des transformations structurales effectuées sur les matériaux à l'état solide, sous l'influence de cycles de température convenablement choisis afin de leur conférer des propriétés particulières.

Un traitement thermique découle de l'établissement d'une loi thermique, fonction du temps et de la température. Cette loi est défini à partir:

- De la nature chimique du matériau (composition chimique) ;
- Des caractéristiques à obtenir (état structural final) ;
- De l'état initial (structure perturbée ou inadéquate issus des opérations de mise en oeuvre du matériau pour obtenir le produit).

Un cycle de traitement thermique présente l'allure générale suivante :

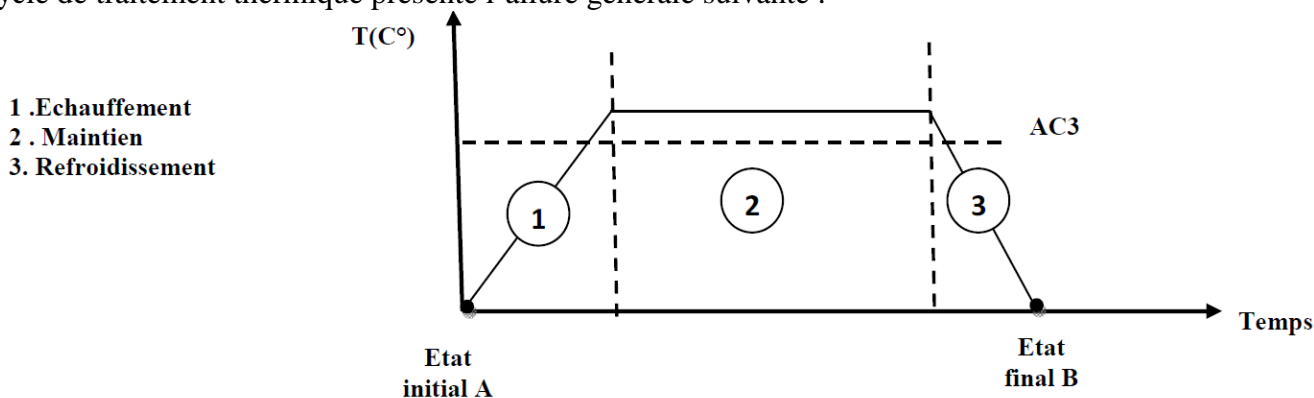


Figure 1 : Cycle de traitement thermique

1 : Loi de montée en température : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : $AC3$).

2 : Palier isotherme : Maintient à une température fixe.

3. Loi de refroidissement : Refroidissement avec une vitesse définie.

La mise en oeuvre de cycle thermique nécessite l'intervention :

- De moyens de chauffage et de maintien en température
- De moyens de refroidissement qui peuvent être : les gaz liquéfiés, l'eau (glace fondante, froide, chaude), les solutions aqueuses (eau salée), les huiles de trempe, L'air...

Les différents traitements qui sont appliqués aux aciers ont toujours pour but de modifier et d'améliorer les caractéristiques des produits issus des procédés de mise en forme par :

- L'atténuation des hétérogénéités de structure ;

- La suppression des tensions internes liées au matériau, à son mode de mise en oeuvre et aux formes du produit ;
- L'ajustement des propriétés par rapport au cahier des charges du produit.

