

PLAN DE COURS:

Traitement Thermique

Rédigé par:

YOUNES R.

Unité d'enseignement: UEM 1.2

Matière: Traitement Thermique

Crédits: 3

Coefficient: 2

Objectifs de l'enseignement:

- Mettre en oeuvre les principaux traitements thermiques et les principales techniques expérimentales pour l'étude des transformations structurales des alliages métalliques
- Mettre en évidence les modifications des propriétés et la valorisation des matériaux obtenues à l'issue des traitements
- Mettre en évidence les corrélations entre les comportements, les traitements et les structures.

Connaissances préalables recommandées:

Thermodynamique (compréhension des diagrammes d'équilibre et de phase, thermochimie), notions de mécanique. Métaux et alliages

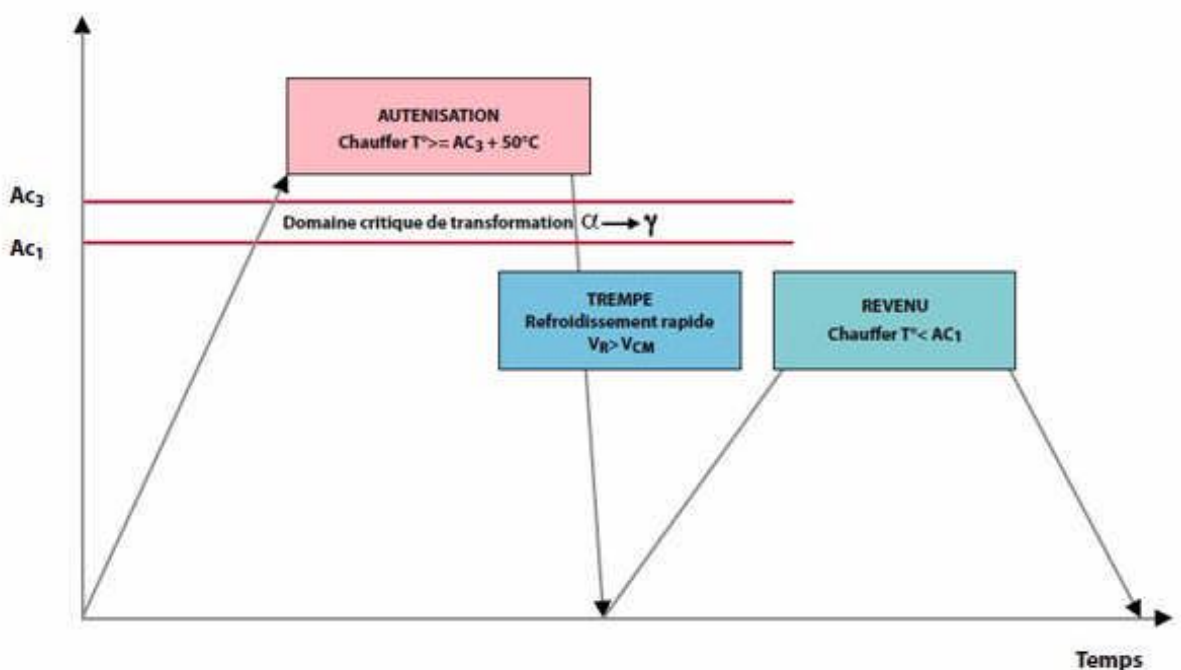
PREFACE

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

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

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

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

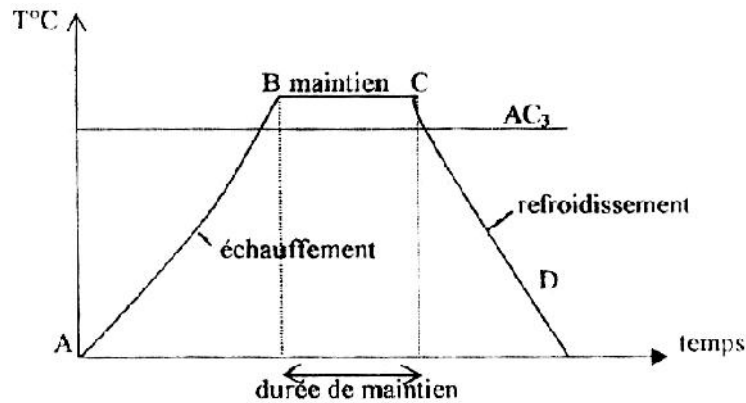


c. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

Cet ouvrage traite les fondements technologiques des traitements thermiques des aciers. Il expose en détail les aspects purement métallurgiques des traitements thermiques. L'étudiant aura à s'imprégner de l'ensemble des techniques et modes des traitements thermiques ainsi que les transformations structurales et modification des caractéristiques qui les accompagnent.

1.1. Définitions et procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (fig. 1).



1.1.1. Chauffage des pièces

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces.

a. Par transmission de la chaleur :

On distingue trois possibilités :

- 1- conductibilité
- 2- convection
- 3- rayonnement

b. Par production de la chaleur dans la pièce

Cette méthode est utilisée surtout pour les pièces à sections petites et uniformes. On peut obtenir des vitesses de chauffage très élevées. Par exemple pour une pièce de section \emptyset 150 mm, la durée de chauffage pour atteindre $T = 1200^\circ\text{C}$ est de :

- 20 mn pour le chauffage par induction.
- 8 mn pour le chauffage par résistance.
- 2 à 3 heures pour le chauffage dans un four.

Cette méthode est rentable seulement pour des sections inférieures à 150 mm.

Quelque soit le procédé de chauffage utilisé, il existe toujours une différence de température dans les différentes parties de la pièce. Répartition de la chaleur non uniforme.

