Brütsch/Rüegger AG
Tubes acier
Althardstrasse 83
CH-8105 Regensdorf
Tél. 01/871 34 34
Fax 01/871 34 99
www.b-r.ch
Email : info@brr.ch
Certification ISO 9001:2001

Cahier technique 05

Influence des traitements thermiques sur la structure

- Traitements de recuit
- La trempe
- La trempe en surface (trempe superficielle)
- L'affinage
- Diagrammes TTT

Influence des traitements thermiques sur la structure (DIN 17014)

L'acier est la seule matière pouvant subir des traitements thermiques aussi diversifiés.

La raison réside en particulier dans les transformations du réseau lors de l'augmentation de la température.

- augmentation de la résistance : trempe, affinage (revenu)
- Diminution de la résistance : recuit d'adoucissement, recristallisation
- Meilleure préparation à une transformation ultérieure : recuit d'adoucissement, normalisation
- Elimination des défauts : divers recuit, normalisation.

Tous les traitements thermiques comportent les étapes suivantes : la pièce usinée ou le métal brut est chauffée à l'état solide jusqu'à une température définie, que l'on maintient ensuite pendant un temps équivalent à la durée des opérations que l'on souhaite réaliser. Ensuite, on refroidit à une vitesse déterminée.

Les fours utilisés doivent être réglables pour permettre une sélection exacte de la température. Ils contiennent, si possible un gaz protecteur ou peuvent être sous vide pour éviter le calaminage ou la décarburation. On distingue différents modèles de four : à enfournement continu (fours continus, tournants, roulants et à longerons) ou à enfournement par postes (fours à cloche, fours à sole mobile, fours de recuit en chaudron).

Les différents procédés de traitement thermique peuvent être regroupés dans les catégories suivantes : recuit, trempe et revenu.

Traitements de recuit

Le *recuit* doit éviter des différences de concentration des éléments et donc empêcher les ségrégations, en particulier de soufre, phosphore, carbone et manganèse. En principe, tous les atomes tendent à se répartir régulièrement dans la substance ferreuse de base si la température et le temps de diffusion sont suffisants. C'est pourquoi ces deux paramètres sont réglés le plus haut possible : la température est fixée juste en dessous du solidus (1100 à 1300 °C, en fonction de la teneur en carbone de l'acier), et est maintenue pendant plusieurs heures (jusqu'à 40 en fonction de l'épaisseur de paroi de la pièce). On réussit à empêcher la micro-ségrégation, mais difficilement la ségrégation majeure car les voies de diffusion des éléments sont trop longues pour cela.

Ce procédé connaît des applications très variées, en particulier pour les aciers de décolletage et la fonte d'acier.

En raison des valeurs très élevées de température et de temps, la substance diffuse également aux joints des grains. Les grains perdent alors de leur finesse. C'est pour cela qu'il faut, en général, enchaîner avec un recuit normal.

Le *recuit* doit aussi réduire les tensions contenues dans l'acier. Celles-ci apparaissent en particulier du fait d'un refroidissement irrégulier qui est difficile à éviter après une soudure après la coulée, la déformation à chaud ou un traitement thermique, ou aussi suite à un cintrage irrégulier ou à un autre type de déformation à froid.

Les conséquences de tensions résiduelles dans l'acier sont des modifications de forme (distorsion) ou une fissuration, qui peut éventuellement apparaître bien plus tard. La température de recuit est fixée aux environs de 600 °C afin que la structure ne subisse pas de modification. Il faut ensuite laisser refroidir dans le four suffisamment longtemps pour que de nouvelles tensions ne puissent apparaître.

La *normalisation (recuit normal)* doit permettre d'obtenir une structure régulière à grains fins combinant les meilleures propriétés de résistance et de ténacité (« structure normale »).

La structure « anormale » d'origine peut apparaître sur de grandes pièces forgées et des soudures de raccordement (structure fortement irrégulière) sur de l'acier en barres, des tôles brutes et intermédiaires (dont le refroidissement est relativement lent et qui ont donc de gros grains) ou sur des pièces de fonte d'acier. *Les aciers hypo*-eutectoïdes jusqu'à 0,8 % de C, sont chauffés à une température juste au-dessus de la ligne G-O-S (A_3) dans le diagramme fer-carbone, donc à une température de 750 à 950 °C en fonction de la teneur en C. Ils y sont maintenus juste le temps nécessaire, et sont ensuite refroidis à l'air. Pour éviter la formation de gros grains, on ne doit ni surchauffer l'acier, ni dépasser le temps prescrit. Un dépassement par deux fois des lignes de transformation produit une structure ferrite-perlite à grains fins.
Les aciers *hyper*-eutectoïdes titrant à plus de 0,8 % de C ne sont pas recuits dans la zone austénitique mais à une température plus basse : juste au-dessus de la ligne S-K (A_1) aux alentours de 750 °C. Cela provoque aussi la formation de cémentite grossière autour des joints des grains. Les trains de laminoirs modernes offrent de plus en plus la possibilité de régler précisément les températures finales de laminage et le refroidissement. Ceci afin que le recuit normal puisse être remplacé par ce « laminage à guidage régulé de température ».