Les transformations isothermes des aciers

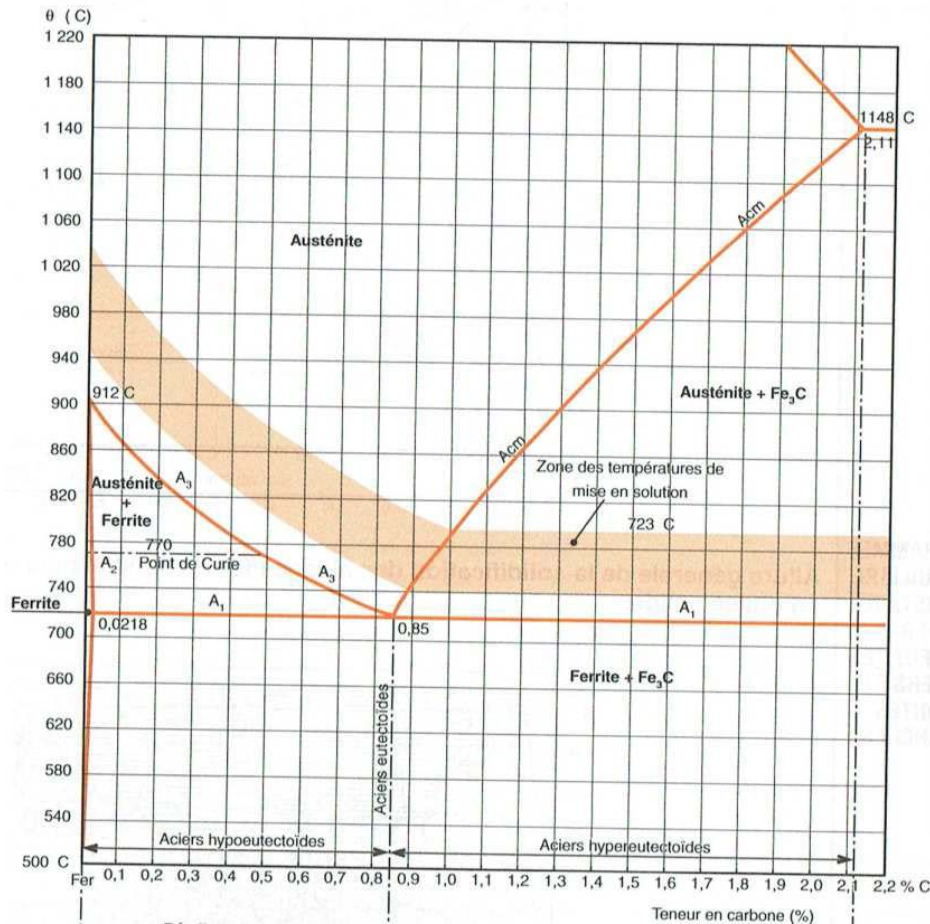


Figure 2 : Exploitation pratique du diagramme fer – carbone métastable pour les aciers au carbone (non alliés)

Le diagramme d'équilibre déjà envisagé au chapitre précédent, permettre en fonction de la teneur en carbone :

- De déterminer la température de mise en solution du carbone dans le fer γ (austénite) indispensable à atteindre pour effectuer un traitement thermique fondamental (trempe, recuit), ou palier de mise en solution.
- D'identifier la nature des constituants de la structure, au cours de refroidissement lent (recuit), et la température ambiante.
- De modifier les mouvements de diffusion des éléments dans l'état solide au cours de refroidissement.

A1 : Lieu des températures définissant la limite inférieure du domaine d'existence de l'austénite.

A2 : Lieu des températures définissant la perte des propriétés magnétiques (point de Curie).

A3 : Lieu de températures d'équilibre définissant la limite supérieure du domaine d'existence de la ferrite.

Accm : Lieu des températures d'équilibre définissant la limite supérieure du domaine d'existence de la cémentite dans un acier hypereutectique.

Les températures usuelles de mise en solution sont de **AC3 + 50° à 80° C** pour les aciers hypoeutectoides et de **AC1 + 50° C** pour les aciers hypereutectoides.

