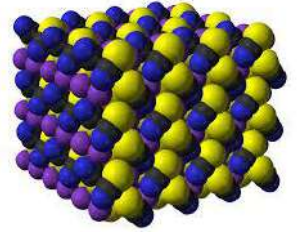


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 20 août 1955-Skikda
Faculté de Technologie
Département de Génie mécanique



Polycopié de cours

Traitements thermiques

Pour Master 1 Génie des matériaux



Préparé et enseigné par
Dr : Benzerouk HAYET

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

Dr. H. Benzeroual (Univ-20 Aout 1955 Skikda)

Avant-propos

Le cours "Traitements thermiques" ; décrit en détail les techniques les plus courantes utilisées dans le traitement thermique, soit superficiel ou en masse. Il est considéré comme un module de base car il étudie comment améliorer les propriétés mécaniques des matériaux en fonction de la demande de l'industrie.

*Il est adressé aux étudiants de **Master 1** spécialité **Génie des matériaux***

Ce cours est divisé en cinq chapitres

Le premier chapitre traite de l'acier, de ses propriétés et de sa cristallisation en fonction du pourcentage de carbone et de la température de traitement

Quant au deuxième chapitre, il s'agit d'une généralisation liée à la définition du traitement thermique, de son objet et de ses types, qui ont été expliqués précisément dans les troisième et quatrième chapitres.

Le cinquième chapitre, qui est considéré comme un travail appliqué sur le durcissement d'un acier

En plus de deux annexes, ou la première traite un modèle de TP sur la trempe, tandis que la seconde comprenait des diagrammes de TTC, TRC et TTT

Les objectifs assignés par ce programme portent sur l'initiation des étudiants à utiliser 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

Avant-propos

I.Chapitre I : Les aciers	1
I.1Introduction.....	1
I.2Définition.....	1
I.3Propriétés et utilités.....	2
I.4Cristallisation du fer.....	3
I.5Les différents systèmes de cristallisation ou formes allotropiques du fer.....	4
I.6Les différents points de transformations des aciers.....	6
I.6.aLes composants et solutions :.....	7
I.6.bLes agrégats :.....	7
I.7Conclusion.....	7
II.Chapitre II : Généralités sur les traitements thermiques	8
II.1Introduction.....	8
II.2Définition.....	8
II.3Catégories des traitements thermiques.....	8
II.4Le but de traitement thermique.....	9
II.5Les paramètres principaux de traitement thermique.....	10
II.6Cycle thermique.....	10
II.7Chauffage des pièces.....	11
II.7.aPar conductibilité.....	11
II.7.bPar convection :.....	11
II.7.c Par rayonnement :.....	11
II.7.dPar production de la chaleur dans la pièce.....	11
II.8Types de fours.....	11
II.9Refroidissement des pièces.....	13
II.10Protocole et consignes de sécurité.....	13
II.11Les avantages et les inconvénients des traitements thermiques.....	14
II.12Caractérisations après traitements thermiques.....	15
II.12.aEtude microstructurale.....	15
II.12.bPropriétés mécaniques.....	15
II.13Conclusion.....	17
III.Chapitre III : Traitements thermiques dans la masse	18
III.1Introduction.....	18
III.2La trempe.....	18
III.2.aHistorique.....	18
III.2.bDéfinition.....	19

III.2.cLes caractéristiques de mise en œuvre.....	20
III.2.dPrincipe.....	20
III.2.eLe maintien.....	20
III.2.fLe refroidissement.....	20
III.2.gInfluence de la trempe sur les propriétés mécaniques.....	22
III.2.hDifférents types de trempe.....	23
III.2.iDéfauts de trempe.....	24
III.3Le Revenu.....	24
III.3.aDéfinition.....	24
III.3.bPrincipe.....	25
III.3.cCycle thermique.....	26
III.3.dEvolution des propriétés au cours de revenu.....	26
III.3.eTrempe revenue.....	28
III.3.fDifférents types de revenu :.....	29
III.4Le Recuit.....	29
III.4.aDéfinition.....	29
III.4.bPrincipe.....	30
III.4.cCycle thermique.....	30
III.4.dBut de recuit.....	31
III.4.eDifférents types de recuit.....	32
III.4.fAvantages et inconvénients du recuit.....	35
III.5Conclusion.....	35
IV.Chapitre IV : Traitements thermiques superficiels.....	37
IV.1Introduction.....	37
IV.2Définition.....	37
IV.3Trempe superficielle ou localisée.....	37
IV.3.aPrincipe.....	38
IV.4Traitements thermochimiques.....	40
IV.4.aCémentation (C).....	41
IV.4.bNituration.....	45
IV.4.cCarbonituration.....	48
IV.5Matériaux traités.....	49
IV.6Conclusion.....	50
V.Chapitre V : Comment durcir un acier.....	51
V.1Introduction.....	51
V.2Chauffer l'acier.....	51
V.3Refroidir l'acier.....	53

Sommaire

V.4Effectuer le revenu	55
V.5Avertissements	56
V.6Éléments nécessaires	56
V.7Mesures de sécurité	56
VI. Annexe :TP Traitements thermiques (la trempe).....	57
VI.1Rappel théorique	57
VI.1.aIntroduction	57
VI.1.bQuels sont les différents types d'un traitement thermique	57
VI.1.cQuels sont les éléments d'un traitement thermique ?	57
VI.1.dQuelles sont les caractéristiques de mise en œuvre ?	57
VI.2Objectifs	57
VI.3Equipements utilisés	57
VI.4Etude expérimentale	58
VI.4.aDurcissement par trempe	58
VI.4.bPréparation des échantillons	58
VI.4.cConclusion	60
VII. Annexe :2 Diagrammes TTC, TRC et TTT.....	61
VII.1Diagramme de phase fer-carbone (TTC)	61
VII.2Diagramme de refroidissement TRC	62
VII.3Diagramme TTT	64

Bibliographie

Liste des figures

Figure I 1 L'influence de teneur de carbone sur les propriétés d'acier..... 2

Figure I 2 Structure cristalline de fer..... 4

Figure I 3 Diagramme de phase Fer-Carbone..... 5

Figure I 4 Différents systèmes de cristallisation du fer..... 6

Figure II 1 Les grandes catégories de traitements thermiques.....9

Figure II 2 Diagramme de base de traitement thermique.....10

Figure II 3 Différents types de fours.....12

Figure II 4 Equipements de protections.....14

Figure II 5 Dispositif expérimental de l'usure.....16

Figure III 1 La Forge de Francisco Goya, 1819(droite) et Un forgeron ivoirien en pleine activité à Ferké (ville du nord de la Côte d'Ivoire (gauche).....19

Figure III 2 Procédure de la trempe.....20

Figure III 3 Cycle thermique de la trempe.....21

Figure III 4 Trempe sélective de couteaux.....22

Figure III 5 Exemple de lame en acier ayant subi une trempe mais sans revenu, elle représente des fissures ..25

Figure III 6 Cycle thermique du revenu.....26

Figure III 7 Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu de quelques métaux27

Figure III 8 Cycle complet (trempe, revenu).....28

Figure III 9 Cycle Thermique du recuit.....31

Figure III 10 Différents types de recuit.....33

Figure IV 1 Systèmes de chauffage par INDUCTION.....38

Figure IV 2 Systèmes de chauffage par CHALUMOU39

Figure IV 3 Systèmes de chauffage par LASER.....40

Figure IV 4 Procédure de cémentation solide.....42

Figure IV 5 Procédure de cémentation liquide.....43

Figure IV 6 Cémentation par gaz.....44

Figure IV 7 Four de nitruration gazeuses.....46

Figure IV 8 Nitruration ionique (four sous vide).....47

Figure IV 9 Couche nitrurée superficiellement.....48

Liste des figures et tableaux

Figure IV 10 Procédé de carbonitruration.....	49
Figure V 1 Manipulation de chalumeau.....	52
Figure V 2 Changement de couleur de l'acier pendant le chauffage.....	53
Figure V 3 Milieux de refroidissement.....	54
Figure V 4 Four de revenu.....	55
Figure VII 1 Diagramme de phase fer-carbone sous une atmosphère.....	61
Figure VII 2 Exemple de Diagramme DRC d'un acier 30NiCr11.....	62
Figure VII 3 Exemple de Diagramme DRC d'un acier 35 CD 4.....	63
Figure VII 4 Diagramme TTT pour un acier de composition donnée.....	64

Liste des tableaux

Tab I-1 Les différents types d'alliages.....	3
Tab IV-1 Traitements thermiques en fonction des éléments diffusants.....	50

I. Chapitre I : Les aciers

I.1 Introduction

Les alliages d'acier sont constitués de fer et de carbone, souvent ajoutés de manganèse, de nickel, de chrome, de molybdène, de vanadium, etc.

Différentes classifications et noms d'aciers sont possibles, en fonction des normes européennes (EN) ou américaines (AISI, ATSM) ou internationales (ISO). Ces différentes catégories sont toutes fondées sur la composition chimique (carbone, éléments d'alliage, etc.) et sur les caractéristiques mécaniques des alliages fer-carbone.

L'acier est sélectionné en fonction de son usage et de ses caractéristiques mécaniques et chimiques. On ajoute des éléments d'alliage au mélange fer-carbone afin de modifier les caractéristiques de l'acier et d'obtenir un matériau qui possède les caractéristiques nécessaires.

I.2 Définition

La solution de carbone solide (moins de 2 %) dans le fer, l'acier, peut être durci par trempe.

L'impact de la présence de carbone sur les caractéristiques de l'acier :

- > 2,14 % : alliage fragile, on parle de « fer »
- < 0,008 % : microstructure fragilisée, on parle de « fonte »

L'augmentation de la teneur en carbone entre ces deux valeurs améliore la résistance mécanique et la dureté de l'alliage ; on parle d'aciers "douces, mi- douces, mi-dures, extrêmement dures" (Figure I.1).

L'acier est un alliage composé de fer et qui renferme du carbone, ainsi que d'autres éléments chimiques ajoutés volontairement (additifs, accompagnants) ou non (impuretés).

Les éléments d'addition sont ajoutés de manière intentionnelle pour conférer au matériau les propriétés recherchées. Il s'agit principalement du manganèse (Mn), du chrome (Cr), du nickel (Ni) et du molybdène (Mo).

Les éléments d'accompagnement sont utilisés par l'aciériste en vue de maîtriser les diverses réactions physico-chimiques nécessaires pour obtenir un acier conforme à la spécification. C'est le cas d'éléments comme l'aluminium, le silicium, le calcium.

Les impuretés sont des éléments originellement présents dans les ingrédients de haut fourneau qui serviront à produire la fonte qui servira à fabriquer l'acier. Ce sont le soufre (S) et le phosphore (P) présent dans le coke mais aussi le plomb (Pb) et l'étain (Sn) qui peuvent être présents dans les aciers de récupération ainsi que nombre d'autres éléments à bas point de fusion comme l'arsenic (As) et l'antimoine (Sb).

La dureté de l'alliage est grandement influencée par la teneur en carbone. Les caractéristiques des aciers peuvent aussi être altérées par l'ajout d'autres éléments, principalement métalliques ; on parle alors d'aciers « alliés ». Les caractéristiques peuvent encore être considérablement améliorées grâce à des traitements thermiques (tels que les trempes ou la cémentation) ; on parle alors d'aciers "traités".

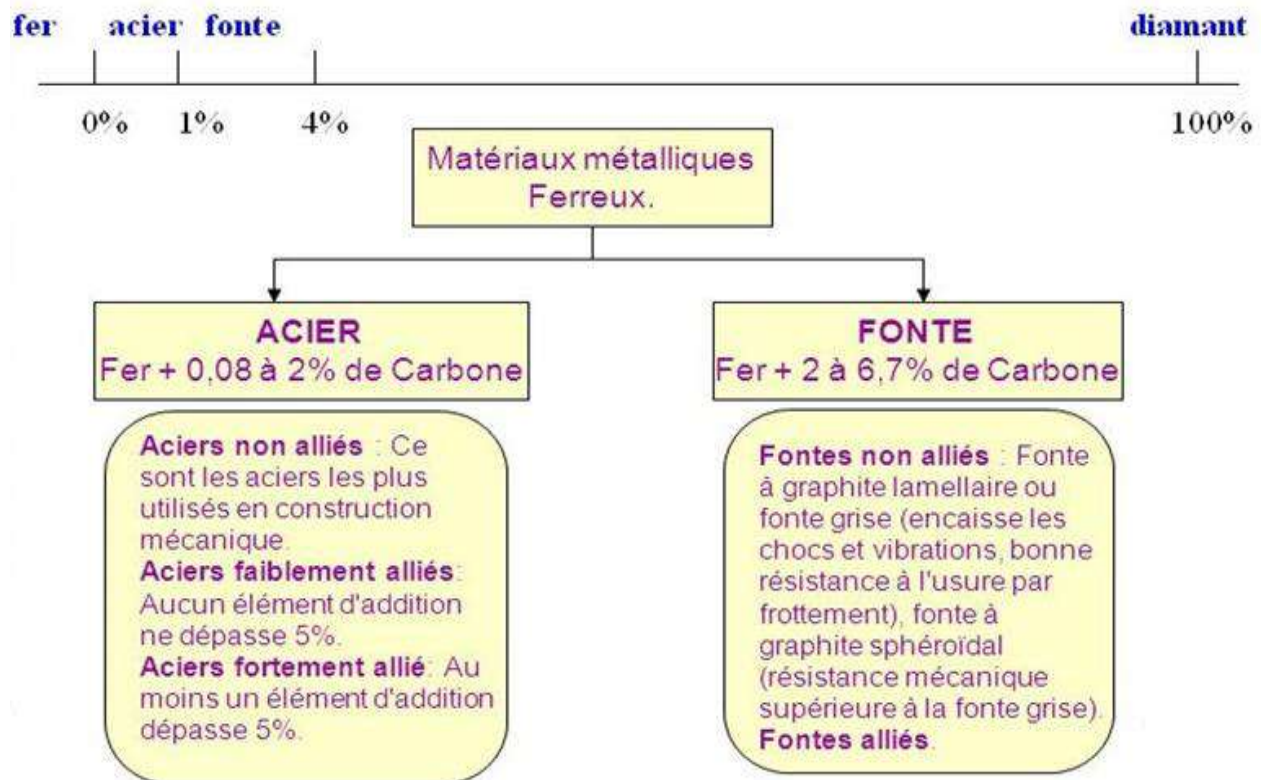


Figure I 1 L'influence de teneur de carbone sur les propriétés d'acier

I.3 Propriétés et utilités

L'acier est un alliage essentiellement composé de fer, sa densité varie donc autour de celle du fer (7,32 à 7,86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques.

D'une part, les aciers présentent un intérêt majeur par rapport aux autres alliages métalliques en raison de leur accumulation de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales.

- Résistance aux efforts
- Dureté
- Résistance aux chocs
- Mauvaise résistance à la corrosion

Les propriétés de l'acier dépendent des différents traitements thermiques et des nombreux additifs ajoutés lors de sa fabrication. Tab.I.1

Il y a 4 types d'acier :

1. **Acier** au carbone. L'**acier** au carbone a un aspect mat et est connu pour être sensible à la corrosion. ...
2. **Acier** allié Les **aciers** alliés **sont** un mélange de **différents** métaux, tels que le nickel, le cuivre et l'aluminium. ...
3. **Acier** pour outils. ...
4. **Acier** inoxydable.