Durant le chauffage, on distingue trois étapes :

a. Durée de préchauffage : C'est le temps de début de chauffage jusqu'à ce que la température nominale est atteinte à la surface de la pièce.

b. Durée de chauffage de pénétration ou d'égalisation : C'est le temps nécessaire pour atteindre la température nominale à la surface et au cœur de la pièce.

c. Durée de maintien : C'est le temps nécessaire pour maintenir la pièce à une température, et à partir de la température atteinte dans le cœur.

Les facteurs principaux, qui influent sur le chauffage de la pièce sont le diamètre (épaisseur), conductibilité, température du four, etc. En général le régime de chauffage pour les aciers est déterminé selon le diamètre de la pièce et les caractéristiques qui sont définis par le carbone équivalent :

$$C_{\text{équivalent}} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + V + \frac{Si - 0,5}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Ti}{5} + \frac{Al}{10}$$

Pour des teneurs maximales jusqu'à : 0,9 % C, 1,1 % Mn, 1,8 % Cr, 0,5% Mo, 5,0 % Ni, 0,25% V, 1,8% Si, 2% W, 0,4 %Ti, 2% Al, et selon RUHFUS et PLFAUME, il est possible de déterminer la durée de chauffage de la pièce en dépendance de son diamètre et du carbone équivalent (C_{eq}).

Les paliers représentés sur les courbes (fig. 2) ont pour but de diminuer la différence de température entre le cœur et la couche extérieure de la pièce (égalisation de la température). Ces courbes sont valables pour des chauffages de trempe et de recuit de normalisation.

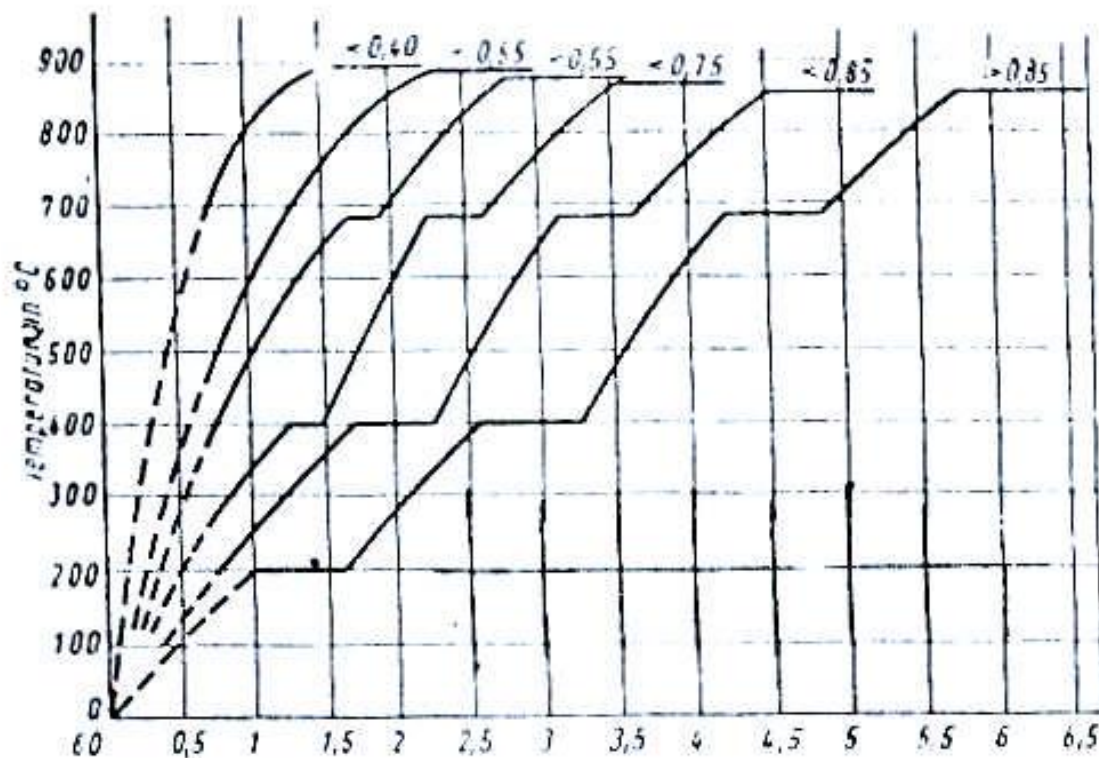


Figure 2: Temps de chauffage en min, recommandés pour revenu normal et trempe en dépendance de C_{eq} pour une pièce de diamètre 60 mm.

1.1.3. Types de fours et leurs atmosphères

a. Fours à sole :

Dans les fours à sole, le chauffage se fait surtout par rayonnement et ils présentent une chambre dans laquelle on met la pièce à chauffer. Dans certains cas une deuxième chambre située au dessus de la première et récupérant une partie de la chaleur formée, sert comme chambre de préchauffage.

b. Fours à bain de sels :

Ils présentent les avantages suivants :

- rapidité de chauffage : car la pièce est en contact sur toutes ses faces avec le sel liquide en mouvement permanent.
- Uniformité de chauffage : les écarts de température entre les différents points du bain sont très faibles, la pièce s'échauffe régulièrement, ce qui diminue l'importance de déformation.

c. fours électrique

Les fours électriques peuvent être à sole ou à bain de sel. Ils sont chauffés le plus souvent par résistances métalliques en nickel-chrome pour des températures ne dépassant pas 1000°C et en silicium pour des températures de 1300°C. Les fours électriques à bain de sel à haute température sont à électrodes, le sel fondu formant résistance entre celles-ci.

d. Atmosphères :

Lorsque les pièces sont chauffées jusqu'aux hautes températures dans ces fours à flammes ou dans les fours électriques, les gaz entrent en réaction avec la surface du métal, ce qui entraîne l'oxydation ou la décarburation des couches superficielles des pièces.