L'adoucissement doit préparer l'acier de façon optimale à un usinage ultérieur par enlèvement de copeaux. Il faut pour cela, en réduire la dureté. On y parvient en transformant la cémentite lamellaire pour la rendre granuleuse. La température de recuit se situe juste en dessous de la ligne P-S-K (721 °C = A1), ou autour de cette valeur. Pour les aciers hyper-eutectoïdes, elle peut la dépasser également un peu afin de former de la cémentite grossière aux joints des grains Le temps de maintien doit être de plusieurs heures et le refroidissement doit se faire lentement. L'application de ce recuit à des aciers à moins de 0,4 % de C ne serait pas judicieuse. Cela les rendrait trop tendres, de sorte que lors de leur usinage par enlèvement de copeaux, ils auraient tendance au « surgraissage ». Pour ces aciers, on préfère faire un recuit à gros grains.

Le *recuit à gros grains* ou « *recuit intégral* » facilite l'usinage des aciers tendres. Par un réglage à des hautes températures de recuit, bien au dessus de A3 (950 à 1150 °C), et un refroidissement lent, on obtient des grains beaucoup plus gros.
Cela évite le « surgraissage » lors de l'enlèvement de copeaux. La surface reste lisse et les copeaux sont plus court.

Le but du *recuit par cristallisation* est, une fois de plus, d'éviter les effets d'une déformation à froid antérieure, c'est à dire l'écrouissage et l'allongement des grains.
La température de recuit dépend essentiellement du degré de déformation, elle se situe en général entre 500 et 700 °C, et donc en dessous du niveau inférieur de transformation. En faisant attention aux rapports entre la température, le degré de déformation et la durée du recuit, on peut obtenir un grain fin et très régulier. En particulier, la recristallisation est la seule possibilité de réduire la taille des grains pour les aciers austénitiques et ferritiques fortement alliés.

La trempe

Globalement, il s'agit, pour ce procédé de traitement thermique, de la *trempe de transformation*, car il existe parallèlement de nombreuses autres possibilités pour améliorer la résistance de l'acier:

- écrouissage à froid par déformation,
- trempe à solution solide par adjonction d'éléments, en particulier carbone, manganèse et chrome,
- trempe à retassure dispersée ou à particules.

La structure atomique interne pour une dureté supérieure est fondamentalement la même dans tous les cas : les dislocations sont bloquées, ce qui empêche toute diffusion. La trempe dominante dans la pratique, est la trempe de transformation.

Comme son nom l'indique, on ne peut la réaliser que sur des aciers transformables ; c'est le cas de la plupart des aciers, mais pas des aciers ferritiques et austénistiques fortement alliés.

Le procédé consiste, pour les aciers hypo-eutectoïdes jusqu'à 0,8 % de C, à chauffer la pièce d'acier jusque dans la zone austénistique, donc au dessus de la ligne G-O-S = A_3 dans le diagramme fer-carbone (750 à 900 °C selon la teneur en C).Ensuite la pièce est refroidie (trempée) à haute vitesse.

Comment peut-on expliquer l'accroissement de la dureté pendant cette étape?

Dans le fer γ à surface cubique centrée, tous les atomes de C sont dissous régulièrement. Lors d'un refroidissement *lent,* deux phénomènes se produisent : le réseau se rabat autour de la ferrite en réseau cubique centré et, les atomes de C ont le temps de diffuser à partir de ces zones et de former des lamelles de perlite. Par contre, lors d'un refroidissement *rapide*, les voies de diffusion du carbone deviennent de plus en plus courtes du fait que l'énergie nécessaire à cet effet est dissipée sous forme de chaleur, alors que la transformation du réseau démarre de toute façon.

On distingue ensuite les trois phases suivantes de transformation à partir de la zone austénistique, au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse de refroidissement:

Figure 1: Vitesse critique de refroidissement pour différentes teneurs en carbone de l'acier

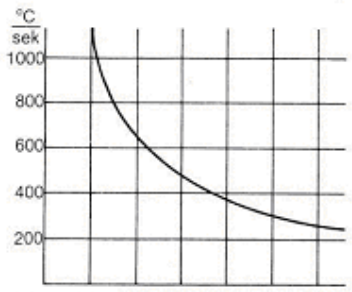
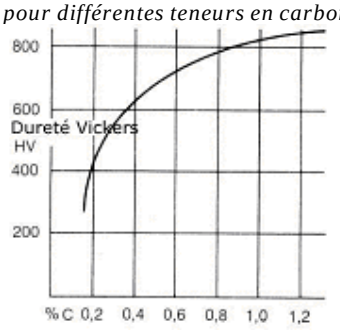


Figure 2: Niveau de dureté pouvant être atteinte pour différentes teneurs en carbone de l'acier



1)Phase pertitique: Il n'y a déjà plus de formation de grains de ferrite lorsqu'on augmente un peu la vitesse. Seul de la perlite formant des lamelles de plus en plus fines apparaît. Autrefois, on désignait cette structure par les termes de sorbite (fine) et toostite (lamelles encore plus fines), car les anciens microscopes ne permettaient pas encore d'identifier la perlite.