Tab I-1 Les différents types d'alliages

- Chrome + Nickel	⇒	acier inoxydable
- Silicium + Manganèse	⇒	acier "élastique" (ressorts)
- Tungstène + Cobalt	⇒	acier "rapide" (outils pour un travail rapide)
- Taux de carbone faible	⇒	acier déformable
- Taux de carbone élevé	⇒	acier très résistant

I.4 Cristallisation du fer

Lors de la solidification d'un lingot d'acier il se développe, suivant un système arborescent et dans trois directions un réseau appelé dendrites.

La structure cristalline des aciers à l'équilibre thermodynamique dépend de leur concentration (essentiellement en carbone mais aussi d'autres éléments d'alliage), et de la température. On peut aussi avoir des structures hors équilibre (par exemple dans le cas d'une trempe). Les différentes microstructures de l'acier sont : austénite, bainite, cémentite, ferrite, martensite et perlite.

Le fer possède différentes configurations cristallines appelées allotropiques. La structure du fer α (alpha) est cubique centrée, tandis que celle du fer γ (gamma) est cubique à faces centrées, avec un paramètre $a=0,356$ nm. (Figure I.2).

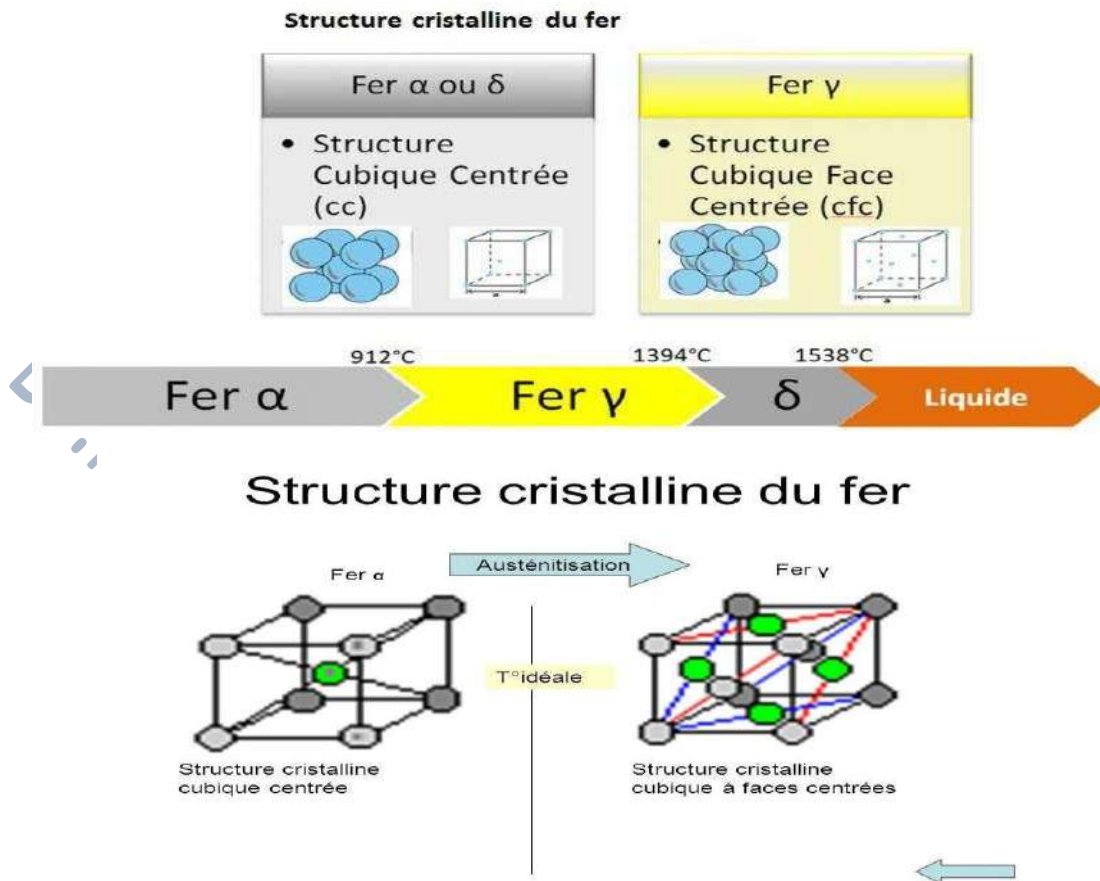


Figure I 2 Structure cristalline de fer

I.5 Les différents systèmes de cristallisation ou formes allotropiques du fer

Les différents états du mélange de fer et de carbone sont décrits dans le diagramme fer-carbone (figure I.3) en fonction de la proportion de fer et de carbone présente dans le mélange. Environ 2.11 % de carbone est considéré comme des fontes, tandis que sous cette concentration, on parle d'acier.

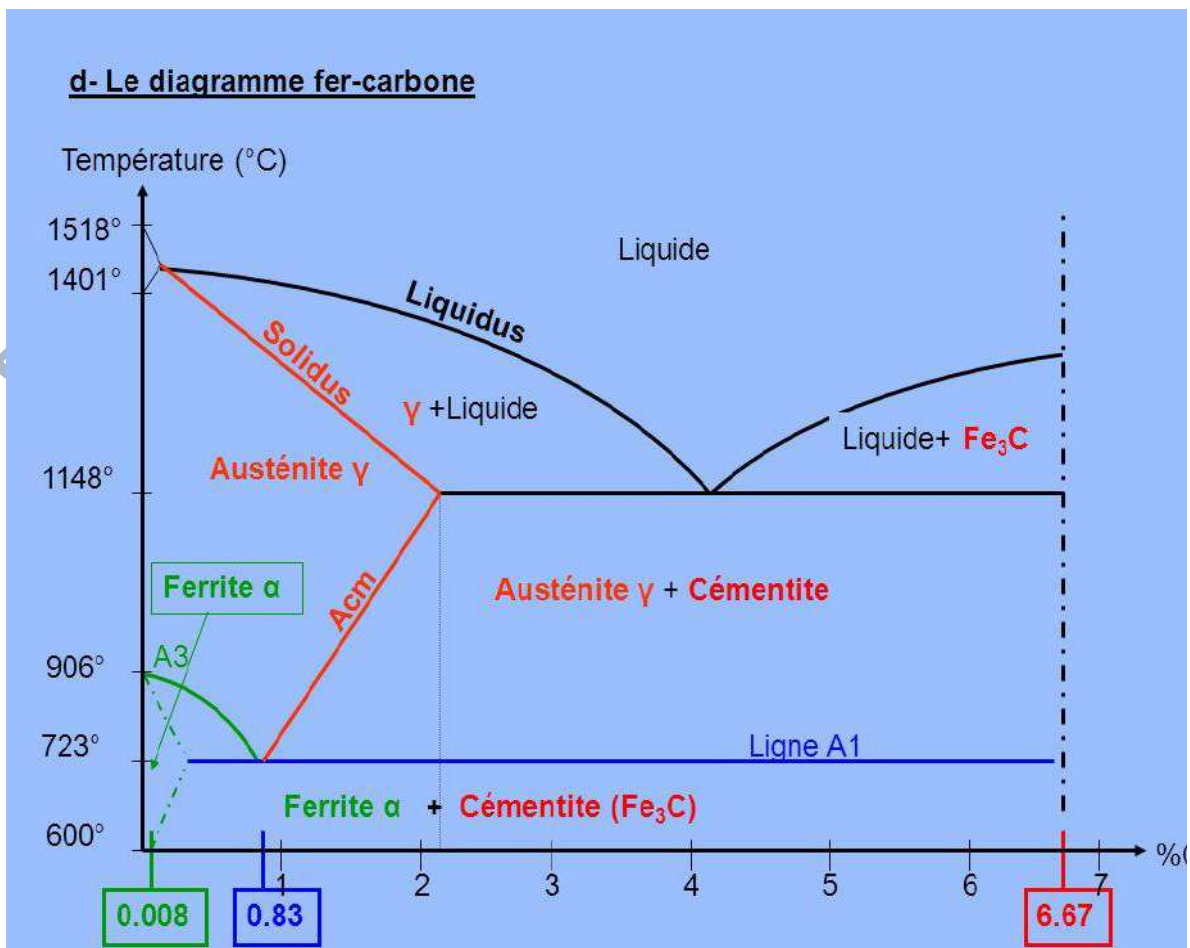


Figure 1 3 Diagramme de phase Fer-Carbone

Ce schéma permet de représenter la structure de l'acier en fonction de la température et de la concentration en carbone.

- Le fer α : Système cubique centré reste stable jusqu'à 721°C point A₁ À 768° le fer perd son magnétisme c'est le point A₂
- Le fer γ : Système cubique à faces centrées Apparaît à partir de 906° c'est le point A₃
- Le fer δ : Apparaît à 1400° le fer revient dans un système cubique centré

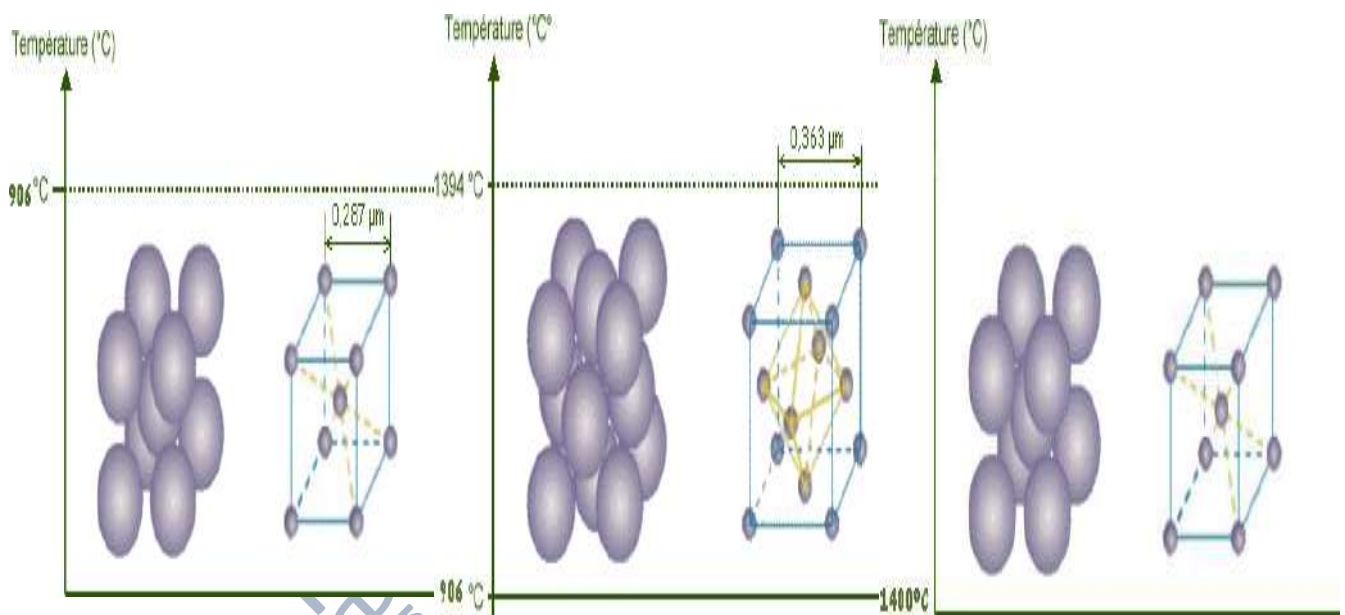


Figure 1.4 Différents systèmes de cristallisation du fer

I.6 Les différents points de transformations des aciers

La lecture du diagramme permet de déterminer les phases et les composants d'un acier à une température spécifique.

- AC1 : 721° : Début de la transformation du fer α en fer γ
- AC2 : 768° : Point de Curie perte de magnétisme
- AC3 : 906° : fin de la transformation du fer α en fer γ
- Acm : Température de fin de transformation pour les aciers $>$ à 0,85% de carbone
- AC₀ : température de perte de magnétisme pour la cémentite 210° dans les aciers hypereutectoïdes

Différents types d'aciers sont classés en fonction du taux de carbone qu'ils renferment.

Le point A1 et A3 sont confondus, il n'y a qu'un point de transformation.

- Les aciers hypoeutectoïdes (de 0.008 à 0.8 % de carbone) sont les plus doux, ils sont constitués de ferrite et de perlite.
- Les aciers eutectoïdes (0.85 % de carbone) sont constitués de perlite (structure lamellaire).
- Les aciers hypereutectoïdes extrêmement durs, qui contiennent entre 0,8 et 2,1 % de carbone, sont constitués de perlite et de cémentite.
- Le point eutectique : pour une teneur en carbone de 4,3% et à une température de 1145°L'alliage passe directement de l'état solide à l'état liquide.

I.6.a Les composants et solutions :

- La ferrite : fer α peu de carbone, peu tenace.
- La cémentite : fer α carbure de fer (Fe_3C), très dur mais fragile.
- L'austénite : fer γ stable à haute température, peu dur, capable de dissoudre le carbone
Le carbone combiné au fer.

I.6.b Les agrégats :

- La perlite : mélange de ferrite et de cémentite
- La martensite : constituant des aciers trempés très dur mais fragile.
- La bainite : presque aussi dur que la martensite mais moins fragile
- La troostite et La sorbite structure beaucoup plus fine que la perlite s'obtient par un revenu sur un acier trempé

I.7 Conclusion

Dans les applications industrielles, les aciers sont les alliages métalliques les plus utilisés. La variété de leurs nuances et la capacité à effectuer des traitements thermiques qui influencent les caractéristiques mécaniques de ces aciers offrent une vaste gamme d'applications.

La microstructure des aciers, leur composition chimique et les traitements thermiques appliqués sont étroitement liés aux caractéristiques mécaniques des aciers. Les alliages Fer-Carbone sont classés en acier et en fonte en fonction de leur teneur en carbone

II. Chapitre II : Généralités sur les traitements thermiques

II.1 Introduction

Les traitements thermiques sont effectués dans le but de modifier les propriétés mécaniques d'un métal, de manière à ce qu'il puisse mieux répondre aux exigences prévues. Une surface usinée réellement n'est jamais parfaite, elle a toujours des imperfections..

II.2 Définition

Le processus de traitement thermique d'un matériau est un ensemble de méthodes industrielles employées afin de modifier ses caractéristiques physiques, mécaniques et parfois chimiques. On utilise ce procédé pour la production de matériaux tels que le verre, le bois, les aliments et surtout les métaux.

Globalement, les traitements thermiques ont un impact sur la structure microstructurale des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Les propriétés mécaniques (augmentées ou diminuées), les propriétés physiques (conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (résistance à la corrosion) peuvent être modifiées grâce à eux.

Les métaux et alliages à l'état solide sont soumis à ces traitements, qui impliquent principalement un maintien à une température spécifique puis un retour à la température ambiante.

II.3 Catégories des traitements thermiques

Les traitements thermiques se répartissent en deux grandes catégories :

- Les traitements de durcissement (تصلب)
- Les traitements d'adoucissement (تليين)

Ils se classent aussi selon qu'ils ont :

- Pour effet de modifier en profondeur les propriétés du matériau (traitement dans la masse)
- Pour effet de modifier superficiellement les propriétés de matériau sur une profondeur limitée calculable (traitement thermique superficiel ou de surface).

La figure II.I présente les grandes catégories de traitements thermiques.