- L'oxydation résulte de l'interaction du métal avec l'oxygène ou la vapeur d'eau se trouvant dans le milieu du four. En général, le dioxyde de carbone CO_2 réagit avec le fer en l'oxydant.

e. Critères industriels de choix des traitements thermiques

Les besoins fonctionnels des pièces définissent ou orientent vers des choix de traitements de renforcement qui peuvent ne pas être uniques. Le choix pourra être et sera souvent orienté également par des considérations industrielles.

Nous évoquerons dans la suite du document six critères qui doivent être pris en compte dans le contexte industriel de grande série :

- flux tendu ;
- coût et productivité ;
- flexibilité ;
- reproductibilité ;
- environnement ;
- maîtrise dimensionnelle.

5. Principales applications industrielles

5.1 Traitements dans la masse

5.1.1 Recuits

Ces opérations sont destinées à donner un état de référence soit pour les opérations ultérieures, soit parfois pour l'utilisation finale.

| Pour les aciers

- On effectue dans certains cas, chez l'aciériste un recuit d'adoucissement pour que la barre soit cisailable à froid : c'est surtout le cas pour les barres de petites dimensions en acier faiblement allié à refroidissement trop rapide.
- Le développement du forgeage à froid peut imposer également des opérations de globulisation, assez coûteuses. On recherche généralement soit l'utilisation d'acier à carbone assez bas, soit l'optimisation de la gamme de forgeage, et notamment le mi-chaud, pour éviter cette opération, qui a, de plus, un effet néfaste sur les traitements ultérieurs, particulièrement l'induction où le cycle rapide ne permet pas la remise en solution complète des carbures.

En forge à chaud, l'utilisation des recuits permet :

- d'assurer une structure d'usinage reproductible (normalisation pour les aciers au carbone, recuit isotherme pour les aciers faiblement alliés) ;
- d'assurer une structure initiale reproductible pour les traitements ultérieurs (et particulièrement l'induction où la marque de la structure initiale est déterminante) ;
- d'assurer des caractéristiques d'emploi.

5.1.2 Traitements bainitiques

Les traitements sont traditionnellement peu employés car dans leurs définitions classiques, ils font appel aux bains de sels. Plus récemment de nouvelles applications se sont développées,

par traitement direct en forge : vilebrequin en acier 35MnV7 : la structure bainitique est obtenue par refroidissement accéléré jusque vers 500°C, puis passage unitaire en tunnel jusqu'à la fin de la transformation bainitique :

on obtient ainsi une structure de bainite supérieure d'une résistance de l'ordre de 1 000MPa apte à la fois à la nitruration et à la trempe par induction et d'usinabilité satisfaisante.

Une approche analogue est également possible sur les fontes GS. La structure bainitique peut être obtenue soit à la coulée, mais avec des conséquences très néfastes sur l'usinage, soit sur ébauche mais à condition de maîtriser les déformations : la technologie de trempe au nitrate peut alors être remplacée par de la trempe à l'azote sous pression, suivie d'un palier isotherme.

1. Austénitisation

L'austénitisation a pour objet de mettre en solution le carbone et, éventuellement, les éléments d'alliage précipités sous forme de carbures. Pour ce faire, il est nécessaire de se placer dans les conditions où le carbone est soluble dans le fer c'est-à-dire de provoquer, par chauffage, la transformation du fer α en fer γ .

Rappelons que l'examen des diagrammes d'équilibre montre que les carbures précipités après solidification ou formage à chaud peuvent être de la cémentite (dans les aciers non alliés), de la cémentite substituée (dans les aciers peu alliés) ou être formés à partir d'éléments carburigènes (dans les aciers alliés) et qu'alors leurs conditions de mise en solution sont généralement fort différentes.

Dans le cadre des traitements thermiques dans la masse, l'austénitisation comporte deux étapes :

— un chauffage jusqu'à la température dite température d'austénitisation (et, de manière incorrecte, température de trempe) ;

— un maintien à cette température. Les conditions dans lesquelles ces deux opérations doivent être réalisées peuvent être définies à l'aide des diagrammes de transformation, mais ici ce sont surtout ces diagrammes tracés en conditions isothermes qui sont utilisés puisque

nous n'envisageons pas le cas des traitements thermiques avec chauffage superficiel. La figure 3 rappelle ce qu'est un tel diagramme pour un acier du type 35CrMo4.