Il existe trois domaines de températures ou zones de transformation :

- Domaine perlitique
- Domaine bainitique
- Domaine martensitique

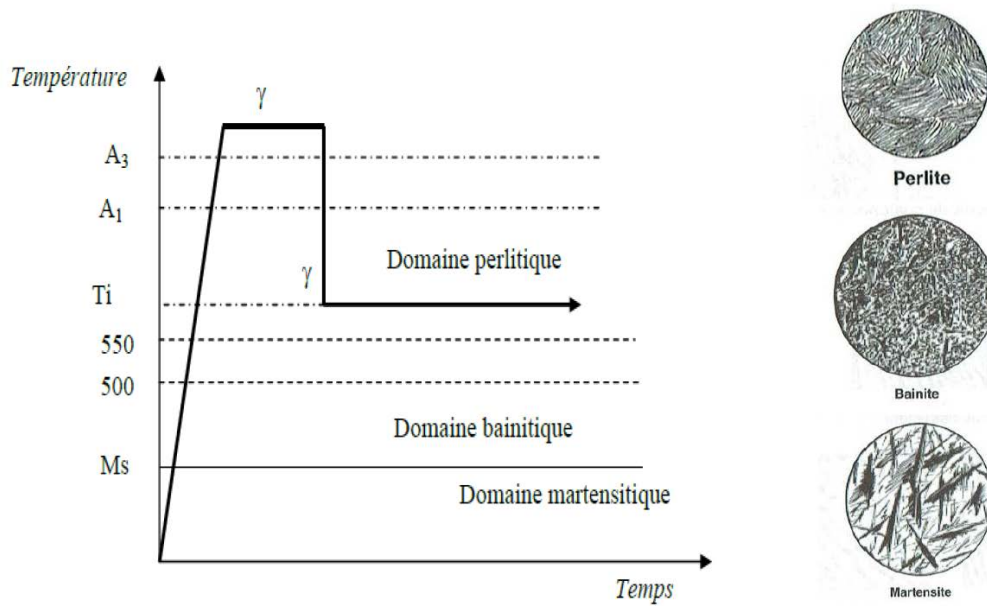


Figure 3 : Différents types de transformation

- **Transformation perlitique** : Pour des températures de transformation entre 720°C et 450°C (phase perlitique), La solubilité du carbone dans la ferrite est très faible, ce qui conduit à la précipitation du carbone se trouvant dans la ferrite dans le domaine de l'austénite voisin et ce qui donne la formation de la perlite ($\text{Fe}\alpha + \text{cémentite}$).
- **Transformation intermédiaire (bainitique)** : L'austénite se décompose en deux phases par diffusion, mais cette diffusion ne se produit pas jusqu'à la fin et la phase de la ferrite, dans ce cas, elle représente une solution solide de carbone dans le fer α , mais elle est sursaturée lors de la transformation bainitique. Pour des surfusions très élevées, entre 400°C et le point M_s (transformation bainitique) se forme la bainite à partir de l'austénite. Les températures très basses empêchent la diffusion du carbone dans l'austénite (elle est pratiquement arrêtée), le début de la décomposition se ralentit et la durée de la transformation augmente.
- **Transformation sans diffusion ou martensitique** : En dessous de M_s la diffusion du carbone devient très difficile et la transformation martensitique est une transformation sans diffusion. Elle est quasi-instantanée et à chaque température T_i , (Pour un refroidissement très rapide de T_a à $T_i < M_s$) une fraction déterminée d'austénite se transforme en martensite.

Martensite

Refroidissement de l'austénite à $V > VC_1$, cas des aciers hypoeutectoides
 γ tente de former α MAIS se transforme en α'

Transformation sans diffusion (displacive): cisaillement et déplacement collectif des atomes dans un milieu sursaturé en carbone.

CC

CFC

Refrroidissement lent (recuit)
Diffusion (à A_c3)

Refrroidissement rapide (trempe)
Sans diffusion

M_s atteinte

Quadratique hybride

Déformation plastique de l'austénite

Austénite

Martensite

Les traitements thermiques classiques sont la trempe, le revenu et le recuit.

6.2.1 Trempe

C'est un traitement thermique de durcissement consistant à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation AC_3 (austénisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale.