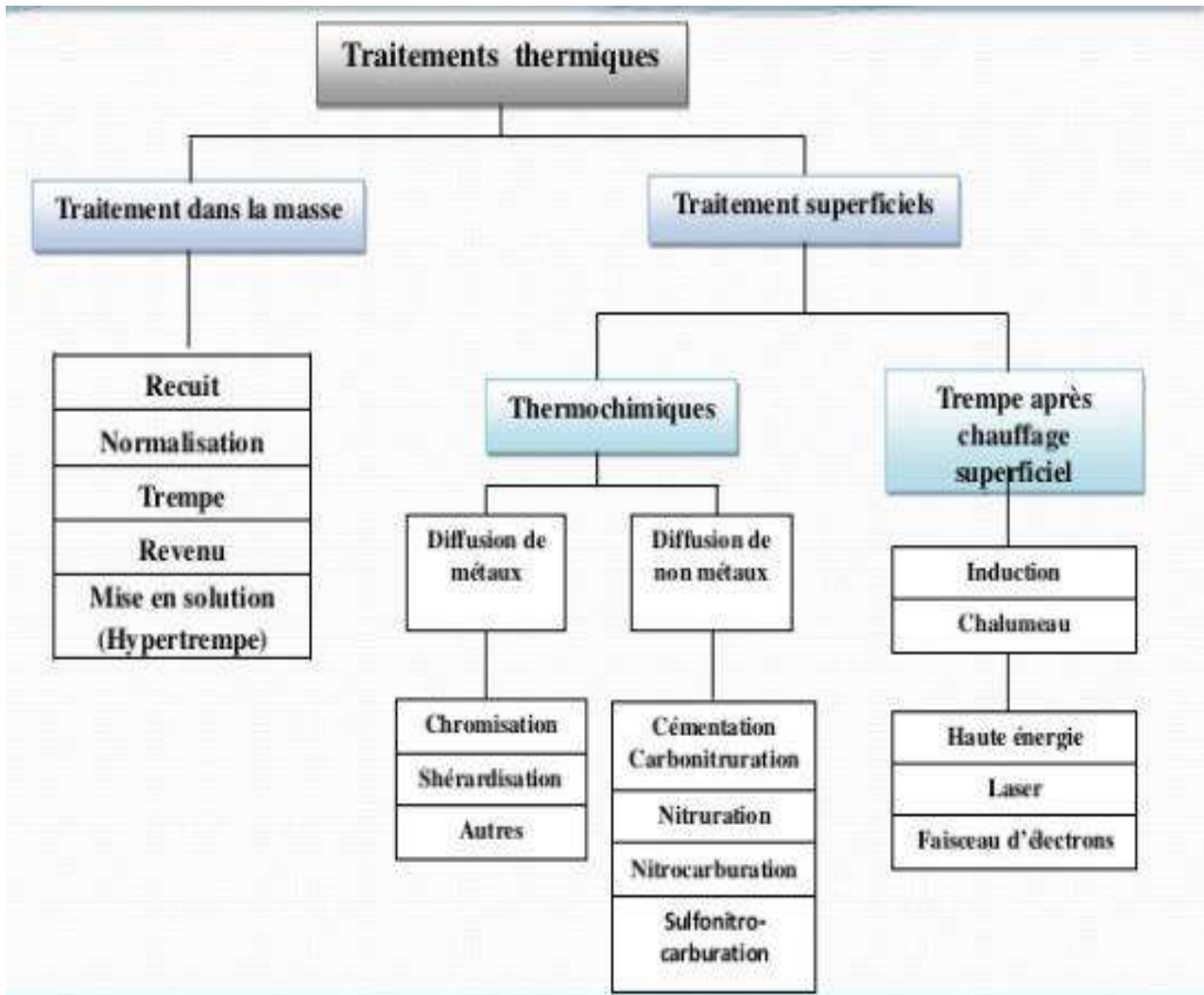


Figure II 1 Les grandes catégories de traitements thermiques

II.4 Le but de traitement thermique

Les traitements thermiques se composent de plusieurs opérations combinées de chauffage et de refroidissement qui visent à :

- Améliorer les caractéristiques des matériaux et les rendre plus adaptés à un usage spécifique, en effectuant les modifications suivantes :

- En améliorant la résistance à la rupture et la limite élastique R_m , R_e , $A\%$, l'élément offre une meilleure résistance.

- Amélioration de la résistance, offrant ainsi une plus grande résistance aux pièces face à l'usure ou aux chocs.

- Pour restaurer un métal avec un grain grossier (affiner les grains, uniformiser la structure), il s'agit des matériaux qui ont été forgés.

- Éliminer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant qu'ils ne subissent une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

Le traitement thermique consiste à utiliser le chauffage et/ou le refroidissement, généralement à des températures élevées, afin d'obtenir le résultat désiré, comme la modification de la friabilité, de la dureté, de la ductilité, de la fragilité, de la plasticité, de l'élasticité ou de la résistance du matériau.

Il existe de nombreux secteurs d'activité qui utilisent cette technique : l'industrie automobile, l'aéronautique, les machines spéciales, l'outillage, le transport ferroviaire.....

II.5 Les paramètres principaux de traitement thermique

La température maximale, la durée de maintien à cette température, la loi de refroidissement et la nature du milieu ou des milieux successifs (atmosphères, bains de sels, etc.) sont les principaux paramètres du traitement thermique.

La nature des produits à traiter (composition chimique, état structural et masse) et les caractéristiques recherchées déterminent les valeurs de ces paramètres.

II.6 Cycle thermique

Dans l'ensemble, les traitements thermiques sont des procédés qui impliquent de modifier la température des métaux qui demeurent toutefois solides. On nomme cycle thermique la fluctuation de la température au fil du temps (chauffage, maintien et refroidissement). Figure II.2

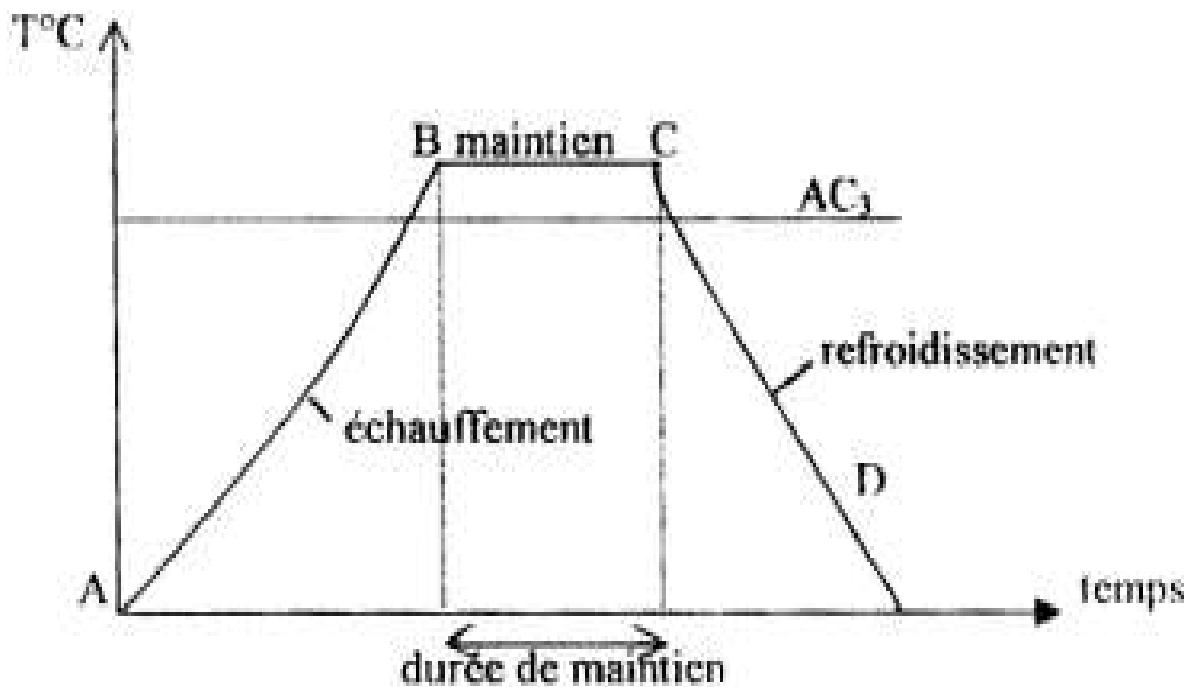


Figure II 2 Diagramme de base de traitement thermique

- AB : L'échauffement à des températures qui dépassent les températures de transformation (par exemple : AC3).
- BC : Garde à une température spécifique.
- CD : Réfrigération à une vitesse spécifique :
Lente (au four, à l'air).
Relativement rapide (en huile).
Extrêmement rapide (en eau).

II.7 Chauffage des pièces

Le chauffage de la pièce à la température requise est la première étape de chaque traitement thermique. Il est essentiel de procéder au chauffage rapidement afin d'obtenir une consommation d'énergie réduite et une productivité élevée. Deux options sont disponibles pour le chauffage des pièces. En transférant la chaleur.

Il existe trois options possibles.

II.7.a Par conductibilité

La pièce est chauffée dans un four classique où elle ne touche que le sol du four, elle ne reçoit qu'une faible quantité de la chaleur dépensée par conductibilité.

II.7.b Par convection

Dans cette situation, la pièce est chauffée en contact avec un liquide chaud (gaz ou liquide) qui se déplace et lèche la pièce en lui fournissant une grande partie de la chaleur utilisée.

II.7.c Par rayonnement

Les parois et la voûte du four absorbent la chaleur et la rayonnent vers la pièce qui l'absorbe. Il en va de même lorsque l'apport de chaleur est le plus crucial.

II.7.d Par production de la chaleur dans la pièce

Il est possible de chauffer la pièce en générant un flux de courant dans celle-ci, que ce soit en utilisant la pièce comme conducteur dans un circuit électrique (chauffage par résistance) ou en la positionnant dans un champ variable (chauffage par induction). Peu importe le mode de chauffage employé, la température varie toujours entre les différentes parties de la pièce. Répartition inégale de la chaleur.

II.8 Types de fours

Chaque type de traitement thermique industriel est réalisé dans un type de four spécifique, en fonction :

Du procédé,

Du type d'atmosphère (neutre, non décarburante, réactive enrichie en carbone ou en azote ou un mix des deux),

Des paramètres inhérents au traitement : vitesse de chauffe, température de maintien, type de chargement des pièces, etc.

Des différents types d'alliage et du gabarit des pièces à traiter (petites, grandes, pour des domaines industriels spécifiques, tels que l'aéronautique ou l'automobile),

De l'uniformité des propriétés mécaniques requises pour la pièce finale (par exemple un four de cémentation atmosphérique peut conférer à la pièce finale une dureté moins homogène qu'un procédé de cémentation réalisé dans un four sous vide).

Le traitement thermique s'effectue dans des fours (Figure.II.3). Différents types de traitement thermique existent. Ils dépendent de la nature du substrat et des propriétés recherchées. La capacité des fours est variable.



Figure II 3 Différents types de fours

- a. Fours à sole :
- b. Fours à bain de sels :
- c. Fours électriques :

d. Atmosphères :

Le traitement thermique d'une pièce consiste à lui donner des propriétés structurales différentes de celles qu'il possède initialement au moyen de cycle de chauffage de la pièce et de refroidissement. De nombreux matériaux peuvent être traités :

- les aciers
- les aciers inoxydables
- les alliages de titane
- les alliages d'aluminium
- les superalliages (base nickel, base cobalt)

II.9 Refroidissement des pièces

La détermination du régime de refroidissement de la pièce est cruciale en tenant compte de l'état de structure désiré. Certes, il est toujours essentiel de refroidir rapidement afin d'obtenir une productivité élevée, mais il est important de prendre en compte les risques de fissuration et d'étirage des pièces. Le diagramme TTT (Température, Transformation, Temps) permet de déterminer la vitesse de refroidissement requise pour obtenir un état de structure. Le refroidissement est réalisé dans des récipients contenant de l'eau ou de l'huile, dans les deux cas, le bain est maintenu à une température constante. En permanence, l'eau chaude est remplacée par de l'eau froide qui arrive par le bas du bac.

Il y a également l'utilisation de jets pour régler le refroidissement des pièces sur toute leur surface, ainsi que des chambres spéciales où le brouillard est produit par jet d'eau et d'air sous pression, principalement utilisé dans le domaine de l'aviation pour le traitement de particularités en aluminium..

II.10 Protocole et consignes de sécurité

Pour le chauffage, il est nécessaire de porter du Masque de protection du visage ou des lunettes de protection, pince, Gants de protection thermique et une cuvette d'eau est située à côté de la meule car il peut y avoir brûlure (ne pas tremper l'éprouvette, cela provoque la trempe de l'acier) (Figure II.4).



Figure II 4 Equipements de protections

II.11 Les avantages et les inconvénients des traitements thermiques

L'avantage est de conférer aux métaux, tels que les aciers et autre alliages métalliques, de nouvelles caractéristiques, comme une meilleure résistance à la corrosion, une augmentation de la dureté, une stabilité dimensionnelle, un état de finition superficielle de qualité (brillance) ou une augmentation de la résistance à l'oxydation dans le temps. Les pièces ainsi traitées gagnent en fonctionnalité et deviennent ainsi des pièces à valeur ajoutée importante.

Si le traitement thermique est mal appliqué, les pièces deviennent des rebuts difficilement réutilisables : surface noircie et oxydée due à la présence de vapeur d'eau dans le four, modification non souhaitée de la composition (décarburation superficielle), variation de dureté non homogène sur la surface, pénétration du traitement variable selon la géométrie de la pièce, etc. L'entretien du four et du réseau de distribution des gaz est indispensable pour garantir un résultat final conforme aux attentes, et pour assurer la sécurité des opérateurs.

II.12 Caractérisations après traitements thermiques

II.12.a Etude microstructurale

II.12.a.1 Microscopie optique

Afin de révéler les microstructures après les traitements préconisés, les échantillons ont été enrobés à chaud dans de la résine pour subir ensuite un polissage mécanique sur une série de papiers abrasifs (SiC) de granulométrie décroissante (180÷1200); la finition a été réalisée à l'aide de la patte diamantée à 3 et 1µm respectivement. Après l'opération de polissage, les échantillons ont été attaqués chimiquement à l'aide d'une solution de nital à 3% pour être observés au microscope optique.

II.12.a.2 Microscopie électronique à balayage

Afin d'observer les microstructures à fort grossissement et les précipitations induites on a utilisé un microscope électronique à balayage couplé à un spectromètre à énergie dispersive (EDS).

Détermination des phases en présence par diffraction des Rayons-X

Les phases en présence ont été déterminées par diffraction des Rayons-X (DRX).

II.12.b Propriétés mécaniques

II.12.b.1 Dureté (HB)

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, par exemple une bille en acier trempé (dureté Brinell) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers). S'il y résiste bien, il est dit dur, sinon il est dit mou. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.

Il existe une grande variété d'essais de dureté possibles :

- Dureté Vickers
- Dureté Brinell
- Dureté Rockwell
- Dureté Knoop

II.12.b.2 Résistance à l'usure (Rm)

La résistance à l'usure est l'aptitude d'un matériau à résister à la fatigue mécanique. Elle conditionne très souvent la durée de la vie de la pièce

La dureté du matériau est corrélée à la résistance à l'usure du matériau. Si la dureté du matériau est inférieure à celle de la dureté du matériau abrasif, alors le taux d'usure est élevé. La dureté du matériau joue un rôle majeur dans la résistance à l'usure. Certains matériaux présentent des caractéristiques d'usure particulières. Matériaux résistants à l'usure

Le test d'usure était effectué au moyen d'un disque-pion. La figure.11.5. Présente le dispositif utilisé. Il se compose principalement d'un système porte échantillon fixé sur une polisseuse dont la vitesse de rotation a été réglée à 50 tours/min. L'échantillon est usé à l'aide d'un abrasif en carbure de silicium (SiC) de granulométrie 240 sous une charge de 354 g \approx 3.5 N.