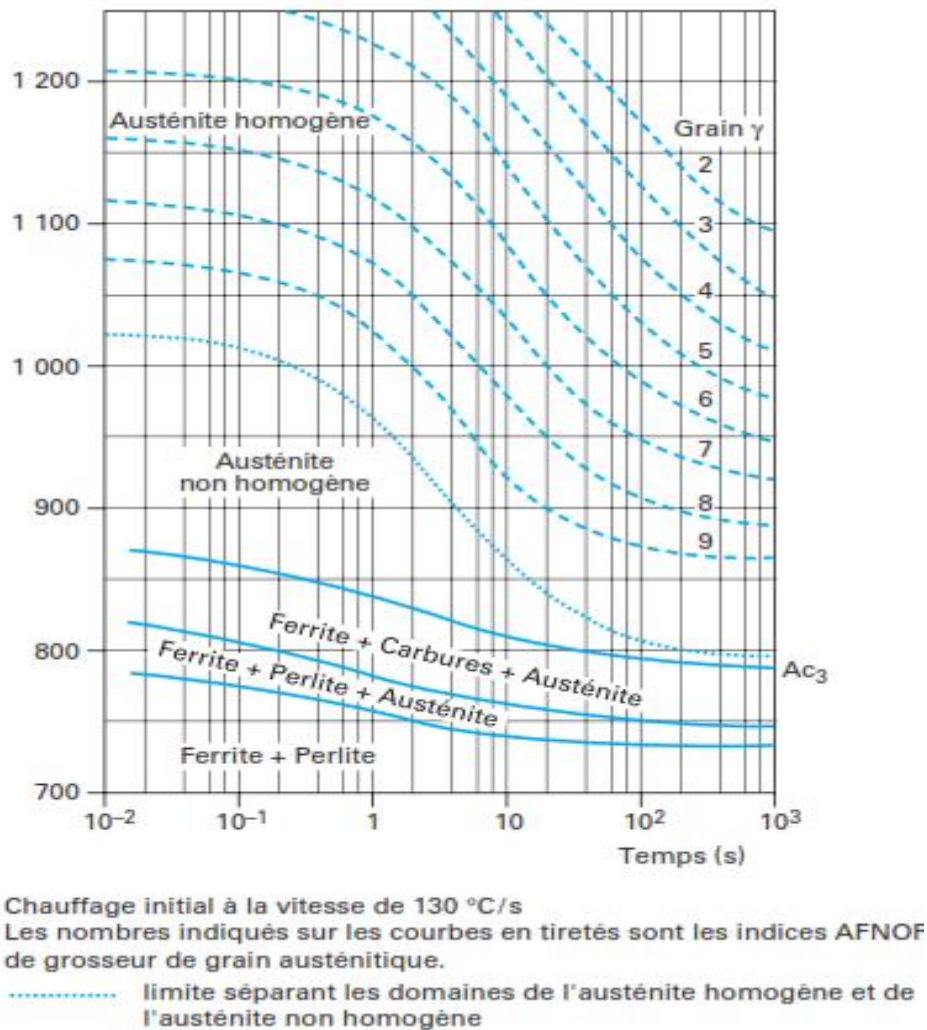


Figure 3 – Diagramme de transformation isotherme d'un acier 35CrMo4

5- Choix du couple température d'austénitisation-durée du maintien

Pour un acier peu allié, et le cas de la nuance 35CrMo4 en est un exemple (figure 3), on dispose d'une certaine latitude dans le choix du couple température/durée de maintien qui va définir les conditions d'austénitisation (globalement entre 1 000°C et 800°C-15 min) tout en évitant d'entrer dans un domaine de température où le grossissement des grains d'austénite devient sensible.

pour les aciers hypoeutectoïdes :

— austénitisation entre $Ac_3 + 25\text{ °C}$ et $Ac_3 + 50\text{ °C}$ (souvent, lors du traitement des aciers non alliés trempés à l'huile, on relève ces températures de 25 °C environ pour augmenter un peu la trempabilité en provoquant un léger grossissement des grains d'austénite) ;

— durée du maintien très souvent définie en fonction de la taille de la pièce chauffée et dans le but de parvenir à une mise en température uniforme.

Cette façon de faire découle du choix de température indiqué ci-dessus ($Ac_3 + 25\text{ °C}$ à 50 °C) ; la durée du maintien nécessaire (maintien qui ne débute que lorsque l'isothermie de la pièce est acquise, à la tolérance près admise dans la pratique pour l'écart de température entre peau et cœur) est alors très courte (quelques minutes suffisent, en général, pour les aciers hypoeutectoïdes non alliés et faiblement alliés). La relation empirique qui peut lier le temps nécessaire pour porter le cœur de la pièce à la température d'austénitisation et l'épaisseur de la pièce est propre à chaque équipement et ne peut donc être généralisée.

pour les aciers hypereutectoïdes :

— austénitisation vers $Ac_1 + 50\text{ °C}$ environ (ce dernier cas est surtout celui des aciers à outils, la quantité de carbone dissous dans l'austénite est suffisante pour obtenir un durcissement important, on évite le grossissement du grain austénitique, on limite la quantité d'austénite résiduelle subsistant après la trempe et on conserve des carbures non dissous, relativement grossiers, qui concourent à améliorer la résistance à l'usure et à l'abrasion).

— durée du maintien surtout définie en fonction de la quantité de carbone que l'on souhaite mettre en solution, puisque l'austénitisation est généralement réalisée à une température comprise entre Ac_1 et Ac_m et donc dans le domaine mixte : ferrite + carbures + austénite, en notant toutefois qu'une légère modification de la température d'austénitisation a, dans ce domaine, beaucoup plus d'influence qu'un changement de la durée du maintien.

Pour les aciers alliés contenant des éléments carburigènes, il faut tenir compte des conditions particulières de mise en solution des carbures, qui peuvent obliger à adopter une température d'austénitisation élevée et une durée de maintien assez importante.

2. Trempe

Rappelons que, pour les aciers considérés ici, la trempe a pour objet d'empêcher la précipitation du carbone au cours du retour depuis la température d'austénitisation jusqu'à la température ambiante, et cela dans la plus grande partie possible de la section de la pièce. Pour des raisons économiques (économie d'éléments d'alliage), on admet qu'une certaine proportion de bainite puisse se substituer à la martensite dans la mesure où le revenu est réalisé à une température supérieure à 500 °C .

Pour un acier donné, les deux facteurs qui vont conditionner le résultat de la trempe sont :

- la trempabilité de l'acier dans les conditions d'austénitisation adoptées ;
- les conditions de refroidissement de l'austénite.

Pour les procédés habituels de trempe, la trempabilité est caractérisée à l'aide des diagrammes de transformation en refroidissement continu (diagramme TRC) et indirectement, à l'aide des courbes Dureté (HV) = f (conditions de refroidissement) et, plus pratiquement, à l'aide des courbes Jominy.