2) *Phase intermédiaire:* Elle intervient presque uniquement pour les métaux alliés, tout particulièrement lorsqu'on démarre la trempe dans un bain chaud et qu'on la laisse s'y dérouler à température constante (isotherme). Le réseau se rabat d'abord, ensuite le carbone diffuse; il ne produit toutefois pas de lamelles de cémentite, mais des grains extrêmement petits. Cette structure intermédiaire est aussi appelée bainite.

3) *Phase martensitique:* A partir d'une vitesse de refroidissement critique, la diffusion du carbone n'a pas du tout lieu.
Dans le réseau cubique centré, les atomes de C n'ont en fait pas de place ; ils restent cependant dans les interstices, «tendent» le réseau et assurent ainsi une dureté élevée.
La structure martensitique consiste, sur la micrographie, en fines aiguilles.

On s'efforce en général d'atteindre ce dernier stade. Comme il faut du carbone pour «tendre» le réseau, on ne peut tremper que des aciers titrant à au moins 0,2 % de C. La vitesse critique de refroidissement à mettre en œuvre est d'autant plus élevée que le taux de C est bas (voir figure 1). Les aciers à faible teneur en C doivent être trempés à l'eau.
A partir d'environ 0,4 % de C, il suffit de tremper à l'huile. Lorsque le nombre d'éléments d'alliage est élevé, en particulier pour le manganèse, le chrome et le nickel, la vitesse de refroidissement critique diminue, de sorte qu'en fonction du taux de C et de la composition de l'alliage, un refroidissement à l'air peut déjà produire de la martensite On parle, par exemple, de durcissement à l'eau ou à l'huile, ou d'aciers durcissant à l'air (trempe à l'air).

De même, le niveau de dureté que l'on peut atteindre dépend de la teneur en C de l'acier, comme le montre la figure 2. On observe que l'acier eutectoïde à 0 ,8 % de C atteint une dureté maximale. Une teneur plus élevée en carbone est sans incidence. Ceci est dû à la teneur croissante en *austénite résiduelle* dans l'acier.
Pour des teneurs en C supérieures, une partie croissante d'austénite ne se transforme plus pendant la trempe, de sorte que ces aciers, outre la martensite, comportent jusqu'à 30 % de cette composante structurelle tendre et ductile. Pour éviter que ces valeurs n'augmentent encore plus, les aciers hyper-eutectoïdes ne doivent pas non plus être trempés à partir de la zone austénitique. Pour ceux-ci, la température de trempe se situe juste au dessus de la ligne S-K (A1) dans le diagramme fer-carbone, donc aux environs de 750 °C.

Se pose également la question de la *profondeur de trempe,* c'est-à-dire à quelle profondeur la trempe agit à l'intérieur d'une pièce d'acier (trempabilité).
La pièce en acier n'est en contact avec le liquide de trempe que sur son bord. De ce fait, la vitesse de refroidissement est maximale. A une certaine distance du noyau, on se trouve en dessous de la vitesse critique de refroidissement. Pour les aciers non alliés, la profondeur de trempe est d'environ 10 mm. Les pièces de construction dont la paroi est épaisse de 10 mm environ sont donc trempées intégralement.

Ces valeurs sont augmentées par les éléments d'alliage qui ralentissent la vitesse critique de refroidissement. Pour de nombreux aciers de construction, il s'agit de manganèse. C'est pour cette raison que les aciers trempés à l'eau sont qualifiés de durcisseurs en croûte. Les durcisseurs à l'huile ou à l'air assurent une trempe intégrale en profondeur, même sur des pièces épaisses.

La trempabilité est évaluée grâce au *test de bandes de dispersion-trempabilité Jominy* (DIN 50191). Pour cela, on chauffe une baguette ronde de 25 mm de diamètre et 100 mm de longueur à la température requise, on la suspend dans un dispositif de trempe et on arrose à l'eau sa surface frontale. Ensuite, on mesure la dureté sur sa face longitudinale (voir figures 3 et 4).

Après chaque trempe, des tensions apparaissent dans l'acier. Elles sont dues a un refroidissement irrégulier sur la section transversale. Les conséquences de ces *tensions* sont une déformation de la pièce ou même une fissuration. Pour éviter cela, la pièce doit être immédiatement recuite après la trempe à environ 150 °C (chaque réchauffement après la trempe est appelé recuit).

De nombreux aciers ont tendance à être *sensibles à la surchauffe.* Dès que la température de trempe est légèrement dépassée, les grains deviennent plus gros et il en résulte une fissure. C'est particulièrement le cas pour les aciers alliés au manganèse.

Le défaut consistant en une *présence de plages de moindre résistance* résulte d'une température de trempe trop basse ou d'un déplacement insuffisant de la pièce d'acier dans le produit de trempe. Dans les deux cas, la surface n'est pas uniformément constituée de structure dure, mais comporte des zones tendres dues, dans le premier cas, à des grains de ferrite non transformés en austénite, dans le deuxième cas, à une formation locale de bulles de vapeur et donc, par conséquent, à une vitesse de refroidissement trop faible.