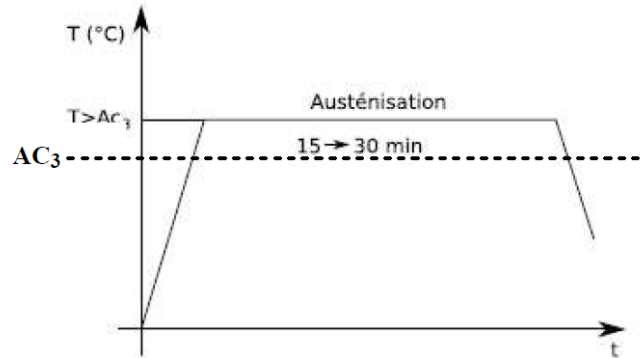


Figure 4 : Austénisation de l'acier

Conduite de l'essai :

- Chauffage jusqu'à une température élevée permettant la formation de l'austénite dépend de la teneur en carbone et des éléments d'addition. La température de chauffage se situe entre 30 et 75°C au dessus de la ligne AC_3 (850°- 900 °C).

Pour les aciers rapides, la température d'austénisation peut atteindre 1300 °C.

- Maintien de la température : La durée de maintien est variable, elle dépend beaucoup de la géométrie de la pièce. Elle se situe en général entre 15 et 30 minutes.
- Refroidissement rapide : Le but de refroidissement est de transformer l'austénite en martensite ou bainite, plus durs. La méthode de refroidissement dépend du constituant et de la structure souhaitée.

Les facteurs influencent la qualité de la trempe :

- Pouvoir refroidissant du bain
- Masse de la pièce : plus la pièce est grosse, plus le refroidissement n'est pas homogène.
- Conductibilité thermique

Le traitement de trempe fait en général augmenter R_m , R_e , et H et diminuer $A\%$, $Z\%$ et K (résilience). Il est suivi d'un second traitement appelé revenu qui a pour but de réduire les effets de la trempe. Il améliore la résilience, diminue la dureté et supprime les tensions internes issues de la trempe.

6.2.2 Revenu

La trempe crée une structure martensitique très dure, donc très fragile. Le but du revenu est de modifier la structure pour obtenir un bon compromis dureté/fragilité. Le revenu diminue aussi les contraintes résiduelles de trempe.

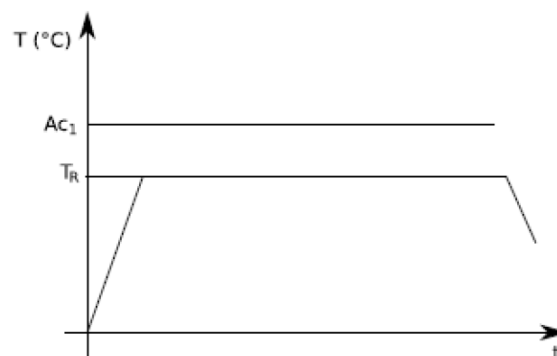


Figure 5 : Le cycle thermique de revenu

Conduite de l'essai :

- Chauffage jusqu'à $Tr < AC1$ pour l'acier considéré
- Maintien à la température Tr
- Refroidissement plus au moins rapide

Pendant le revenu :

- La martensite se transforme en ferrite et en carbures
- L'austénite résiduelle se transforme en martensite et en bainite
- On obtient un changement de propriétés par changement de structures

Le revenu suit immédiatement la trempe pour éviter la rupture des pièces qui peut se produire après la trempe.

La dureté, la résistance élastique et la résistance maximale à la traction sont diminuées alors que la résilience, la striction et l'allongement sont augmentés.

On trouve le :**6.2.2.1 Revenu de relaxation ou de détente**

Il s'effectue entre 180°C et 220°C -250°C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite → martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle...

6.2.2.2 Revenu de structure ou classique

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et A_{c1} . On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, R_m et R_e . Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.

6.2.2.3 Revenu de durcissement

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires).