Plus la trempabilité d'un acier est grande :

- plus est grande la section des pièces dans lesquelles, pour des conditions de refroidissement données, on peut provoquer la transformation martensitique à cœur ;

2.2 Conditions de refroidissement lors de la trempe

Dans la pratique, la trempe est généralement réalisée par immersion de la pièce dans un milieu qui extrait la chaleur contenue dans celle-ci, ce milieu peut être :

- gazeux : air, gaz (N₂, Ar, H₂, He, etc.) ;
- liquide : eau, huiles et bains de sels fondus (l'eau et les huiles peuvent contenir des additifs qui modifient leur pouvoir refroidissant) ;
- mixte : brouillard (gaz + liquide atomisé), lit fluidisé (gaz +solide pulvérulent).

Le milieu de trempe peut être plus ou moins agité (brassage) ou projeté (refroidissement par aspersion).

Le refroidissement en chaque point d'un volume d'acier dépend :

- des propriétés thermiques du métal ;
- de la géométrie de la pièce (forme, dimensions, etc.) ;
- de la position du point considéré dans la section de la pièce ;
- des propriétés thermiques du milieu de trempe et de certaines de ses propriétés physiques (viscosité notamment) ;
- de la température du milieu de trempe ;

La figure 5, empruntée à Beck [6], schématise les lois de refroidissement et les variations de la vitesse de refroidissement au cours du temps lors de trempes réalisées dans l'eau et dans une huile. La complexité de ces phénomènes et leur dépendance de nombreuses propriétés des fluides de trempe comme des conditions opératoires ont conduit à rechercher un moyen de caractériser globalement le pouvoir refroidissant des milieux de trempe.

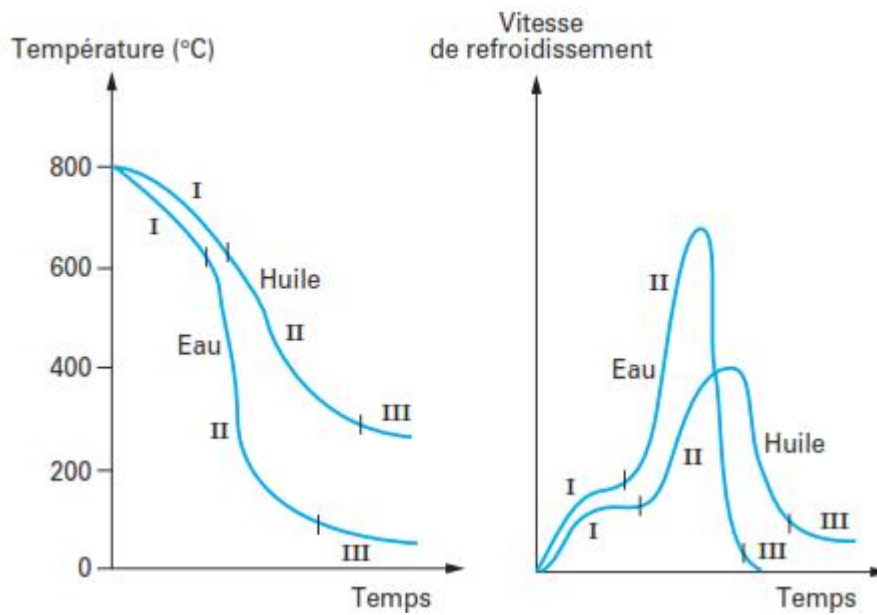


Figure 5 – Représentation schématique des lois de refroidissement et des variations de la vitesse de refroidissement en fonction du temps d'un cylindre de métal préalablement porté à 800 °C et trempé à l'eau ou à l'huile

2.2.3.1 Trempe à l'eau

L'eau constitue le milieu de refroidissement le moins cher qui permette, dans la pratique de tous les jours, de réaliser les refroidissements les plus énergiques.

Toutefois, il faut noter qu'au cours d'une trempe à l'eau la vitesse de refroidissement n'est pas constante et qu'elle est

maximale lorsque la température de surface de la pièce est voisine de 300 °C. Cette situation peut être responsable de la formation de taches et c'est la raison pour laquelle, lorsque le risque d'apparition d'un tel incident est trop grand, on préfère arrêter la trempe à l'eau lorsque la température de surface de la pièce est voisine de 200 – 400 °C pour poursuivre le refroidissement (et la transformation martensitique) dans des conditions moins sévères (huile ou air).

L'eau a l'avantage de faire éclater la calamine au début du refroidissement et donc de nettoyer la surface et d'améliorer l'échange thermique. Lorsque la géométrie de la pièce le permet, l'eau peut former facilement des bulles de vapeur prisonnières qui ralentissent localement le refroidissement du métal et donnent naissance à des points doux; la circulation de l'eau, l'agitation de la pièce ainsi que sa présentation doivent donc être adaptées.

Si la température de l'eau s'élève, son pouvoir refroidissant diminue très sensiblement (la période de caléfaction est prolongée).

Ainsi donc, l'exécution d'une bonne trempe à l'eau exige le contrôle permanent :

Par ailleurs, il est nécessaire d'éviter toute contamination de l'eau par des produits étrangers (sels notamment), qui changerait sa sévérité de trempe et empêcherait d'obtenir des résultats constants.