Figure 3: Test bandes de dispersion-trempabilité Jominy.

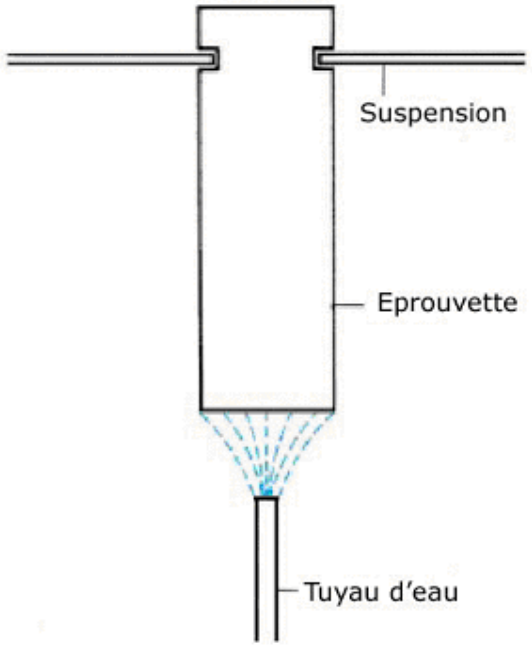
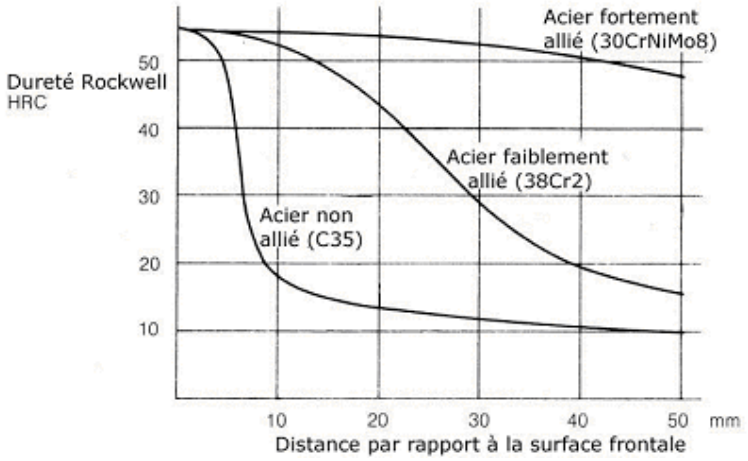


Figure 4: Profondeur de trempe de différents aciers.



La trempe superficielle (trempe en surface)

Pour de nombreuses pièces de construction, la *trempe intégrale en profondeur* n'est pas souhaitée car elle implique simultanément une plus grande fragilité et une plus grande sensibilité à la rupture (acier « diamant »). Au contraire, on vise une haute résistance à la sollicitation par pression, à la friction et à l'usure uniquement en surface, alors que le noyau doit rester ductile. Exemples typiques: roues dentées ou arbres. La couche superficielle durcie n'est, en général, épaisse que de 0,1 à 2 mm, de sorte que les tensions engendrées par la trempe sont moins nombreuses.
Une trempe locale est aussi possible uniquement à l'emplacement du palier d'un arbre.

La trempe en surface est réalisée selon plusieurs procédés.

Lors d'un *durcissement à la flamme*, des brûleurs à gaz chauffent la pièce brièvement et donc à faible profondeur ; juste après, on refroidit par jet d'eau. Pour un *durcissement par induction*, le réchauffement est réalisé grâce à des bobines à haute fréquence. Ces deux procédés sont appliqués lors de la fabrication en série sur des machines de trempe, et les dispositifs de chauffage et les jets d'eau sont alors adaptés à la forme des pièces d'acier concernées. Par contre, lors de la *trempe par immersion*, on plonge brièvement les pièces dans des coulées de métal brûlant, par exemple du bronze, de sorte que même des pièces diverses et de formes compliquées peuvent être durcies dans le même bain.

Ces trois procédés se ressemblent donc dans la mesure où seule la couche superficielle est chauffée brièvement, et ainsi les couches plus profondes ne sont pas trempées. De plus, il est nécessaire que ces aciers aient une teneur minimale en carbone de 0,2 %.

Lors de *la trempe de cémentation*, le procédé de trempe superficielle prédominant, on vise une dureté superficielle et une ductilité de noyau extrêmement élevées, C'est pourquoi l'on part d'un acier comportant un maximum de 0,25 % de C (acier de cémentation), qui en fait ne peut donc pas du tout être trempé. Lors d'une première étape, la couche superficielle est récarburée (cémentée) et elle est ensuite la seule à subir une trempe.

La *cémentation* est réalisée dans des produits de recarburation solides (charbon de bois + additif), liquides (sels au cyanure en fusion) ou surtout gazeux (gaz naturel + additifs ; propane). La température requise se situe dans la zone austénitique, donc au dessus de A_3 (environ 900 °C) et il faut plusieurs heures. On s'efforce d'avoir une teneur en C de 0,6 à 0,8 % dans la couche superficielle ; car on atteint ainsi la dureté maximale (voir figure 2).