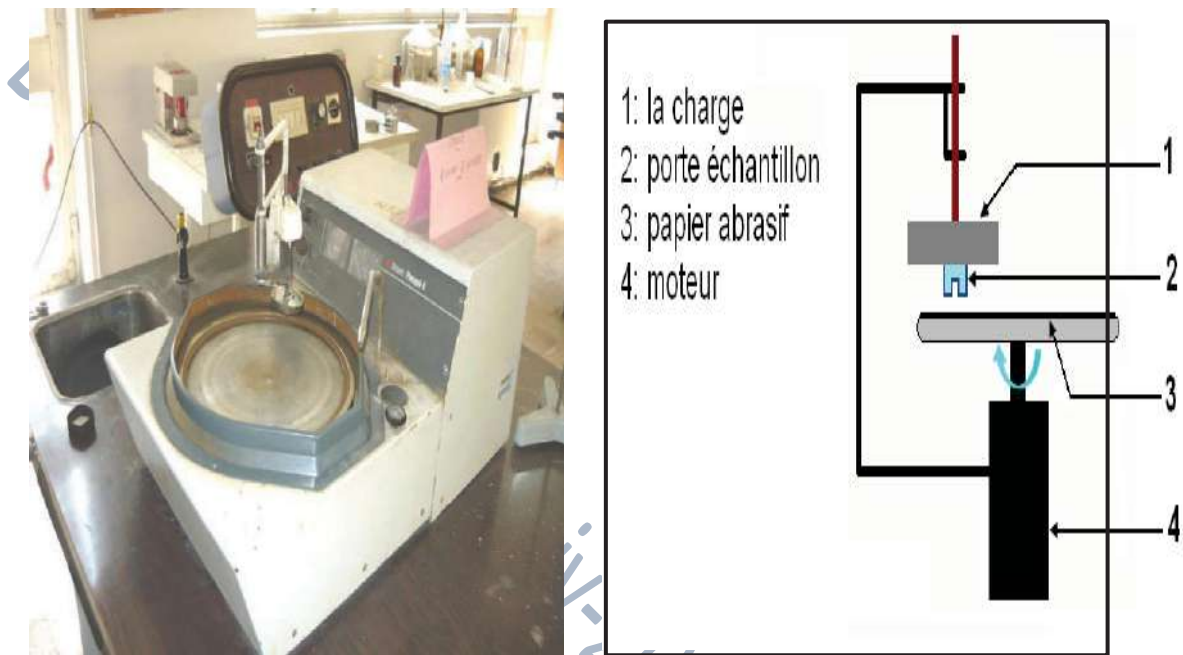


Figure 11.5 Dispositif expérimental de l'usure

II.12.b.3 L'allongement à la rupture ($A\%$)

L'allongement à la rupture ou allongement pourcent noté $A\%$ est une caractéristique sans dimension des matériaux. Elle définit la capacité d'un matériau à s'allonger avant de rompre lorsqu'il est sollicité en traction. $A\%$ se détermine par un essai de traction.

II.12.b.4 La ductilité

La ductilité désigne la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. La rupture se fait lorsqu'un défaut (fissure ou cavité) devient critique et se propage.

II.12.b.5 La limite d'élasticité (R_e)

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

II.12.b.6 La résilience (K)

La résilience qui a pour symbole K, est l'aptitude que possède un matériau à résister plus ou moins bien aux chocs. Il s'agit pour le métallurgiste de déterminer la résistance aux chocs de certaines pièces ou de certains matériaux

Elle est aussi la capacité d'un matériau à absorber l'énergie d'un choc en se déformant. On distingue les matériaux fragiles, des matériaux ductiles. Les matériaux fragiles, comme le verre, peuvent avoir un domaine élastique plus ou moins important, mais pas de domaine plastique.

II.13 Conclusion

Pour les matériaux métalliques, la solution de traitement thermique permet d'obtenir des pièces finies de haute qualité, et de leur garantir les propriétés mécaniques (dureté, solidité, résistance à la corrosion ou aux frottements) requises par différentes industries (aérospatiale, automobile, médicale, etc)

Il existe différents modes de chauffage : au sel, au four à atmosphère (neutre, oxydante, réductrice, décapante, vide), moyenne fréquence, basse fréquence).

○ Il existe également différents modes de refroidissement : eau, huile, pétrole, air, sel fondu

Dans la réalité les vitesses de chauffage et de refroidissement jouent un rôle essentiel et peuvent modifier :

- la microstructure (transformations de phases, taille de grains, précipitation...)
- les propriétés mécaniques, dureté et fragilité...
- mais laissent la composition chimique inchangée

Les traitements thermiques mettent en œuvre les propriétés métallurgiques des matériaux

Les procédés de fabrication additive métal permettent de fabriquer une série de pièces de qualité à partir de matériaux métalliques. Cependant, pour être utilisées en industrie, ces pièces doivent subir un traitement thermique

Après avoir réalisé un traitement de frittage ou de détensionnement, il est possible de suivre d'autres étapes, notamment d'usinage, suivi de traitements thermiques (trempe, ...). Pour les pièces avec des structures complexes, fortement sollicitées, il est recommandé d'avoir une nouvelle phase de traitement sur couche superficielle : la cémentation. Elle permettra de retrouver les propriétés de dureté voulues en surface de nos métaux.

III. Chapitre III : Traitements thermiques dans la masse

III.1 Introduction

Les méthodes de traitement thermique des métaux et alliages visent à changer les caractéristiques de ces corps exclusivement par modification de température. Ils ont un impact sur la résistance, la résistance à l'usure, la résistance aux chocs, la résistance à la traction (comportement élastique, plastique et degré de résistance à la rupture) et la capacité à être malléables.

La détermination des traitements thermiques à imposer à un métal est basée sur :

- L'observation des points critiques du métal (diagramme fer-carbone) ;
- La température de chauffage ;
- L'étude du refroidissement

Traitements dans la masse (volumique) (amélioration des propriétés de masse)

Pour effet de modifier en profondeur les propriétés du matériau dans toute la section ou toute la masse du produit traité

Les principaux traitements dans la masse sont :(Trempe, revenu et recuit....)

III.2 La trempe

III.2.a Historique

Jusqu'au début du XXe siècle, **les forgerons** étaient esclaves du traitement de la trempe. Ce traitement était généralement effectué juste avant l'affûtage des outils tranchants en acier forgé (lames, burins, haches). Il consistait à porter l'extrémité qui sera affûtée à une température de rouge cerise clair (environ 900 à 950 °C) puis à plonger cette partie très rapidement dans un liquide refroidissant, généralement de l'eau. Le forgeron utilise de l'acier qui subit une transformation allotropique avec un changement de phase à une température spécifique. Ce changement de phase et la présence de carbone sont les deux causes de l'effet de trempe.

Aujourd'hui, la trempe conserve le même intérêt en ce qui concerne les aciers mais est aussi utilisée sur d'autres matériaux pour restaurer des propriétés mécaniques perdues pendant certaines phases de travail

Le forgeron est un ouvrier ou artisan professionnel qui forge à la main et assemble des pièces de métal pour fabriquer des objets ordinaires ou faisant partie de la structure d'un bâtiment (Figure III.1)



Figure III 1 La Forge de Francisco Goya, 1819(droite) et Un forgeron ivoirien en pleine activité à Ferké (ville du nord de la Côte d'Ivoire (gauche)

III.2.b Définition

La trempe est une opération métallurgique qui fait partie des traitements thermiques. Elle consiste à chauffer un matériau à une température dite de changement de phase pendant le temps nécessaire à la transformation de toute la masse chauffée puis à refroidir toute cette masse très rapidement.

- La trempe peut suivant la composition du matériau s'effectuer à l'air ou dans l'huile (Figure III.2)

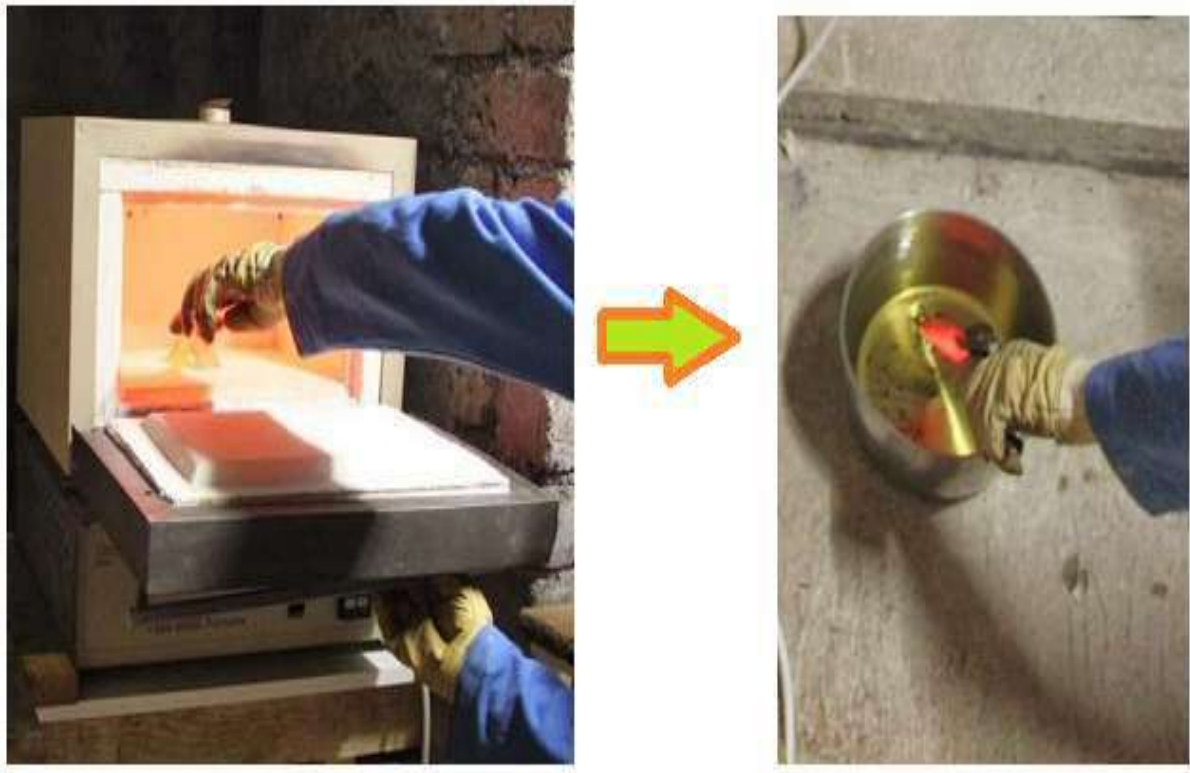


Figure III 2 Procédure de la trempe

III.2.c Les caractéristiques de mise en œuvre

On recherche un compromis entre les caractéristiques suivantes :

- Ductilité (capacité de déformation) • Résistance (limite d'élasticité, résistance à la traction)
- Résilience, ou ténacité (résistance au choc) • Dureté

III.2.d Principe

L'essai consiste à faire subir un cycle thermique bien déterminé à la pièce en question.

Chauffer l'acier pour atteindre une température d'austénitisation. (Transformation de l'acier en austénite par passage du Fer α au Fer γ)

Une mesure de la dureté de pièce avant et après traitement nous permet d'avoir une idée sur l'influence de la trempe sur la dureté et donc sur certaines propriétés mécaniques.

III.2.e Le maintien

L'échantillon est maintenu ensuite à cette température pour une durée nécessaire pour l'homogénéisation de la température dans toute la pièce.

III.2.f Le refroidissement

Par la suite le refroidissement s'effectue par immersion des pièces dans un fluide
 - Lorsqu'on refroidit très lentement le métal chauffé, les transformations inverses se produisent et l'on retrouve les constituants d'équilibres ferritoperlitique de l'acier recuit, par contre, si le

refroidissement est rapide, une nouvelle phase sursaturée en carbone apparaît appelée la martensite (Figure.III.3)

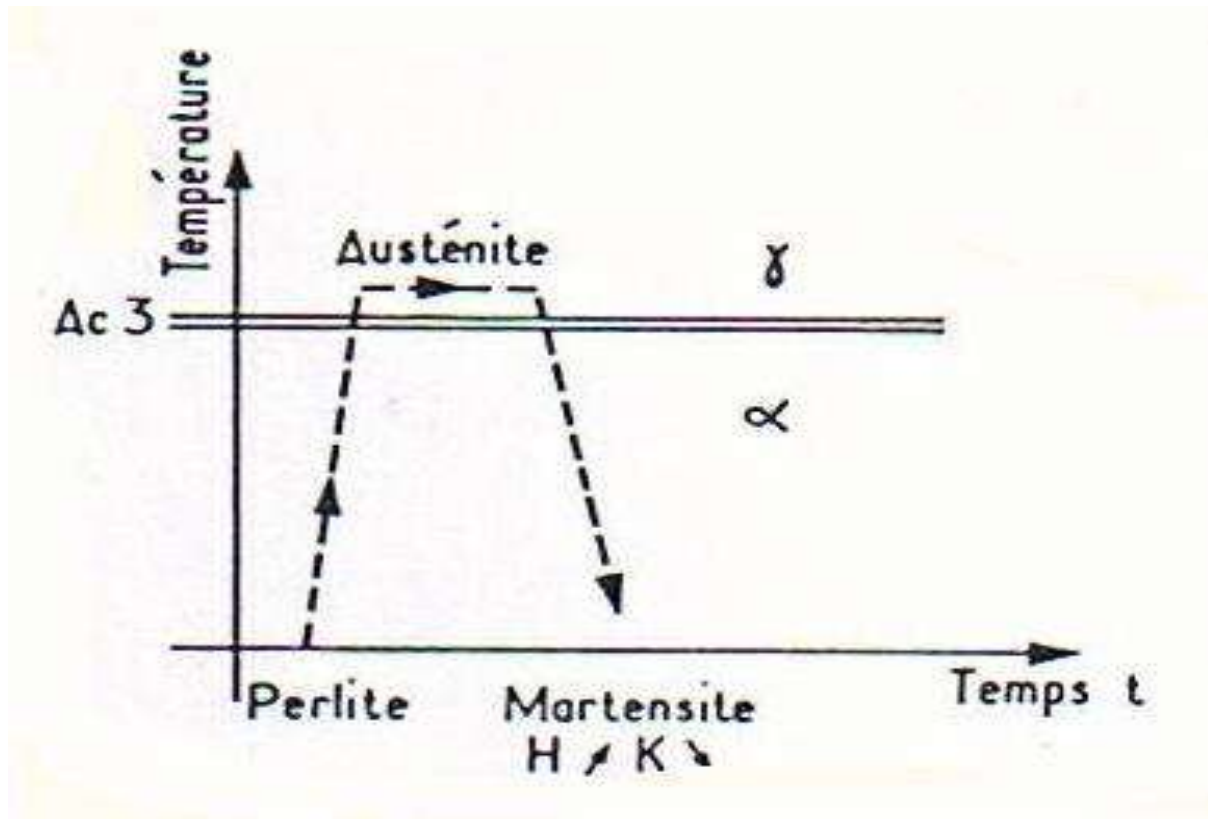


Figure III 3 Cycle thermique de la trempe

- Refroidissement rapide l'**austénite** se transforme en **martensite**.
- Refroidissement lent l'**austénite** se transforme en **bainite**
- Refroidissement naturel l'**austénite** se transforme en **perlite** (89% **ferrite** et 11% **cémentite**)

Les fluides utilisés par ordre de vitesse de refroidissement (de la plus élevée à la plus faible) sont :

- L'eau salée (L'eau de mer ; L'eau saumâtre ; La saumure).
- L'eau ;
- L'eau additive (polymère par exemple) ;
- L'huile ;
- Le brouillard d'eau ;
- Les gaz (air, argon, azote, etc.).