6.2.3 Recuit

Opération thermique qui annule les effets des traitements thermiques ou mécanique antérieurs .

Le recuit a pour but de :

- Diminuer la dureté d'un acier trempé.
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- Homogénéiser les textures hétérogènes.
- Réduire les contraintes internes

Conduite de l'essai

- Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de recuit à réaliser.
- Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- Un refroidissement très lent généralement à l'air calme. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit, voir (figure 6).

Tr : Température de recuit.

tc : Temps de chauffage.

tm : Temps de maintien

tr : Temps de refroidissement

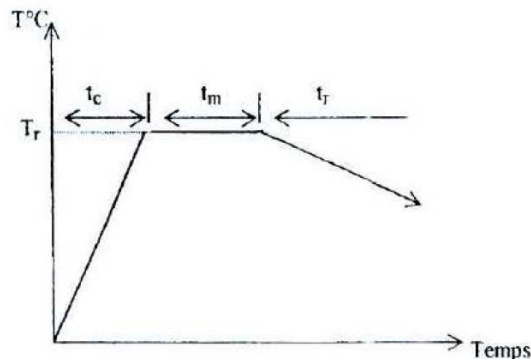


Figure 6 : Le cycle thermique d'un recuit

Il existe plusieurs types de recuits selon la température :

Température $> AC_3$: homogénéisation, normalisation.

$< AC_3$: adoucissement, recristallisation, détente.

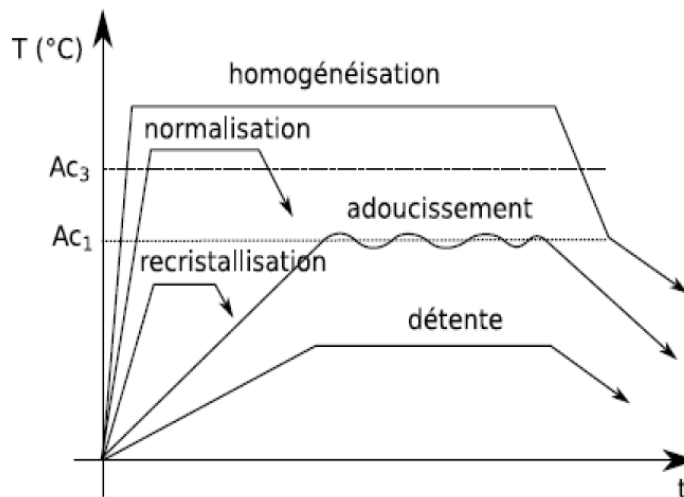


Figure 7 : Types de recuit

6.2.3.1 Recuit d'homogénéisation

Il se pratique après moulage ou corroyage, à haute température (950°C - 1200°C). La vitesse de refroidissement ne doit pas être trop élevée : de 20°C à 60°C par heure.

6.2.3.2 Recuit de normalisation

On l'applique après un maintien à haute température (moulage, forgeage, homogénéisation) pour augmenter la grosseur du grain. Normalisation : affinage du grain pour obtenir un état structural de référence (avant la trempe par exemple).

6.2.3.3 Recuit d'adoucissement

Permet d'obtenir une structure correspondant à la dureté minimale de l'acier pour faciliter la mise en forme à froid ou l'usinage par outils coupants.

6.2.3.4 Recuit de détente

Il vise à éliminer les contraintes internes produites par la mise en forme, la solidification, le soudage ou l'usinage. On chauffe la pièce jusqu'à une température comprise entre 600 et 650°C , puis on refroidit lentement.

6.2.3.5 Recuit de recristallisation

Il s'effectue après une déformation à froid (emboutissage, extrusion, étirage à froid, ...) qui provoque toujours un écrouissage et l'augmentation de certaines caractéristiques mécaniques (σ_e , dureté, ...). Ce traitement permet une restructuration des caractéristiques initiales du matériau.