La trempe de la couche superficielle après la cémentation a lieu le plus simplement possible, c'est-à-dire par trempe à partir de la température de cémentation. On obtient toutefois un noyau à grains gros, avec un dépassement de temps de trempe dû à la longue cémentation. On obtient aussi de la martensite à gros grains en surface, du fait qu'on a trempé à partir d'une température trop élevée. On peut éviter ces inconvénients qualitatifs de deux manières : soit en utilisant des aciers de cémentation alliés et donc à grains fins pour une trempe directe, soit en utilisant un autre procédé de trempe. Lors de la trempe simple, on refroidit la pièce en acier après la recarburation à l'air. On chauffe à la température de trempe correspondant au bord cémenté (environ 750 °C), et on trempe. Pour obtenir un noyau à grains encore plus fins, on peut aussi normaliser avant la trempe superficielle : bref réchauffement à environ 900 °C et refroidissement lent (réaffinage du noyau). Le procédé encore plus coûteux de la double trempe est de moins en moins appliqué.

Dans tous les cas, on doit recuire à environ 150 °C pour éviter des tensions dues à la trempe. La *trempe par nitruration* ne repose pas sur la dureté martensitique issue du carbone. A une température d'environ 550 °C, on laisse l'azote diffuser dans l'acier ; à savoir soit à partir d'ammoniaque gazeux (nitruration au gaz ; durée environ 50 heures) , soit à partir de bains cyanurés (nitruration par bain ; durée environ 2 heures). L'azote prend alors une forme atomique qu'il ne présente pas à son état gazeux pur N_2. Les aciers utilisés doivent être spécialement alliés car il faut éviter la formation de nitruration ferreuse à cause de la plus grande fragilité qu'elle induit. Seuls l'aluminium et les nitrates de chrome sous forme de grains fins permettent d'augmenter la dureté (trempe à retassure dispersée). Une trempe supplémentaire n'est pas nécessaire comme pour la trempe martensitique, parce que la couche nitrurée est déjà dure. C'est pourquoi il ne se produit pas non plus de tensions dues à la trempe. Cela confère à la nitruration un avantage important : ce procédé peut être appliqué sur la pièce usinée finie. Comparativement à la trempe de cémentation, la couche superficielle est plus mince et sensiblement plus dure (voir figure 5). De plus, la dureté de la couche nitrurée reste constante jusqu'à une température d'exploitation d'environ 500 °C, alors que la couche de cémentation devient tendre à partir de 300 °C.

Figure 5: Déroulement de la trempe lors de la trempe de cémentation et de nitruration

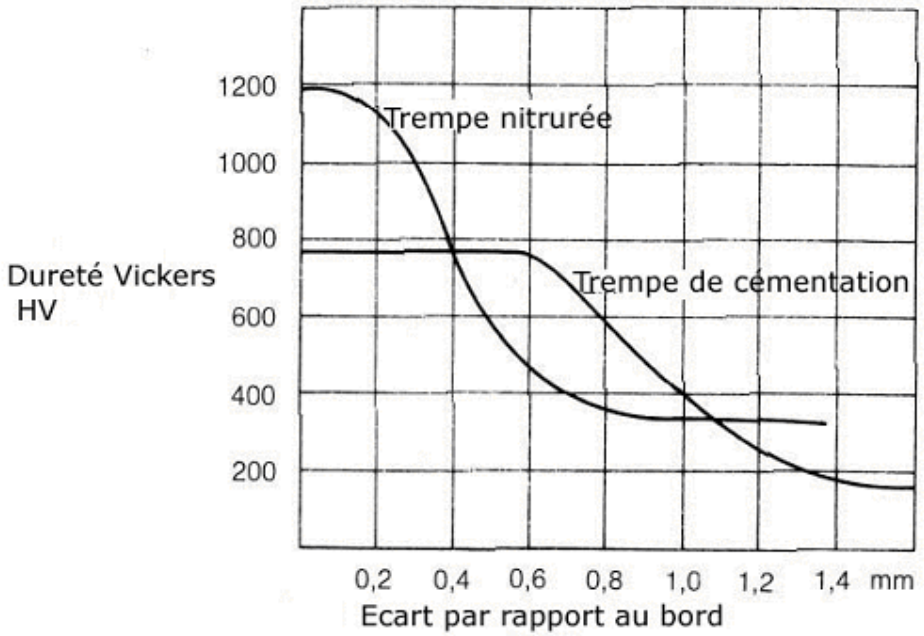
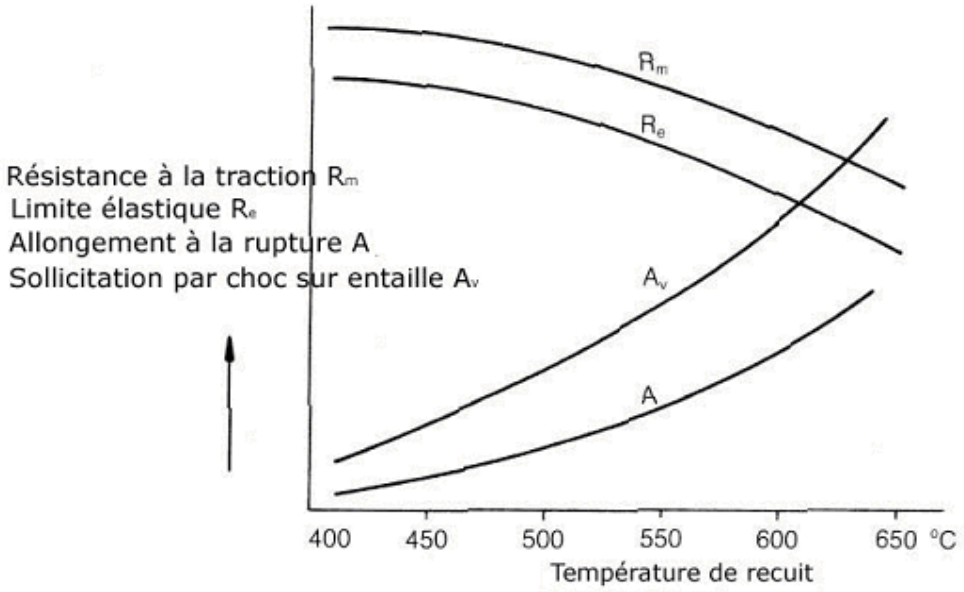