La vitesse de refroidissement est conditionnée par trois facteurs :

- Le transfert de chaleur dans le fluide de trempe ;
- Le transfert de chaleur à l'interface métal-fluide de trempe ;

- Le transfert de chaleur dans le métal.

On utilisera les huiles d'origine végétales de préférence aux minérales. Il ne faut absolument pas utiliser l'huile de vidange (risque de toxicité) ! Il existe des huiles spéciales pour la trempe, mais elles sont chères. Prévoir un bac de trempe avec un couvercle, car bien souvent l'huile s'enflamme lors de la trempe

III.2.g Influence de la trempe sur les propriétés mécaniques

- Augmentation de la limite élastique (R_e).
- Augmentation de la dureté (H).
- Augmentation de la résistance à la rupture (R_r).
- Diminution de l'allongement (A%).
- Diminution de la résilience (K).



Figure III 4 Trempe sélective de couteaux

III.2.h Différents types de trempe

On distingue différents types de trempe :

La trempe martensitique.

La trempe bainitique.

La trempe austénitique (aussi appelée hypertrempe)

III.2.h.1 La trempe martensitique.

La trempe martensitique / trempe étagée martensitique est une forme de traitement thermique appliquée aux aciers en tant que trempe interrompue généralement dans un bain de sel fondu à une température juste au-dessus de la température de début de transformation martensitique. L'objectif est de retarder le refroidissement pendant une durée définie afin d'uniformiser la température à travers la pièce. Ceci afin réduire de façon optimale la déformation, la fissuration et les contraintes résiduelles.

III.2.h.2 La trempe bainitique.

La trempe bainitique est un processus de traitement thermique pour les métaux ferreux à forte et moyenne teneur en carbone, qui permet d'obtenir une structure métallurgique appelée bainite. Il est utilisé pour augmenter la résistance, la solidité, et réduire la déformation. Les pièces sont chauffées à la température de durcissement, puis refroidies suffisamment rapidement à une température supérieure à la température de martensite (début) et maintenues à température pendant une durée suffisante pour obtenir la microstructure de bainite souhaitée.

III.2.h.3 La trempe austénitique

La trempe des aciers comporte un chauffage jusqu'au-delà de la température d'austénitisation, un maintien à cette température pendant le temps nécessaire à la transformation de toute la masse suivie d'un refroidissement à une température déterminée en vue d'éviter le retour à une structure d'équilibre. Dans le domaine austénitique, le fer a une structure cubique à faces centrées (fer γ) qui possède des sites interstitiels plus grands que dans la structure cubique centrée (fer α), ce qui permet au carbone de se dissoudre beaucoup mieux dans le fer γ que dans le fer α

La température d'austénitisation varie en fonction de la nuance d'acier, mais se situe aux alentours de 800 à 900 °C. Son domaine réel de température se situe entre $AC3 + 50^\circ C$ et $AC3 + 100^\circ C$.

III.2.i Défauts de trempe

De nombreuses variables influencent la qualité et les propriétés mécaniques de l'acier trempé et elles sont toutes importantes à maîtriser :

- La température de trempe ;
- Le temps de trempe ;
- La vitesse de refroidissement (en anglais : cooling rate) ;
- La composition chimique de l'acier.

De plus, au cours de la trempe il apparaît certains problèmes qu'on doit éviter ou contrôler selon la qualité du produit final à obtenir. Au cours du chauffage, la température n'est pas homogène dans la pièce (plus chaude sur la peau et plus froide au cœur). Ce gradient de température provoque des contraintes internes qui peuvent entraîner des déformations élastiques.

Il existe également un gradient de température pendant le refroidissement, mais dans le sens opposé. En ce moment, il y a une contraction volumique significative. Il est important de prêter beaucoup d'attention à ce point car la déformation importante peut causer des fissures en surface de la pièce. Le risque de fissuration est différent car la résistance à la compression et à la traction diffère. C'est pour cette raison que le risque est présent particulièrement pendant le chauffage (il engendre des efforts de traction à la surface), mais que le refroidissement (il engendre des contractions à la surface) doit également être contrôlé.

Un autre type de problèmes possibles lors de la réalisation d'une trempe sont les réactions avec l'atmosphère. Si on met l'acier en contact avec l'air, il peut y avoir décarburation et formation de calamine.

En connaissant les avantages et les inconvénients de la trempe à l'air, on peut décider s'il vaut mieux choisir un liquide de trempe qui ne présente pas ces effets et en assumer les coûts.

Pour éviter les problèmes de décarburation il est possible de traiter certains aciers alliés dans des fours sous vide.

III.3 Le Revenu

III.3.a Définition

Le revenu est un processus de traitement thermique à basse température (150 à 650 °C) (inférieure à A1), normalement effectué après le durcissement sous atmosphère neutre, la double trempe, la cémentation atmosphérique, la carbonituration ou le durcissement par induction, afin de parvenir au rapport dureté / solidité souhaité. Il est aussi destiné à éliminer

les contraintes et la fragilisation provoquées par la trempe et obtenir les propriétés mécaniques requises.

Ce procédé est très simple en termes de matériel, il suffit juste d'un four domestique. Le revenu sert à réduire les contraintes occasionnées par la trempe

III.3.b Principe

Cette technique se pratique après une trempe, par chauffage à une température inférieure à celle de la trempe. L'acier est chauffé puis refroidi lentement

- Le revenu a pour but de diminuer les effets de la trempe.
- Le revenu permet d'améliorer la ténacité et diminue les tensions internes, en partie responsables de la fragilité de l'acier trempé, en diminuant très peu la dureté (Figure III.5).



Figure III 5 Exemple de lame en acier ayant subi une trempe mais sans revenu, elle représente des fissures

III.3.c Cycle thermique

La pièce est soumise à un cycle thermique appelé revenu, qui comprend un chauffage allant de 200° à 600°, puis un maintien à température suivi d'un refroidissement lent (Figure III.6).

- a) - Chauffer à une température minimale de 200° afin de dissiper les tensions internes causées par le refroidissement brusque de la périphérie de la pièce sur le cœur dilaté. Lors de la trempe, la contraction brusque de la périphérie provoque des tensions entre le cœur et la périphérie.
- Rechercher une valeur précise de caractéristique mécanique entre 200° et 600°.
- b) - Maintenir la température pendant au moins une heure afin de dégager les tensions dans toute la masse.
- c) - Un processus de refroidissement lent afin d'éviter la création de nouvelles contraintes ou tensions internes.

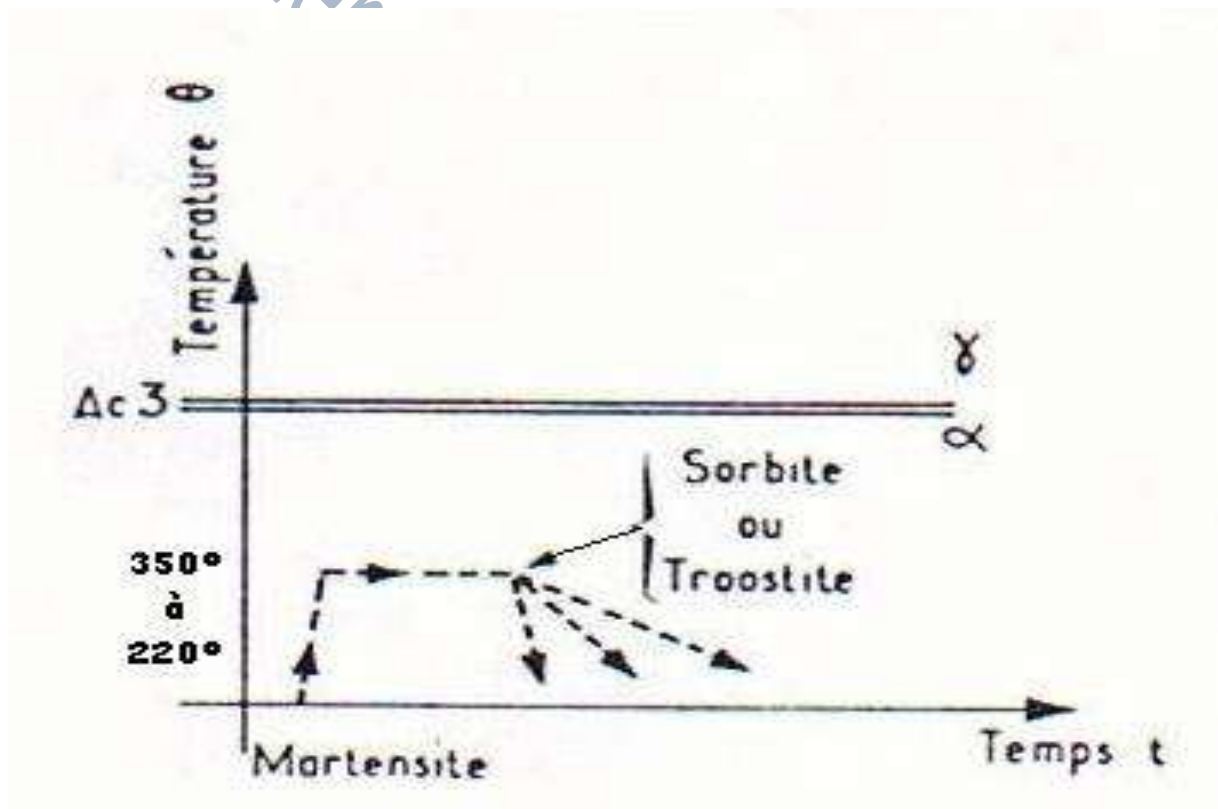


Figure III 6 Cycle thermique du revenu

III.3.d Evolution des propriétés au cours de revenu

Les modifications structurales au cours de revenu ont des conséquences importantes sur les propriétés mécaniques. La variété des structures obtenues explique que le revenu constitue un moyen efficace et très souple pour obtenir un ensemble de propriétés ajustées aux exigences de fonctionnement et il faut envisager des interférences possibles pour expliquer finalement les variations des propriétés obtenues.

Les propriétés des aciers sont sensibles au revenu par l'influence de deux principaux facteurs : le premier est intrinsèque aux aciers (La composition chimique) et le deuxième est extrinsèque (Le temps et la température de revenu).

- La composition chimique de l'acier est un facteur intrinsèque qui doit être connu avec une très grande précision pour pouvoir prédire et prévoir son comportement sous l'effet de revenu.
- La température de revenu n'est pas la seule responsable de la diminution de la dureté. Elle se trouve justement soutenue par le temps de maintien.

Le revenu est un processus qui impacte les caractéristiques mécaniques des aciers. La diversité de ces dernières a une apparence qui se reflète dans toutes les nuances d'acier.

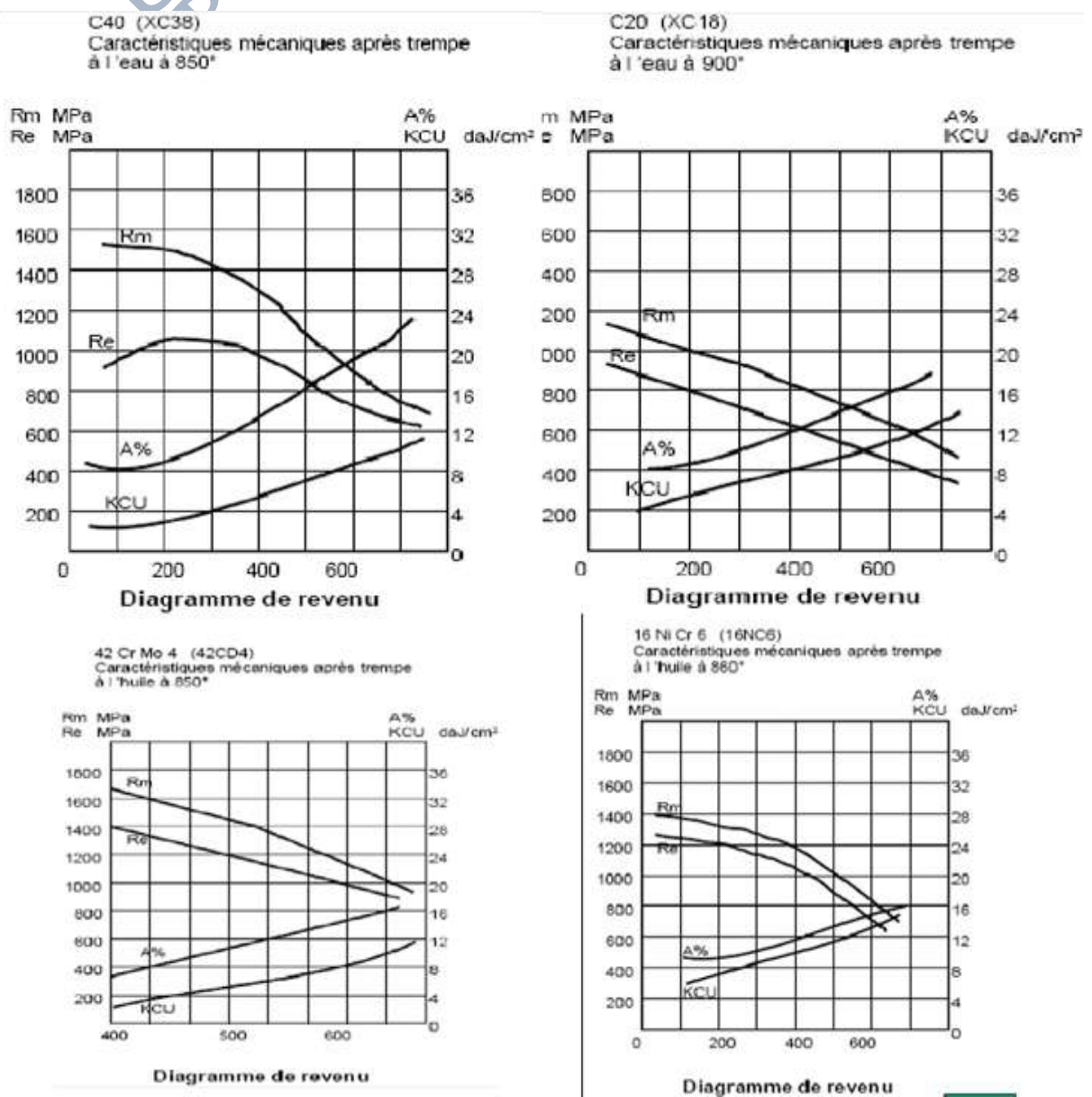


Figure III 7 Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu de quelques métaux

III.3.e Trempe revenue

En règle générale, la trempe an isotherme est un processus énergétique qui entraîne une augmentation des valeurs de R_m , R_e et H du métal en raison de la recherche de martensite, mais dont la ductilité ($A\%$) et la résilience (K) sont très faibles pour la même raison. En prenant en considération aussi un niveau de contraintes propres souvent considérable, il est clair qu'un acier ne peut pas être utilisé en service directement à l'état trempé. L'objectif de l'opération de revenu est de remédier plus ou moins entièrement à ces désavantages. Elle entraîne la création d'un métal avec des caractéristiques appropriées qui offre un compromis satisfaisant entre R_m , R_e , d'une part, et $A\%$, K , d'autre part.

À la différence de la trempe, une opération rapide et difficile à contrôler, le revenu offre une approche facile pour contrôler les transformations et les propriétés du métal. Le revenu correspond à une transformation thermique réalisée après une trempe continue, qui implique :

1. Un réchauffement à une température $T_R < AC_1$,
2. Un prolongement de la durée de t_R à T_R ?
3. Il est recommandé de refroidir lentement jusqu'à atteindre la température ambiante.