6.3 Traitements thermochimiques

6.3.1 Introduction

Dans la plupart des cas, en particulier dans les industries mécaniques, ce sont surtout les surfaces des organes de machines qui sont soumises à des sollicitations mécaniques sévères, de nature diverses : frottement, usure, sollicitations de fatigue. Il faut donc conférer des propriétés particulières des couches extérieures de ces pièces en leur appliquant des traitements appropriés.

Ces traitements permettent d'obtenir des caractéristiques particulières à la surface sans altérer les caractéristiques dans la masse. Selon leur principe, ils améliorent principalement une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : La dureté en surface, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et le comportement en frottement.

Par exemple, pour un pignon, on peut souhaiter une grande dureté en surface (pièce soumise à un frottement considérable) et une bonne résilience à coeur (résistance à des contraintes de masse).

On distingue trois principaux types de traitements superficiels :

- Les traitements thermochimiques.
- Les traitements mécaniques.
- Les traitements de durcissement par trempe superficielle.

6.3.2 Définition d'un traitement thermochimique

Un **traitement thermochimique** est un **traitement thermique** effectué dans un **milieu** convenablement choisi pour obtenir une modification de la composition chimique du métal de base, par échange avec ce milieu. Dans le cas de ces traitements, les éléments mis en jeu pour enrichir la couche superficielle du métal sont apportés par des milieux qui peuvent être solides (ciments), liquides (bains de sels), ou gazeux.

6.3.2.1 Cémentation

C'est un traitement thermochimique auquel est soumis un produit ferreux porté à l'état austénitique pour obtenir un enrichissement superficiel en carbone, élément qui se trouve alors en solution solide dans l'austénite. Le produit ferreux cémenté subit un durcissement par trempe immédiate ou ultérieure.

La surface des pièces est mise en contact avec un milieu susceptible de fournir du carbone libre par une réaction chimique à haute température, la température de cémentation est choisie supérieure à la température AC3 de l'acier, et généralement comprise entre 900 et 1000 °C, parce que la faible solubilité du carbone dans la ferrite implique que le traitement s'effectue dans le domaine austénitique. De plus, on peut ainsi dans la plupart des cas effectuer le traitement de durcissement par trempe martensitique directement à partir de la température de cémentation. Le but est donc d'obtenir à la surface de la pièce à traiter une couche de 0,2 à 2 mm d'épaisseur à haute teneur en carbone (0,6 à 0,9%) ayant une structure essentiellement martensitique de grande dureté (700 à 900 HV en surface).

6.3.2.2 Carbonitruration

La carbonitruration enrichit la surface de l'acier simultanément en carbone et en azote par un mécanisme analogue à celui de la cémentation. Elle est réalisée à des températures comprises entre 750 °C et 900 °C. Les durées de l'opération, de l'ordre de 30 minutes à quelques heures, sont inférieures à celles de la cémentation pour des épaisseurs de couche allant de 0,05 mm à 0,6 mm. Dans les cas plus courants de carbonitruration, la teneur en azote des couches carbonitrurées est le plus souvent inférieure à 0,6 %.

6.3.2.3 Nitruration

La nitruration est un traitement thermochimique auquel est soumis un produit ferreux pour obtenir un enrichissement superficiel en azote. Il consiste à fixer l'azote à la surface du métal par réaction chimique et à le faire diffuser en phase ferritique, afin qu'il forme avec le fer et les éléments d'alliage de l'acier des zones de nitrures très fins capables de produire un durcissement de la couche enrichie.

Elle est pratiquée pour les axes de pistons, les soupapes, les vilebrequins, les arbres de machines-outils, les arbres de pompes à eau...

La nitruration des aciers se fait sur un métal ayant subi au préalable un traitement thermique de trempe et de revenu et présentant de ce fait une structure de martensite revenue offrant un ensemble de caractéristiques mécaniques élevées. Elle s'effectue généralement à une température comprise entre 450 et 580 °C, inférieure à la température de revenu de l'acier.