Figure 6 : diagramme d'affinage, schématique



Lors de la *nitruration au carbone*, le carbone et l'azote pénètrent ensemble dans la pièce en acier, et cela à partir d'un bain de sels (cyanure, par exemple, cyanure de potassium KCN) ou d'un mélange gazeux entre 650 et 800 °C. Plus la température est élevée, plus le carbone diffuse à l'intérieur. L'acier n'a pas besoin d'être allié, mais il doit être trempé après la carbo-nitruration. L'avantage, par rapport à la trempe de cémentation, consiste en une température de trempe plus basse et un produit de trempe assez doux réduisant les tensions.

Lors de la *boruration*, le bore sous forme d'alliages borurés pulvérulents (spécialement du carbure de bore) pénètre à une température de 800 à 1000 °C dans l'acier. Les borures de fer de la couche superficielle entraînent une dureté et une résistance à la température plus importantes que la couche nitrurée (1600 à 2500 HV, épaisseur de couche en fonction du temps de recuit de 0,1 à 0,8 mm).

Tous les procédés de trempe en surface améliorent considérablement la durabilité des pièces en acier du fait qu'une couche superficielle dure limite l'apparition de criques dues à la fatigue.

L'affinage

Comme déjà indiqué à propos de la trempe superficielle, dans de nombreuses pièces d'acier, la dureté « diamant » de la martensite n'est pas souhaitable car elle augmente la fragilité et donc la sensibilité à la rupture. La combinaison d'une forte dureté et d'une ductilité élevée serait l'idéal mais elle n'est pas réalisable. Pour l'acier, on peut aboutir à de bons compromis : par une trempe en surface, par affinage et alliage (particulièrement dans les aciers pour construction chrome-nickel).

L'affinage consiste en deux phases, une phase de trempe, suivie d'une phase de chauffage (recuit) à une température en dessous des transformations, en général 400 à 650 °C. En raison de la trempe, une teneur minimale en carbone de 0,2 % est requise dans les aciers affinés. Grâce au recuit, les atomes de C forcément retenus dans la martensite sont de plus en plus amenés à se diviser en cémentite. C'est pourquoi la résistance à la traction R_m et la limite élastique R_e de l'acier diminuent par rapport à l'état durci, mais, en particulier, la sollicitation par choc sur entaille A_v ainsi que l'allongement à la rupture Z augmentent considérablement. Ces modifications de propriétés lors du recuit sont représentées pour les différentes qualités d'acier dans des *diagrammes d'affinage* (voir figure 6, schématique)

Le consommateur d'acier peut donc, en fonction de cela, sélectionner les propriétés de résistance qui lui conviennent dans une gamme très large. Si on compare ces valeurs avec la structure de départ à *recuit normal*, la résistance à la traction demeure constante, la limite élastique, la sollicitation par choc sur entaille et l'allongement à la rupture s'améliorent.

Cela tient à la structure d'affinage régulière à granulosité fine. Selon le produit de trempe utilisé pour le durcissement, on parle de trempe à l'eau, à l'huile ou à l'air. Par l'affinage *en profondeur* d'une pièce d'acier, on peut obtenir ce résultat sans trempe en profondeur si de la sorbite ou de la troostite se sont formées dans le noyau.

Diagrammes TTT

Il ressort des sections précédentes que la vitesse de refroidissement a une influence primordiale sur les structures susceptibles d'être obtenues. On ne peut pas déduire ces relations du diagramme fer-carbone, car celui-ci n'est applicable que pour un refroidissement très lent. Pour le déroulement pratique de nombreux procédés de traitement thermique, les diagrammes de transformation temps-température sont plus significatifs.