En revanche, il est possible de modifier volontairement le pouvoir refroidissant de l'eau en lui incorporant divers produits.

a) on augmente sa sévérité de trempe en mettant en solution des sels (NaCl, CaCl₂, par exemple) ; une telle addition présente l'avantage de décaler vers le haut (vers 500 à 600 °C) le domaine des températures de surface pour lesquelles la vitesse de refroidissement est maximale ;

b) on abaisse sa sévérité de trempe en lui ajoutant des polymères organiques dont la solubilité dans l'eau diminue quand la température s'élève [8]. Lors de l'immersion de la pièce, il se forme à sa surface un film visqueux qui ralentit le refroidissement ; ce ralentissement varie avec la proportion d'additif dissous dans l'eau ;

l'emploi de ce procédé exige le respect des précautions suivantes

:

- éviter l'échauffement du bain au-dessus de 40 °C ;
- contrôler régulièrement [8] la concentration en additif (ou mesurer le pouvoir refroidissant du liquide) afin de faire les ajustements nécessaires à l'obtention de résultats constants.

2.2.3.2 Trempe à l'huile

Il existe une très grande variété d'huiles de trempe [7] et [8] qui peuvent différer :

- par l'huile de base (minérale ou synthétique) ;
- par les additifs qu'elles contiennent, additifs qui ont pour objet soit de modifier le pouvoir refroidissant, soit d'améliorer certaines propriétés (notamment la résistance à l'oxydation).

Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante; elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée et généralement comprise,

suivant les propriétés de l'huile considérée, entre 400 et 600°C, soit à un niveau bien supérieur à celui correspondant

à la trempe à l'eau. La viscosité de l'huile diminue quand sa température augmente. Ce phénomène provoque une augmentation du pouvoir refroidissant. Il est donc nécessaire de contrôler en permanence la température du bain et de mettre

en œuvre un moyen de refroidissement. Il est important d'éviter l'introduction d'eau dans un bain d'huile, eau qui diminue les vitesses de refroidissement à haute température mais les augmente à basse température, c'est-à-dire dans les conditions

les plus critiques pour l'apparition de tapures. Enfin, l'utilisation de la trempe à l'huile impose la mise en œuvre de moyens de prévention et de lutte contre les incendies. Après trempe à l'huile, il est nécessaire de dégraisser les pièces

2.2.3.3 Trempe au gaz

2.2.3.4 Trempe au brouillard

2.2.3.5 Trempe en bain fluidisé

2.2.3.6 Trempe en bains fondus

2.7 Contrôle du résultat d'une trempe

Le résultat d'une trempe peut être apprécié en fonction :

- de la microstructure de l'acier, mais aussi à partir de la dureté qu'il a acquise (par comparaison avec la dureté de la martensite ayant la même teneur en carbone) ;
- de l'état physique de la pièce (surface et géométrie).

2.7.1 Contrôle de l'état structural

Il est nécessaire de remarquer ici que la partie de l'acier qui court le plus grand risque de ne pas avoir subi une trempe correcte est au cœur de la pièce. Le contrôle exige alors que soient réalisés des examens dans cette zone et, donc, qu'au moins une pièce soit détruite. Une telle intervention peut être envisagée lors de traitement de séries mais est irréalisable en dehors de ce type de cas. Il est alors conseillé de réaliser des tests sur des échantillons représentatifs prélevés dans le même métal que les pièces à traiter. Le contrôle de l'état structural peut comporter :

- l'examen métallographique de la structure de l'acier en peau (contrôle de l'état structural et de la décarburation) et, dans la masse, aux points où l'on souhaitait provoquer la transformation de l'austénite en martensite (et/ou en bainite). Au cours de cet examen, on peut apprécier la dimension des grains pour vérifier s'il n'y a pas eu surchauffe pendant l'austénitisation ;
- la mesure de la dureté (cf. [M 123]) en différents points de la peau (vérification de l'uniformité du refroidissement) et, dans la

masse, aux points où le durcissement par trempe devait être provoqué : la confrontation des résultats obtenus avec la courbe

Jominy de l'acier

— la mesure du grain de cassure dans les zones totalement martensitiques, qui permet de contrôler la grosseur des grains d'austénite et donc de vérifier s'il ne s'est pas produit un grossissement anormal de ces derniers.

2.7.2 Contrôle de l'état physique

Ce contrôle a pour objet :

- la vérification de l'absence de tapures (examen optique, ressuage, magnétoscopie...
- la vérification des déformations et distorsions subies par la pièce.

3. Revenu

Appliqué aux aciers au carbone alliés ou non alliés, après une trempe martensitique et/ou martensito-bainitique, le revenu a pour objet de provoquer une précipitation du carbone sous une forme et dans des conditions contrôlées afin de parvenir au durcissement optimal. Cette opération engendre une évolution structurale depuis l'état métastable obtenu après trempe vers un état plus proche de l'équilibre physico-chimique. Éventuellement, ce revenu peut provoquer la transformation de l'austénite résiduelle en bainite pendant le maintien ou en martensite secondaire au cours du refroidissement final.

Différents types de revenu (après trempe)

On distingue le revenu de détente, le revenu habituel) et le revenu de durcissement secondaire. Le revenu dit de détente est généralement réalisé à une température comprise entre 180 et 220 °C;

il ne fait intervenir que le premier stade du revenu et n'est donc appliqué qu'à une structure totalement martensitique. Il provoque une précipitation généralement incomplète (suivant la température) du carbone sous forme de carbure, ce qui engendre simultanément une diminution des contraintes propres existant à l'échelle de la maille quadratique de la martensite.

Un tel revenu ne provoque qu'une faible baisse de la résistance à la traction et de la dureté ; par contre, il augmente très sensiblement la limite d'élasticité et améliore un peu le niveau des caractéristiques de ductilité. Il est donc réalisé lorsque les conditions d'emploi exigent la conservation des caractéristiques de résistance à leur niveau le plus élevé sans imposer de contrainte en ce qui concerne la ductilité. Ne provoquant pas de

transformation de l'austénite résiduelle (si ce n'est sa stabilisation), il peut être précédé d'un traitement par le froid si l'on veut disposer du durcissement maximal.