Le revenu entraîne une évolution du matériau vers un état physicochimique d'équilibre plus proche, sans pour autant chercher à le rejoindre. La sélection de T_R et t_R permet de réguler cette transition plus ou moins complète vers l'état d'équilibre (Figure III.8).

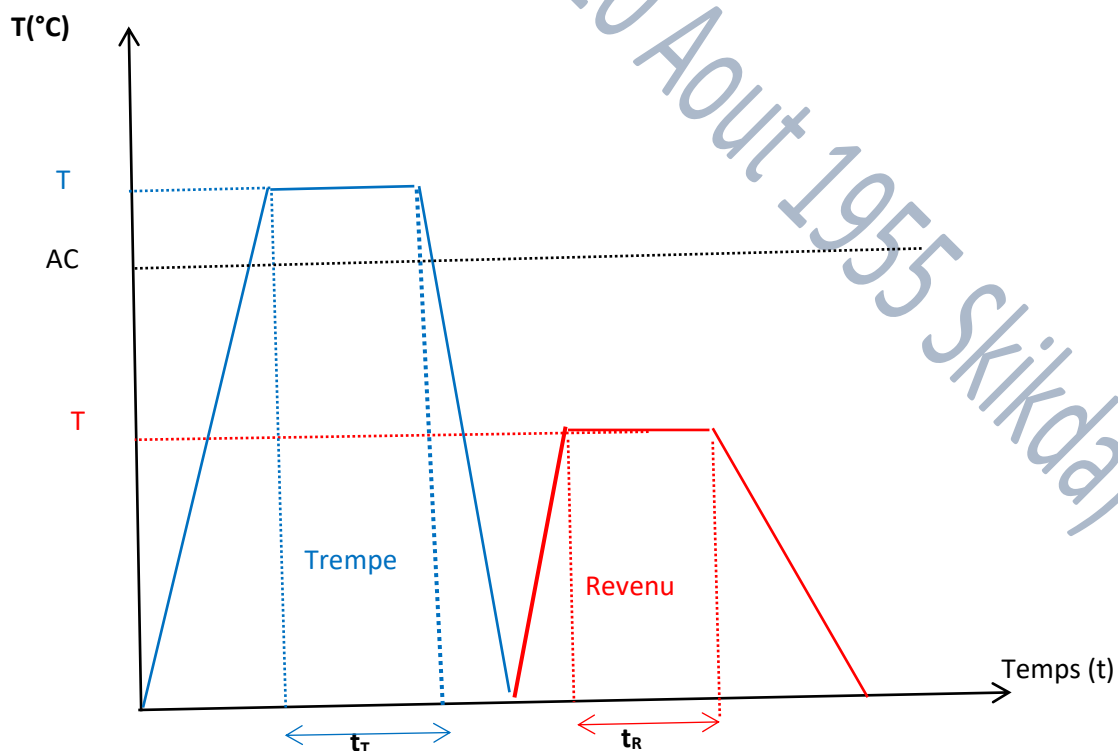


Figure III 8 Cycle complet (trempe, revenu)

III.3.f Différents types de revenu :

- Revenu de relaxation ou de détente,
- Revenu de structure ou classique,
- Revenu de durcissement

III.3.f.1 Revenu de relaxation ou de détente :

Sa température varie de 180°C à 220°C -250°C. Aucune transformation structurelle n'est observée, mais plutôt une diminution des contraintes multiples causées par le refroidissement brusque de la trempe et le changement de structure de l'austénite à la martensite. Il entraîne une légère baisse de la résistance et une légère augmentation de la résistance. Il est réalisé sur des pièces qui subissent des sollicitations intenses sans subir de chocs ou qui doivent maintenir une dureté superficielle élevée....

III.3.f.2 Revenu de structure ou classique :

Dans cette situation, la conversion se produit entre 500°C et Ac1. Les caractéristiques K, A et Z sont plus élevées, tandis que H, Rm et Re sont plus faibles. Ce genre de revenu offre la possibilité de trouver un équilibre entre les caractéristiques mécaniques en fonction de l'utilisation des aciers.

III.3.f.3 Revenu de durcissement

Les revenus réalisés à des températures allant de 450 à 600°C sur des aciers alliés peuvent entraîner des durcissements secondaires, tels que ceux des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides. D'abord, les carbures complexes sont précipités dans un reste d'austénite résiduelle, puis cette dernière est déstabilisée et se transforme en martensite lors du refroidissement. Ainsi, ces deux changements successifs exigeront un deuxième revenu afin d'éviter que la fragilité excessive ne soit causée par la martensite secondaire. (Dans certains aciers rapides, il est possible que trois revenus successifs soient requis).

III.4 Le Recuit

III.4.a Définition

Le recuit est un processus de traitement thermique utilisé pour réduire la dureté (adoucir), augmenter la ductilité et faciliter l'élimination des contraintes internes. Il sert à éliminer la trempe d'une pièce.

III.4.b Principe

Le recuit est obtenu en augmentant la température du métal de 500 à 850 °C. Un cycle de chauffe bien contrôlé (temps de montée en température et temps de maintien) est nécessaire pour la qualité du recuit

La taille et le nombre de grains sont influencés par la vitesse de chauffe. Il sera nécessaire d'être plus ou moins rapide en fonction de la structure d'origine et de la taille de grain souhaitée. Elle est aussi également influencée par le temps de maintien, la température de chauffe et la vitesse de refroidissement.

Les grains restent plus petits lorsque la descente est rapide (sans atteindre des vitesses de trempe).

Pour obtenir une recristallisation complète, il est nécessaire de respecter certaines valeurs de temps de maintien et de température de chauffe.

Le but est de mettre l'acier dans une certaine structure pour permettre l'usinage ou la mise en forme par déformation plastique ou de régénérer la structure. Cette technique se fait aussi après un traitement mécanique, une opération de soudage, etc.

III.4.c Cycle thermique

Le recuit est un traitement thermique appliqué pour obtenir un état d'équilibre thermodynamique (Figure III.9). Son cycle comprend les opérations suivantes :

- Chauffage à vitesse contrôlée jusqu'à une température dite de recuit (T_{Rc}), variable selon la nature du recuit
- Maintien isotherme contrôlé à cette température. Ce temps varie selon les traitements antérieurs, le volume de la pièce et enfin des effets à réaliser.

- Refroidissement obligatoirement lent à l'air calme ou au four selon une loi programmée

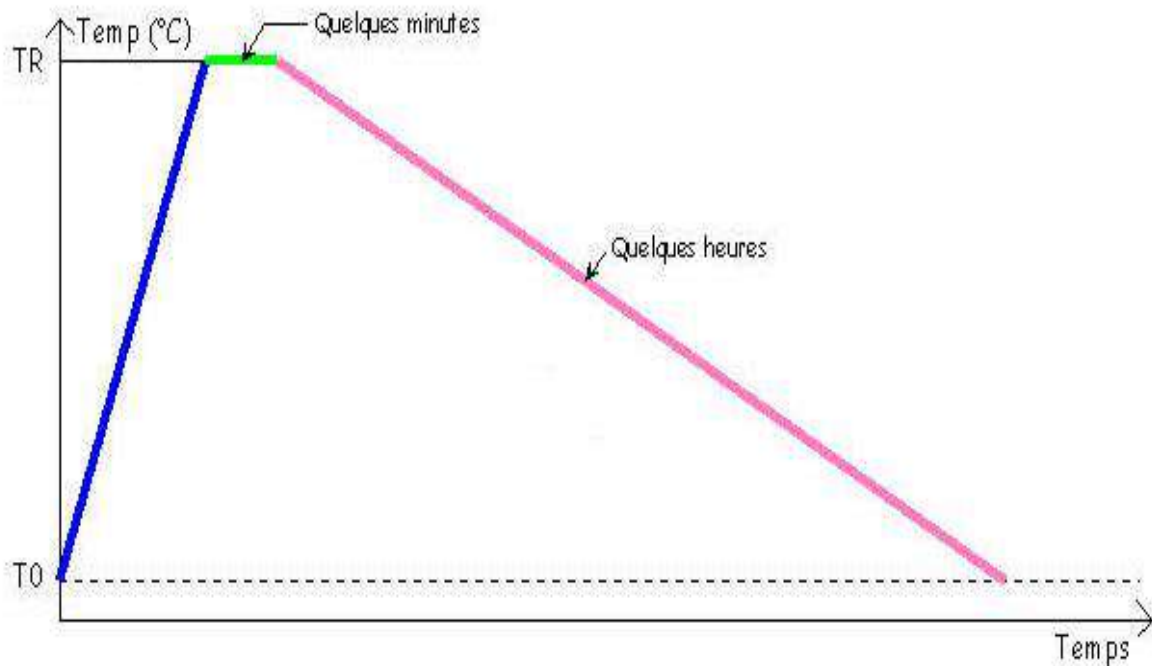


Figure III 9 Cycle Thermique du recuit

III.4.d But de recuit

Les valeurs maximales des caractéristiques de ductilité sont appelées recuit. Les caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture) doivent être minimales (résilience et allongement). L'objectif du recuit est de :

- Réduire la dureté d'un acier trempé.
- Maximiser l'adoucissement afin de faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Restaurer un métal qui a été écroui ou surchauffé.
- Faire une homogénéisation des textures variées.
- Minimiser les restrictions internes

Dans le domaine industriel, un recuit se caractérise principalement par deux éléments clés :

- La sensation de chaleur.
- La durée de la thérapie.

En réalité, il est important de prendre en compte deux autres éléments essentiels qui sont

- La rapidité de réchauffement.
- La température de refroidissement

III.4.e Différents types de recuit

Il existe une classification technique des différents recuits, en fonction des objectifs visés (Figure III.10)

En pratique, on distingue différents types de recuits :

- Le recuit d'adoucissement
- Le recuit de normalisation
- Recuit d'homogénéisation ou de diffusion
- Le recuit de détente
- Recuit de régénération
- Recuit de recristallisation

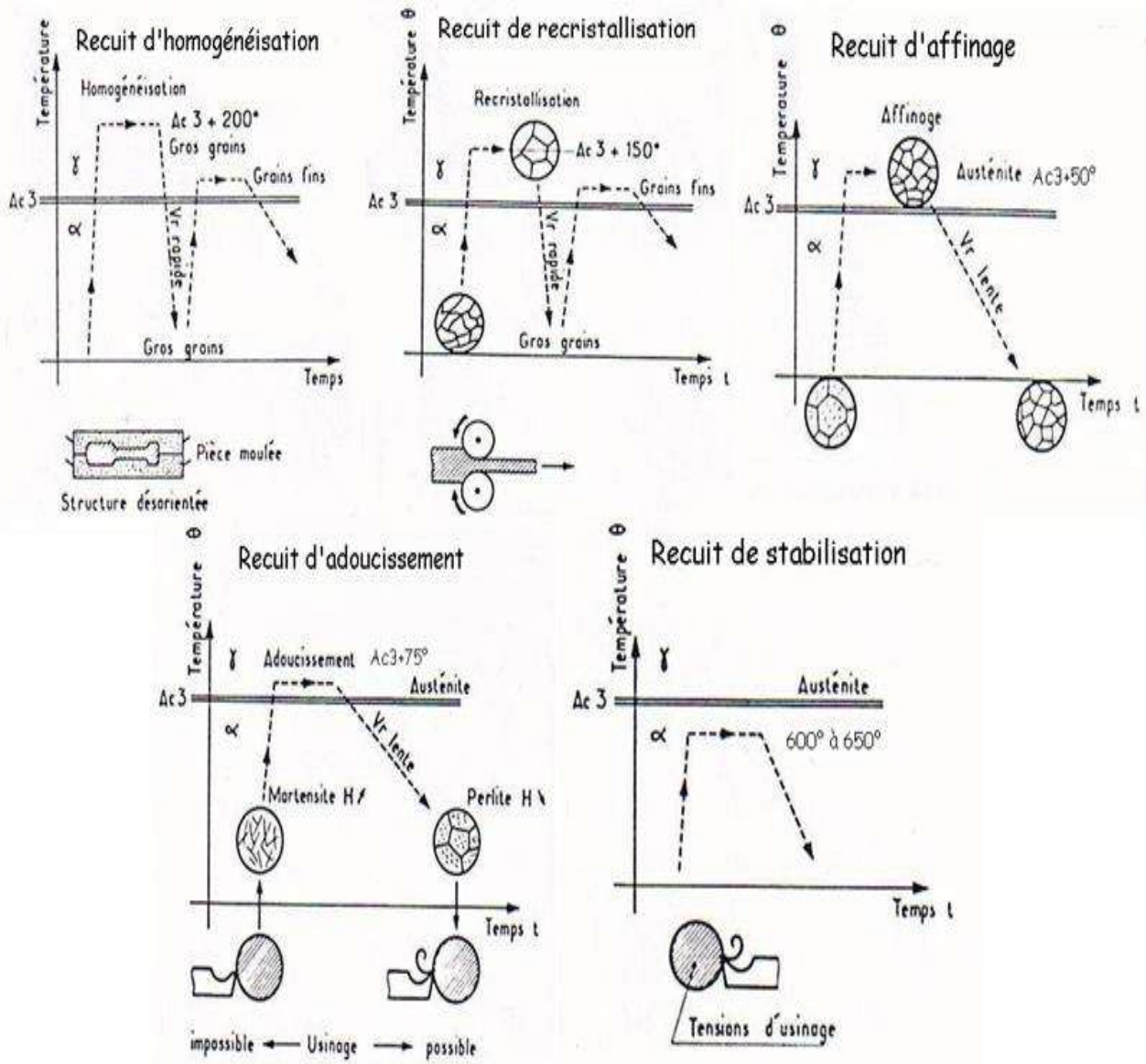


Figure III 10 Différents types de recuit

III.4.e.1 Recuit d'adoucissement

L'adoucissement des aciers est effectué pendant plusieurs heures à une température de 680-750 °C et suivi d'un refroidissement lent. Ce processus vise à obtenir un état suffisamment doux pour l'application souhaitée, avec des contraintes réduites.

III.4.e.2 Recuit de normalisation

La normalisation est un processus de traitement thermique des aciers et des alliages métalliques. Il consiste à recuire le matériau à une température spécifique, puis à le refroidir rapidement dans l'air. Cela permet de réduire les inclusions d'oxygène et d'autres impuretés, ainsi que de répartir les carbures de manière plus uniforme dans la structure de la matière. Le

processus de normalisation améliore la ductilité, la résistance à la fatigue et la ténacité des matériaux métalliques.

Le recuit de normalisation est basé sur la théorie de la métallurgie physique qui stipule que les propriétés mécaniques des matériaux dépendent de leur structure cristalline. En chauffant un matériau à une température supérieure à sa température de recristallisation, sa structure cristalline devient plus homogène et plus fine, ce qui améliore ses propriétés mécaniques. En refroidissant ensuite le matériau rapidement, les tensions internes sont réduites et la résistance à la rupture augmente

III.4.e.3 Recuit d'homogénéisation ou de diffusion

On le désigne également sous le nom de recuit de diffusion, ce processus est principalement réalisé sur des aciers bruts de coulée ou des aciers moulés à des dimensions importantes afin de réduire l'hétérogénéité chimique. La pièce est chauffée à une température maximale sans atteindre le solidus réel, qui est d'environ $AC3 + 200^{\circ}C$. Ce traitement a une durée de plusieurs heures. Le métal qui a subi une surchauffe et a ensuite subi une phase de régénération.

III.4.e.4 Recuit de détente

Le recuit de détente est un traitement thermique spécifique utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux. Ce processus implique de chauffer le matériau à une température supérieure à sa température de recristallisation, puis de le refroidir progressivement à une vitesse spécifiée.