On distingue deux types de diagrammes TTT, à savoir continus et isothermes. Selon que le refroidissement a lieu à partir de la température austénistique (juste en dessous de A_3) à une vitesse régulière, ou selon que l'on trempe d'abord la pièce d'acier à vitesse rapide jusqu'à une certaine température. Cette dernière étape est faite de tel sorte qu'aucune transformation ne se produise et qu'elle soit isotherme (à température constante) jusqu'à la transformation.

Figure 7 : Diagramme continu TTT d'un C 45.

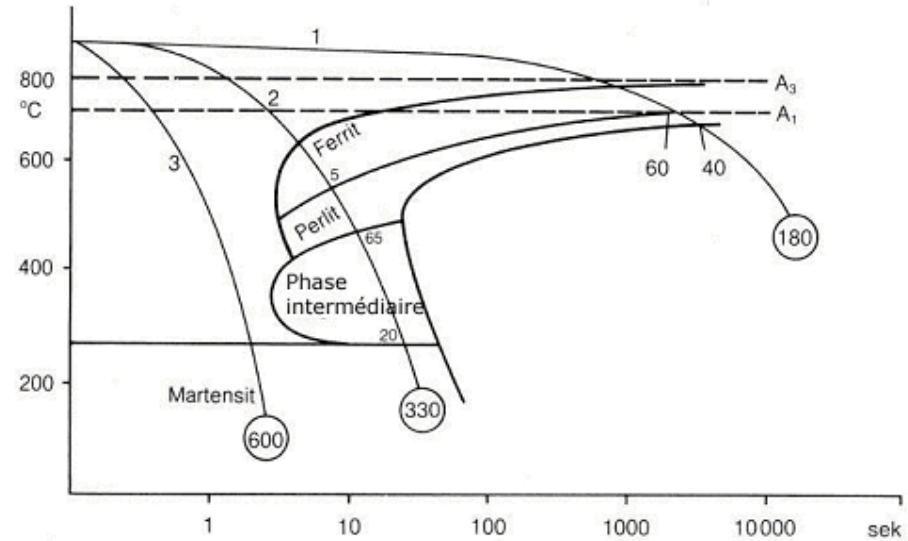
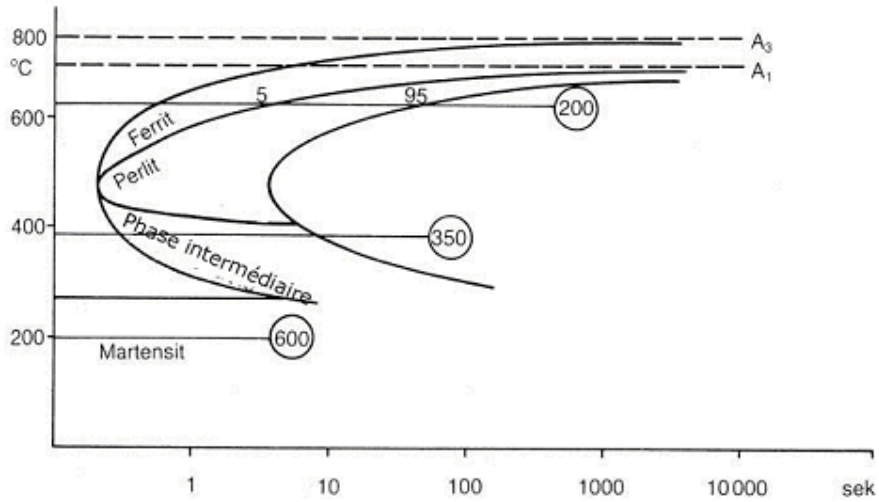


Figure 8 : Diagramme isotherme TTT d'un C 45



Les figures 7 et 8 montrent chacune un exemple pour un acier à environ 0,4 % de C. Dans les deux cas, le temps est indiqué en face de la température, sur une échelle logarithmique.

Dans le diagramme TTT *continu,* les processus au cours du refroidissement ne peuvent être lus que le long des courbes de refroidissement issues de la température austénitique (environ 820 °C). En l'occurrence, la courbe 1 signifie à un refroidissement très lent, la courbe 3 à un refroidissement rapide. Si l'on suit, par exemple, la courbe 1 qui concerne le refroidissement à l'air, on voit qu'au bout d'environ 1000 secondes, à environ 750 °C, l'austénite commence à se transformer en ferrite. Il apparaît environ 60 % de ferrite, les 40 % restants d'austénite se transforment ensuite en perlite à une température un peu plus basse. La dureté de la structure après ce traitement thermique qui correspond à la norme, est de 180 HV.

La courbe 2 correspond à un refroidissement à l'huile. Après environ 5 secondes, la transformation de l'austénite en ferrite commence à 650 °C, mais seulement pour 5 % de celle-ci, ensuite la majeure partie se transforme en perlite (65 %). Entre 550 et 300 °C, un taux de 20 % de structure intermédiaire apparaît et, à partir de 300°, encore 10 % de martensite. La dureté est maintenant de 330 HV. C'est seulement lors du refroidissement rapide à l'eau selon la courbe 3 qu'apparaît exclusivement de la martensite avec une dureté de 600 HV.