‡ Le revenu que nous qualifions d'habituel ou de banal est réalisé à une température comprise entre 500 et 575 °C environ et provoque la précipitation complète du carbone sous forme de cémentite FeC ou de cémentite MC substituée (M pouvant être à Cr, Mo... se substituant partiellement aux atomes de Fe).

Suivant la température de revenu, ces carbures sont plus ou moins fins, dispersés et durcissants ou globulisés, coalescés et peu durcissants. Ainsi donc, suivant la température de revenu, dans le domaine considéré, on provoque une baisse plus ou moins forte des caractéristiques de résistance mais aussi un relèvement très sensible des caractéristiques de ductilité.

‡ Le revenu de durcissement secondaire est réalisé à une température comprise entre 600 et 675 °C environ et provoque, dans les aciers contenant des éléments d'alliage carburigènes la précipitation complète du carbone sous forme de carbures spéciaux comme Cr₇C₃, Cr₂₃C₆, Mo₂C, V₄C₃... ou, parfois, de carbures spéciaux légèrement substitués (des atomes de fer se substituant partiellement aux atomes des éléments carburigènes). Précipités vers 600 °C, ces carbures sont très fins, dispersés et durcissants ou, précipités à plus haute température, ils sont globulisés, coalescés et peu durcissants. Il est possible ainsi de provoquer un durcissement parfois important (selon les teneurs en carbone et éléments carburigènes) accompagné d'une baisse des caractéristiques de ductilité.

Ce type de revenu est particulièrement effectué sur les pièces devant travailler à haute température (il stabilise les performances et évite qu'elles ne diminuent en service).

Les revenus effectués à des températures comprises entre 500 et 650 °C provoquent la transformation de l'austénite résiduelle :

- soit directement en bainite au cours du chauffage ;
- soit indirectement (cas de certains aciers très alliés) en martensite secondaire formée au cours du refroidissement après revenu,

l'austénite résiduelle ayant été déstabilisée pendant le maintien à la température de revenu.

Les revenus doivent s'achever par un refroidissement assez rapide jusqu'à une température voisine de 400 °C pour éviter tout risque d'apparition de la fragilité réversible de revenu. Cette énumération des différents types de revenus montre qu'il n'est pas habituel de réaliser un revenu à des températures comprises entre 200 et 500°C.

Cette situation est due aux risques de fragilisation que l'on peut rencontrer dans ce domaine :

- entre 200 et 400 °C par décomposition de l'austénite résiduelle en bainite, transformation dont il faut noter qu'elle apporte un gain de résistance ;
- entre 400 et 500 °C par apparition de la fragilité réversible de revenu.

3.2 Choix des conditions de revenu après trempe

Le choix des conditions de revenu commence par la définition du type de revenu qui est réalisé en fonction des options prises lors de la fixation des propriétés recherchées :

- si l'on veut conférer à l'acier sa dureté maximale alors que les conditions de service n'imposent pas l'obtention d'une certaine ductilité,

on effectue un revenu de détente à la température la plus élevée, dans l'intervalle 180 – 220 °C, compatible avec les exigences de dureté ;

- si l'on doit parvenir à un compromis bien déterminé entre le niveau, conservé assez haut, des caractéristiques de résistance et un niveau cependant élevé des caractéristiques de ductilité, on réalise un revenu banal. On choisit la température en fonction des caractéristiques mécaniques visées en utilisant les documents mentionnés ci-avant.

- si l'acier contient des éléments carburigènes,

on peut réaliser un revenu de durcissement secondaire et, ici encore, on choisit la température en fonction des caractéristiques mécaniques visées en utilisant les documents mentionnés ci-

avant. Et cela en recherchant, par élévation de la température au-dessus de 600 °C, le bon compromis entre le niveau des caractéristiques de résistance et le niveau des caractéristiques de ductilité.

La détermination de la durée du maintien se fait à partir des durées correspondant aux documents utilisés pour choisir la température de revenu. On doit tenir compte ici du fait que la périphérie d'une pièce subit toujours un maintien à la température de revenu plus long que celui auquel est soumis le cœur, la différence représentant le temps qui s'écoule entre le moment où la peau de la pièce atteint la température de revenu et celui où le cœur parvient à cette même température. Cette différence est d'autant plus grande que le chauffage est plus rapide et la section de la pièce plus importante. On a donc intérêt à éviter un chauffage rapide.

Exercice n° 1

Vous disposez d'un acier (alliage « fer – carbone ») dont vous ignorez la teneur en carbone. Cependant, après avoir chauffé cet acier à 850 °C et l'avoir laissé refroidir lentement au four jusqu'à la température ambiante (20 °C), vous constatez, sur une métallographie de cet acier, qu'il contient 91,3 % de ferrite et 8,7 % de cémentite Fe₃C. Comme vous disposez du diagramme d'équilibre « fer – carbone » (voir en annexe), il vous est alors aisé de répondre aux questions suivantes :

- a) Quelle est la composition nominale C₀ (%m) en carbone de cet acier ?
- b) À 724 °C, quelles sont les phases en présence, leur composition (en %m C) et leur fraction massique respective (en %m) ?
- c) Quelle est la fraction massique de perlite présente dans l'acier à la température ambiante, à la fin du refroidissement lent ?