Le recuit de détente réduit les tensions internes du matériau, ce qui augmente sa ductilité, sa résistance à la rupture et sa résistance à la fatigue. Il améliore également la ténacité, la résistance à la corrosion et la stabilité dimensionnelle.

III.4.e.5 Recuit de régénération

Le traitement d'homogénéisation consiste à chauffer le matériau à une température relativement élevée, et à le maintenir pour une certaine période de temps (généralement quelques heures). Ce traitement pour but de dissoudre les phases présentes au sein de l'alliage, de sorte à réaliser une homogénéisation de celui-ci sous une seule et même phase.

III.4.e.6 Recuit de recristallisation

Le recuit de recristallisation est utilisé pour restaurer la ductilité d'un métal ou d'un alliage qui a subi antérieurement un écrouissage. Le traitement thermique doit être effectué à une température supérieure à une température critique, dite de « recristallisation. Il est un recuit à une température entre 450 et 600 °C qui s'effectue après une déformation à froid

Le recuit de recristallisation est appliqué principalement entre les étapes de déformation lors du laminage ou de l'étirage à froid des tôles ou des fils.

Le recuit de recristallisation permet une réduction de l'écrouissage du matériau causé par des travaux à froid précédents.

Les matériaux appropriés pour le recuit de recristallisation sont :

Toutes les qualités de fonte et d'acier

Des alliages de cuivre

III.4.f Avantages et inconvénients du recuit

III.4.f.1 Avantages

L'une des procédures les plus utilisées au niveau industriel est le recuit, car il facilite la capacité d'exécuter des tests dans n'importe quelle condition et variété de matériaux.

Le recuit permet de réparer les erreurs du matériau, le procédé est donc utilisé pour corriger les détails nécessaires en termes de restructuration atomique

De plus, l'acier traité augmente sa capacité de vie utile et réduit les coûts de réparation ou d'entretien.

De plus, le traitement thermique recuit améliore considérablement les propriétés mécaniques du matériau en augmentant sa structure interne, ce qui entraîne de meilleures performances sous contrainte mécanique

III.4.f.2 Inconvénients

D'autre part, il existe des inconvénients qui peuvent être importants selon le type de travail à réaliser et le type de conception de l'ouvrage en question.

Le temps de recuit ne peut pas être dépassé, car cela peut entraîner une défaillance du produit en acier en cours de fabrication.

De plus, cette procédure a un coût élevé, qui peut devenir excessif si l'opération doit être répétée

III.5 Conclusion

o Le traitement thermique dans la masse d'un matériau est un traitement thermique qui affecte tout ce matériau et non uniquement sa zone superficielle comme c'est le cas d'un traitement thermique superficiel

Le recuit correspond à un chauffage au-dessus du point de transformation suivi d'un refroidissement relativement lent selon le cycle adopté.

- o La trempe correspond à un chauffage au-dessus du point de transformation suivi d'un refroidissement relativement rapide selon le cycle adapté au résultat recherché pour l'acier ou la matière.
- o Le revenu correspond au chauffage au-dessous du point de transformation pendant un temps défini, suivi d'un cycle de refroidissement.

Dr: H. Benzerouk (univ-20 Aout 1955 Skikda)

IV. Chapitre IV : Traitements thermiques superficiels

IV.1 Introduction

L'expression "traitement de surface" englobe toutes les opérations mécaniques, chimiques, électrochimiques ou physiques qui ont pour effet de modifier la fonction ou l'apparence de la surface d'un matériau, dans le but de l'adapter à des conditions d'utilisation spécifiques. En vue de modifier de manière superficielle les caractéristiques du matériau à une profondeur restreinte.

La surface des métaux présente différentes propriétés, qu'elles soient physiques (dureté, capacité de réflexion) ou chimiques ou électriques (résistivité, potentiel...). Un traitement de surface peut être utilisé pour modifier ces caractéristiques, qu'il soit effectué pendant une phase intermédiaire ou, dans la plupart des cas, lors de la phase finale de l'élaboration de la pièce.

Le processus de traitement de surface, qu'il soit chimique, thermique, laser ou mécanique, vise à modifier et transformer la surface de la pièce afin de lui donner de nouvelles caractéristiques, comme la résistance à la corrosion, à l'usure ou à la modification de son apparence, ainsi que la préservation à long terme de ses caractéristiques électriques, optiques ou thermiques.

IV.2 Définition

Les traitements thermiques superficiels sont des méthodes utilisées pour améliorer les propriétés mécaniques de certaines pièces mécaniques, que ce soit à l'intérieur ou en surface. Effectivement, dans de nombreuses situations, les pièces mécaniques sont confrontées à des exigences de type Usure ;

Frottement ; Épuisement ; Corrosion.

On distingue deux grandes catégories de traitements superficiels : le durcissement par trempe après chauffage de la surface et les traitements thermochimiques.

IV.3 Trempe superficielle ou localisée

La trempe superficielle est une opération localisée permettant de durcir en surface une pièce à traiter, en chauffant à haute température dans un temps très court et en refroidissant rapidement, pour éviter la diffusion thermique dans le cœur du matériau.

Obtenir une grande dureté en surface tout en conservant un bon allongement dans la zone sous-jacente jusqu'au centre de la section

IV.3.a Principe

Elle consiste à chauffer (ou par induction ou à la flamme) localement la surface d'une pièce en acier jusqu'à la température d'austénitisation, à la refroidir ensuite à une vitesse suffisante. Le refroidissement s'effectue le plus souvent par jet d'eau sous pression

Les traitements de trempe après chauffage superficiel, que l'on distingue habituellement par la nature du moyen de chauffage utilisé : induction électromagnétique, techniques haute énergie, flamme (chalumeau), laser, bombardement électronique (Faisceau électronique) torche à plasma, hexa-plasma

Chauffage par induction

Apport thermique par effet Joule lié à la présence de courant induit. Préférable au chauffage OA pour sa meilleure maîtrise de l'épaisseur de chauffe ainsi que de la température. Technique employée pour la trempe superficielle de pièces mécaniques devant conserver ses qualités internes propres et présenter une couche très dure en surface (Figure IV.1)

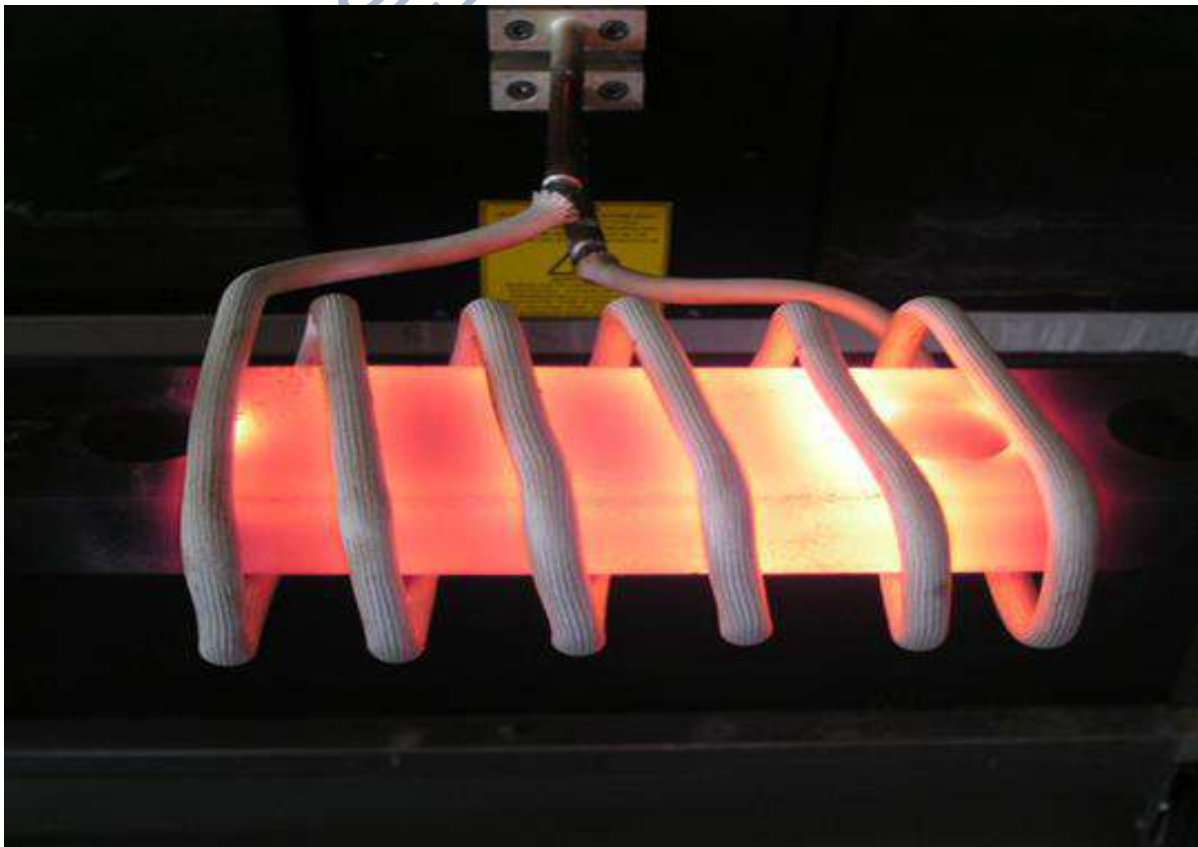


Figure IV 1 Systèmes de chauffage par INDUCTION

Chauffage oxyacétylène (Figure IV.2)

Réalisé avec un chalumeau.

Vitesse de chauffe élevée (200 °C/s).

Temps de maintien faible.

Température et épaisseur difficiles à maîtriser.



Figure IV 2 Systèmes de chauffage par CHALUMOU

Les autres types de chauffage (Techniques haute énergie, Bombardement électronique, Laser (Figure IV.3), Torche à plasma) sont caractérisés, par :

Chauffage très rapide (5 000 à 10 000 °C/s) ;

Épaisseur traitée de quelques μm ;

Très bonne maîtrise de l'épaisseur ;

Ils sont plutôt utilisés dans les traitements pour accroître la résistance au frottement

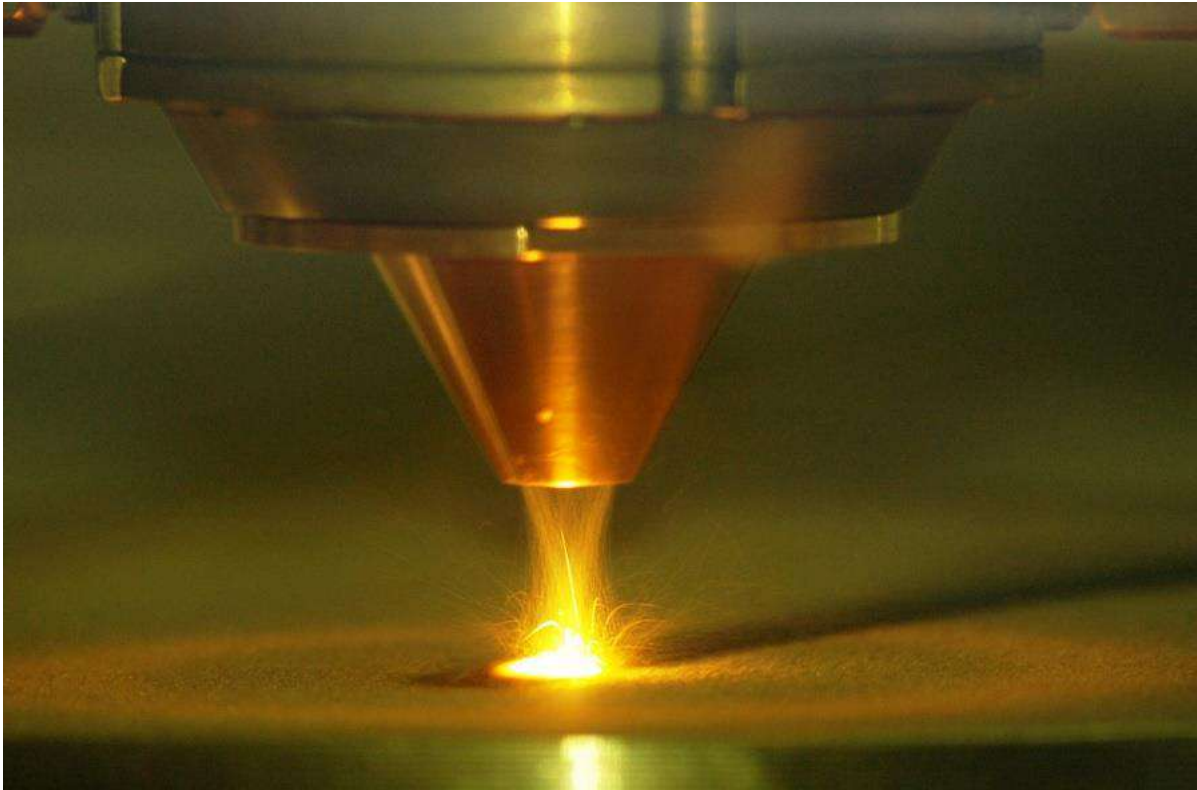


Figure IV 3 Systèmes de chauffage par LASER

IV.4 Traitements thermochimiques

Un traitement thermochimique consiste à appliquer une chaleur dans un milieu approprié afin de modifier la composition chimique du métal de base, en échange avec ce milieu.

Les traitements de diffusion de métaux (chromisation(Cr), shérardisation(Zn) aluminisation (Al), chrome-aluminisation (Cr et Al), manganisation (Mn)...) ou de non métaux (cémentation(C), carbonitruration (C et N), nitruration (N), nitrocarburation (N et C), sulfonitrocarburation(S, N et C) oxynitrocarburation (O, N et C), boruration (B), noirciment (évite l'oxydation), etc...) permettent de modifier la composition chimique superficielle d'un matériau dans le but d'obtenir des propriétés nouvelles. Les traitements par diffusion ont pour objet principal le durcissement des pièces en acier. La différence entre les traitements thermiques se traduit notamment par : composition du gaz support, composition du gaz d'addition, température du palier de diffusion, profondeur durcie.

Les traitements thermochimiques sont nombreux et visent à renforcer la résistance des pièces à la fatigue, à l'usure, au frottement, au grippage, à la corrosion, etc.

Traitement thermochimique de diffusion d'un élément chimique d'alliage par le contact avec milieu adapté concernant :

- Nitruration : diffusion d'azote ;

- Sulfonitruration : diffusion simultanée d'azote et de soufre
- Chromisation : diffusion de chrome. etc.

Traitement thermochimique de diffusion d'un ou plusieurs éléments suivis d'un traitement thermique affectant la zone modifiée concernant

- Cémentation : diffusion de carbone suivie d'un durcissement par trempe
- Carbonitruration : diffusion simultanée d'azote et de carbone suivie d'un durcissement par trempe.

IV.4.a Cémentation (C)

La cémentation, qui est l'un des traitements thermiques les plus répandus, correspond par exemple à l'incorporation à chaud, à l'intérieur d'un métal, par diffusion ou par combinaison de carbone. (Absorption de carbone superficiellement)

La cémentation est un processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier, profondeur cémentée de 0.2 à 3mm. Le but principal, est d'obtenir une surface dure et résistance à l'usure par enrichissement de la couche superficielle en carbone jusqu'à une concentration de 0,8 à 1,2 % C et par trempe ultérieure suivie d'un revenu à basse température. Ce procédé accroît également la limite de fatigue.