Les transformations dans le diagramme *isotherme* TTT doivent être lues à l'horizontale. Ainsi apparaissent à une température maintenue à 650 °C, 5 % de ferrite et 95 % de perlite avec une dureté de 200 HV ; à 400 °C exclusivement une structure intermédiaire, avec une dureté de 350 HV et à 200 °C seulement de la martensite avec une dureté de 600 HV.

En comparant les deux diagrammes, on constate qu'une transformation *complète* en perlite ou en structure intermédiaire n'est possible que lors d'un refroidissement isotherme. Pour les aciers alliés, le diagramme TTT se modifie principalement dans la mesure où les zones de perlite et de structure intermédiaire se séparent nettement l'une de l'autre et les temps d'action sont prolongés dans les deux zones. Ces structures peuvent être déterminées ainsi même en cas de refroidissement continu. De toute façon, un diagramme TTT n'est valable que pour une certaine qualité d'acier, alors que le diagramme fer-carbone est applicable pour tous les aciers non alliés.

Quelques autres procédés de traitement thermique importants peuvent être expliqués très clairement grâce au diagramme TTT.

On effectue un patentage (courbe 1 de la figure 9) pour rendre le fil d'acier plus résistant à la traction lors son étirement ultérieur. Pour cela, on le trempe, à partir de la température austénistique, dans un bain de plomb ou de sels à environ 500 °C et on l'y maintient jusqu'à transformation complète en perlite à fines lamelles (sorbite ; patentage en bain). Pour le patentage à l'air, on part d'une température nettement supérieure à A_3, on refroidit en continu à l'air et on obtient la même structure. Pour la *trempe en bain chaud* (courbe 2, figure 9), l'acier est trempé dans un bain salin ou métallique dont la température se situe juste en dessous de la température martensitique (environ 200 à 250 °C). Pendant le temps de maintien, les tensions dues à la trempe s'équilibrent dans une large mesure, de sorte que les risques de distorsion et de fissuration sont réduits. Avant de parvenir à une transformation en structure intermédiaire, on continue à refroidir à l'huile ou à l'air et c'est alors seulement que la martensite se forme.

Lors de *l'affinage intermédiaire (*courbe 3, figure 9), on trempe également dans un bain salin ou métallique dont la température se situe dans une fourchette contenant la phase intermédiaire. Le risque de fissuration lors de la trempe se réduit alors aussi de façon notable. On peut dès lors se passer d'un recuit ultérieur. Outre une dureté importante, la structure bainitique assure une excellente ténacité.

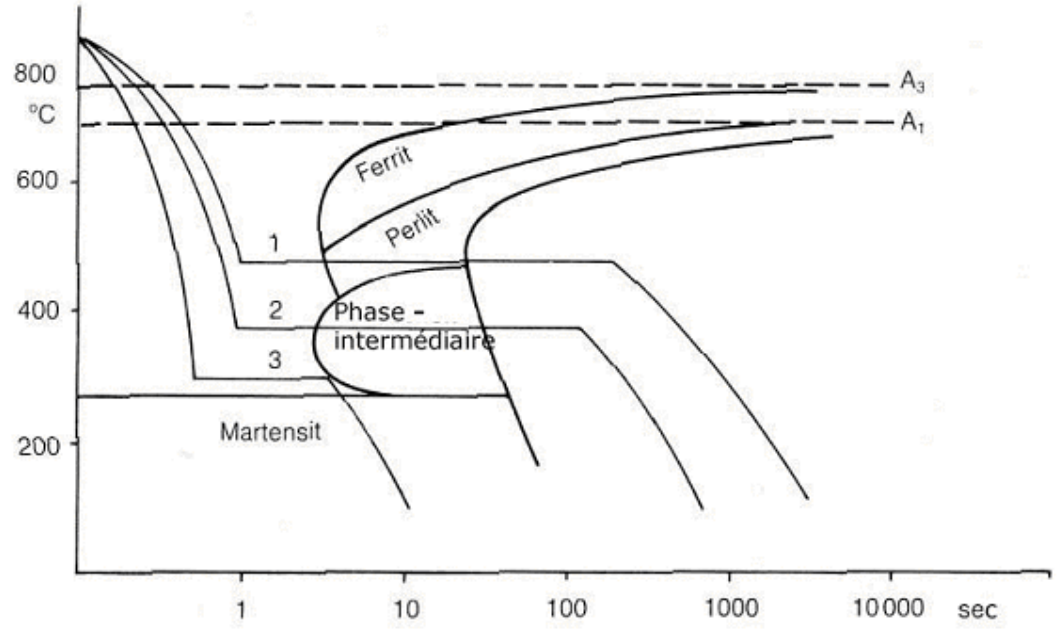



Figure 9: Quelques procédés de traitement thermique dans le diagramme TTT.