Connaissant maintenant la composition nominale de l'acier, vous mettez la main sur son diagramme TTT (voir en annexe) et vous êtes en mesure de prévoir les constituants présents dans cet acier qui, après avoir complètement été austénitisé à 850 °C, aura subi les traitements thermiques suivants :

- 1) Trempe à 700 °C et maintien à cette température pendant 100 s, refroidissement quelconque jusqu'à l'ambiante.
 - 2) Trempe à l'eau à 20°C.
 - 3) Trempe à 400 °C, maintien à cette température pendant 20 s et trempe à l'eau à 20°C.
- d) Quels sont les constituants présents dans l'acier et la dureté de l'acier après chacun de ces traitements ?

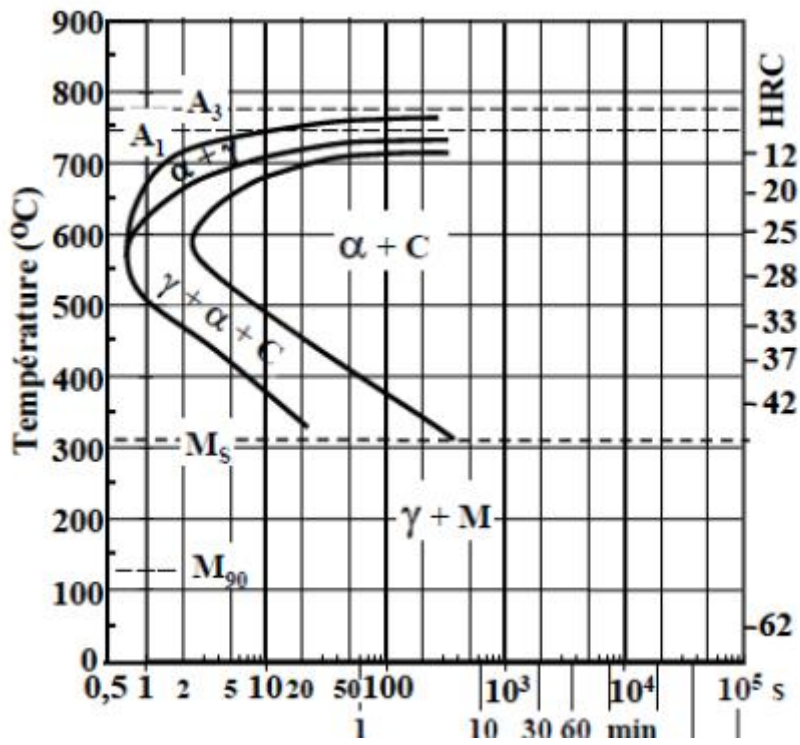
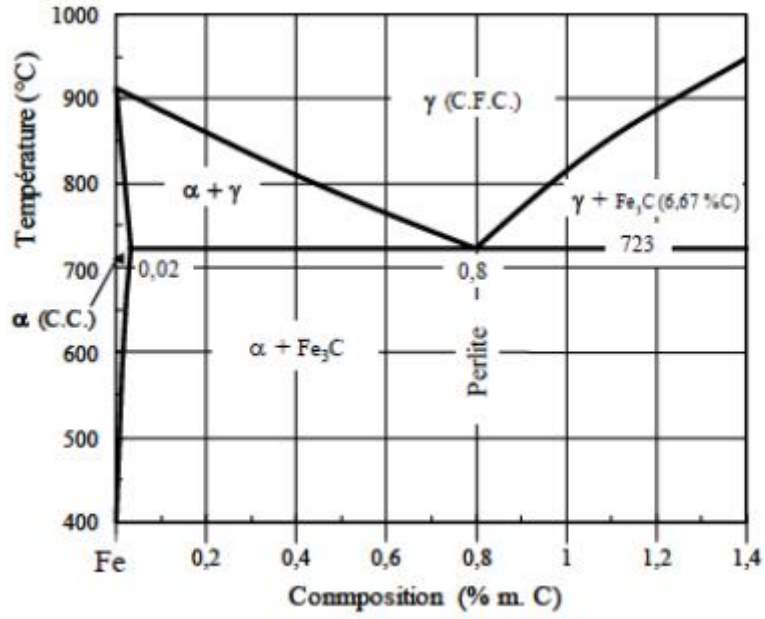


Diagramme Fer-carbone et courbes TTT de l'acier

Corrigé

Exercice n° 1

a) Composition nominale de l'acier en carbone. Connaissant la valeur des fractions massiques soit de ferrite (f), soit de cémentite (f_{Fe_3C}), on applique la règle des bras de leviers afin d'en déduire la composition nominale C_0 de l'acier. En raisonnant par exemple avec la ferrite, on obtient ainsi :

$$f = (C_{Fe_3C} - C_0) / (C_{Fe_3C} - C) \quad C_0 = C_{Fe_3C} - f (C_{Fe_3C} - C)$$

A température ambiante, la solubilité du carbone dans la ferrite est négligeable et $C \cong 0$.

$$\text{Donc } C_0 \cong C_{Fe_3C} - f (C_{Fe_3C}) = 6,68 - (0,913 \times 6,68) = 0,58 \% \text{ m C}$$

b) Phases en présence à 724 °C

Phase	Composition (%C)	Proportion (%m)
Austénite (γ)	0,8	71,9
Ferrite (α)	0,002	28,1

c) Fraction massique de perlite à 20 °C

La perlite se forme à 723 °C au cours de la réaction eutectoïde que subit l'austénite présente à 724 °C.

Par conséquent la fraction massique de perlite est égale à la fraction massique d'austénite présente à 724 °C et calculée à la question ci-dessus.

$$f_P = 71,9 \% \text{ m d)}$$

Constituants et dureté de l'acier après traitement thermique

Traitement	Constituants	Dureté (HRC)
1	Ferrite	14
	Perlite grossière	
2	Martensite	62
3	Bainite	ND
	Martensite	