En général la cémentation se compose des étapes de procédés suivants :

- Cémentation au carbone
- Trempe
- Revenu

La cémentation est appliquée aux aciers à faible teneur en carbone (0,02 à 0,5 % C) pour les grosses pièces jusqu'à 0,3 % C. Le choix de la nuance d'acier est nécessaire pour que le cœur de la pièce garde sa ductilité. Il existe trois modes essentiels de cémentation :

IV.4.a.1 Mode de cémentation

- Par agents solides contenant du carbone.
- Par gaz.
- Par agents liquides.

IV.4.a.1.1 Par agents solides

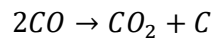
Cémentation solide ou cémentation en caisse sont des méthodes de traitement en milieu solide.... Les pièces à traiter sont noyées dans un ciment solide à base de charbon de bois, puis conservées dans une caisse fermée à la température de cémentation (900 à 950 °C).

Le ciment se compose principalement de carbone amorphe, souvent du charbon de bois, avec l'ajout d'un activateur, le carbonate de baryum $BaCO_3$. Il se présente soit sous la forme de

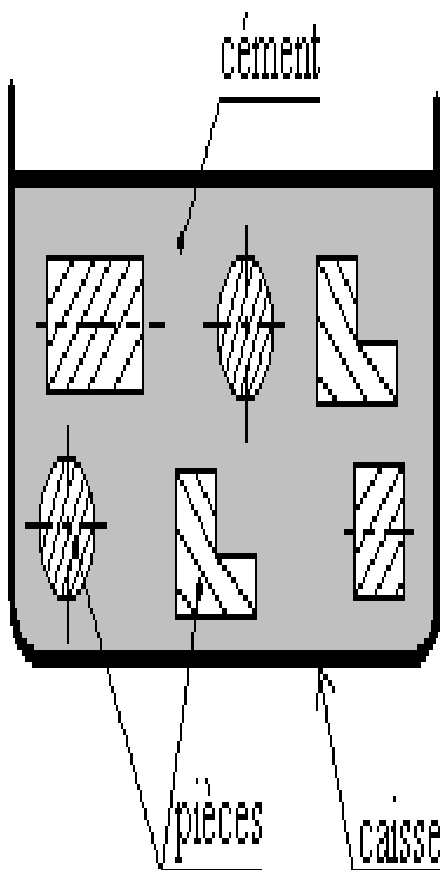
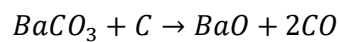
granulés reconstitués à partir d'un mélange de charbon de bois (60 à 75 %) et de carbonate de baryum (25 à 40 %) en poudre, soit sous la forme de morceaux de charbon de bois finement concassés enrobés de carbonate de baryum en présence d'un lait de chaux comme fixateur (Figure IV.4).

Une fois cimentées, les caisses ne sont ouvertes qu'après avoir été refroidies à l'air jusqu'à une température de 400 ou 500°C.

On obtient le carbone atomique de la façon suivante.:



La présence de carbonate augmente l'activité du ciment et enrichit l'atmosphère en oxyde de carbone.



Les pièces sont entourées d'un ciment solide à base de charbon de bois et de carbonate de baryum, le tout mis dans des caisses en acier réfractaire et porté en température de traitement pendant un temps très long (environ 1 heure par 0,1mm traité

Figure IV 4 Procédure de cémentation solide

IV.4.a.1.2 Par agents liquides

Les pièces sont plongées dans un bain de sel fondu à base de cyanure de baryum et de sodium vers 980°C. Cette technique relativement simple de mise en œuvre permet un chauffage homogène et une action chimique régulière (Figure IV.5).

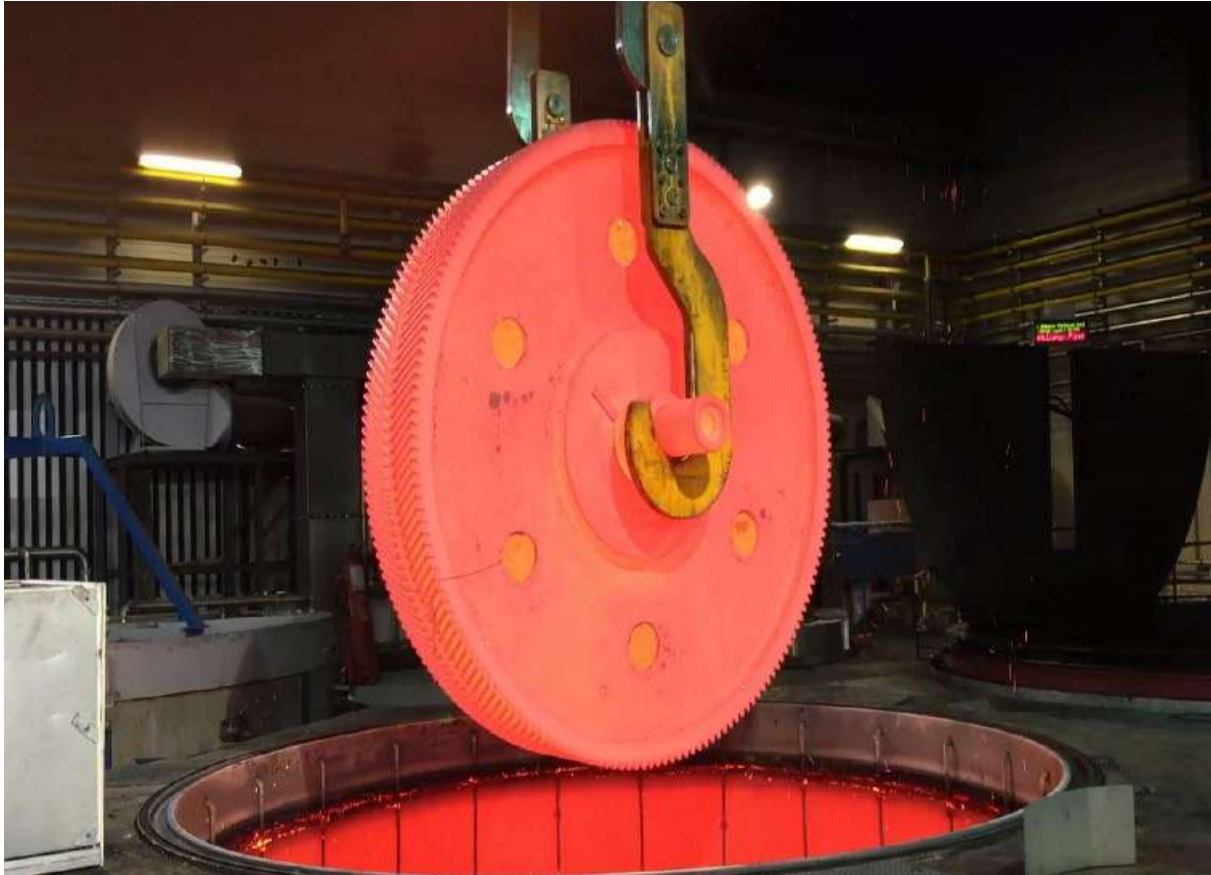


Figure IV 5 Procédure de cémentation liquide

IV.4.a.1.3 Par gaz

La méthode la plus utilisée est la cémentation gazeuse. Elle est fabriquée de manière industrielle à partir d'atmosphères obtenues grâce à l'installation et à la décomposition à chaud (combustion) d'hydrocarbures, des atmosphères qui se distinguent par leur teneur en carbone. On définit le potentiel carbone d'une atmosphère comme « la quantité de carbone présente à la surface d'un échantillon de fer pur en équilibre avec le milieu de cémentation dans les conditions choisies ». L'activité du carbone dans le métal est initialement inférieure au potentiel carbone de l'atmosphère, ce qui entraîne la carburation. En revanche, la décarburation du métal se produit. Lorsque ces deux variables sont équilibrées, le système est stable et ne change pas. L'oxyde de carbone et le méthane sont des gaz qui réagissent à chaud à la surface de l'acier.

À la surface de l'acier, des gaz comme l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud, ce qui permet au carbone libéré de s'insérer dans le réseau cubique à face centrée du fer. (Figure IV.6)

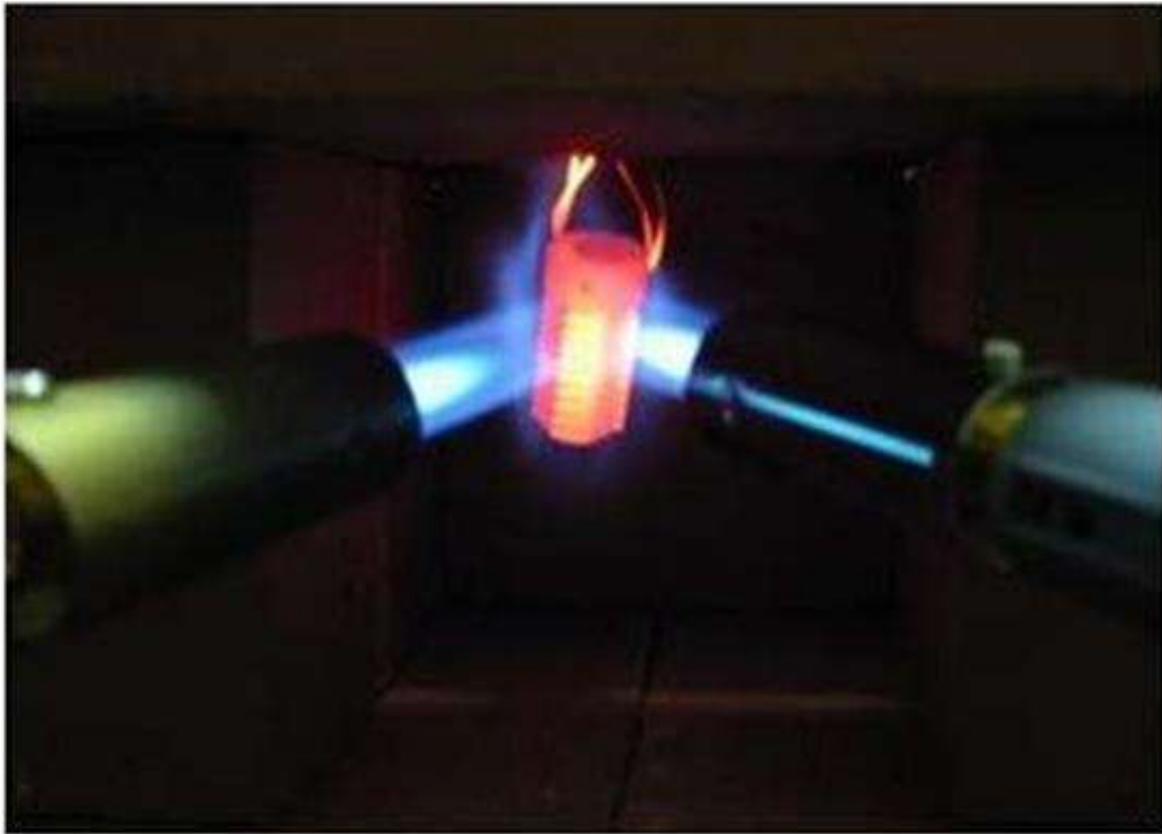


Figure IV 6 Cémentation par gaz

IV.4.a.2 Traitements thermiques après cémentation

Afin de donner aux pièces leurs caractéristiques finales, après avoir été cémentées, elles sont soumises à des traitements thermiques visant à :

- Modifier la structure et affiner le grain au centre et dans la couche cémentée.

- Être capable d'obtenir une couche cémentée de grande dureté et de bonnes propriétés mécaniques du cœur.

- Pour supprimer le réseau de carbure présent dans la couche cémentée, qui peut se produire en raison de la sursaturation en C.

La cémentation et le traitement thermique augmentent la limite de fatigue des pièces en raison de la présence de contraintes de compression résiduelles importantes dans la couche cémentée. Il est possible d'augmenter la limite de fatigue en utilisant un écrouissage réalisé par grenailage.

IV.4.a.3 Propriétés des pièces cémentées

La résistance des pièces en frottement est influencée par les caractéristiques de surface (usure et fatigue). En général, on cherche à créer des couches superficielles avec des caractéristiques spécifiques (notamment une dureté élevée) en utilisant un cœur peu fragile (donc moins dur) afin de donner à la pièce, dans son ensemble, une combinaison exceptionnelle de caractéristiques (résistance au frottement, à l'usure, à la fatigue et à la durée).

La cémentation consiste à traiter les matériaux afin d'améliorer la dureté de la surface extérieure d'un métal. Elle se manifeste par une couche de métal extrêmement fine qui est bien plus solide que le volume de métal le plus important sous la couche durcie. Utilisations : Pignonnerie automobile, engrenages de transmission.

Retiens

La cémentation est la formation de carbures à la surface de l'acier après l'absorption du carbone présent dans l'atmosphère du four. Le but de ces traitements thermiques consiste à augmenter la dureté de la surface et donc la résistance à la fatigue et à l'usure

IV.4.b Nituration

Le processus de nituration est l'un des traitements thermochimiques les plus utilisés pour la production de couches très dures en surfaces des aciers. Le principal mécanisme est la diffusion de l'azote (atomique) en profondeur de la couche traitée conduisant à la création de nouvelles phases favorables au durcissement escompté. Habituellement effectué dans la gamme de températures (500-590) °C (domaine ferritique), il ne nécessite pas de traitements thermiques ultérieurs tels qu'une trempe et des revenus

- Elle donne une plus grande dureté que la cémentation.

IV.4.b.1 Matériaux utilisés dans la nituration

L'aluminium, le chrome, le molybdène, le titane, le tungstène et le vanadium se combinent facilement avec l'azote à des températures élevées pour former des nitrides des métaux respectifs. Les alliages d'acier à faible teneur en carbone contenant ces métaux sont généralement de bons candidats pour la nituration

IV.4.b.2 Les procédés de nituration

Il existe 3 procédés :

- La nituration gazeuse (dissociation de l'ammoniac et décomposition au contact de l'acier)
- La nituration ionique
- La nituration en phase liquide (bains de sels à base de cyanures)

IV.4.b.2.1 La nitruration gazeuse

Ce procédé est l'une des méthodes les plus performantes pour améliorer les caractéristiques surfaciques des outils. On injecte du gaz ammoniac (NH_3) dans un four à moufle. Le taux de dissociation de l'ammoniac est déterminé par la légère surpression de l'atmosphère et le débit du gaz dans le four, à une température spécifique et pour une charge de pièces spécifique (Figure IV.7).

Profondeurs de couche nitrurée de 0.2 à 0.4 mm

Applications : pièces de glissement, arbre et cames



Figure IV 7 Four de nitruration gazeuse

IV.4.b.2.2 Nitruration ionique (assistée par plasma)

Au cours de la nitruration au plasma ou la nitruration ionique, les pièces à traiter sont placées dans des cornues à vide, qui sont alimentées par un mélange d'eau et d'azote en tant que gaz de traitement.

Dans une atmosphère gazeuse sous faible pression, lorsque des variations de potentiel sont établies entre une anode et une cathode, des collisions ionisantes entre électrons et molécules se produisent, et au-delà d'un certain potentiel, un régime de décharge lumineuse s'établit avec la production d'espèces ionisées dans les environs de la cathode. La mise en place

de cette décharge est conditionnée par la nature des gaz et la pression dans l'enceinte. Le plasma se compose d'ions, d'électrons et de neutrons excités provenant du gaz introduit ; il représente un milieu actif très agité et riche en énergie (Figure IV.8). Il a pour conséquence :

- Créer à la surface des pièces un effet thermique par dissipation de l'énergie cinétique des ions en énergie thermique lors de leurs collisions à la surface des pièces.
- Décaper des atomes superficiels du métal ; l'effet de ce décapage provoque un nettoyage des surfaces en les amenant à un état physiquement propre.

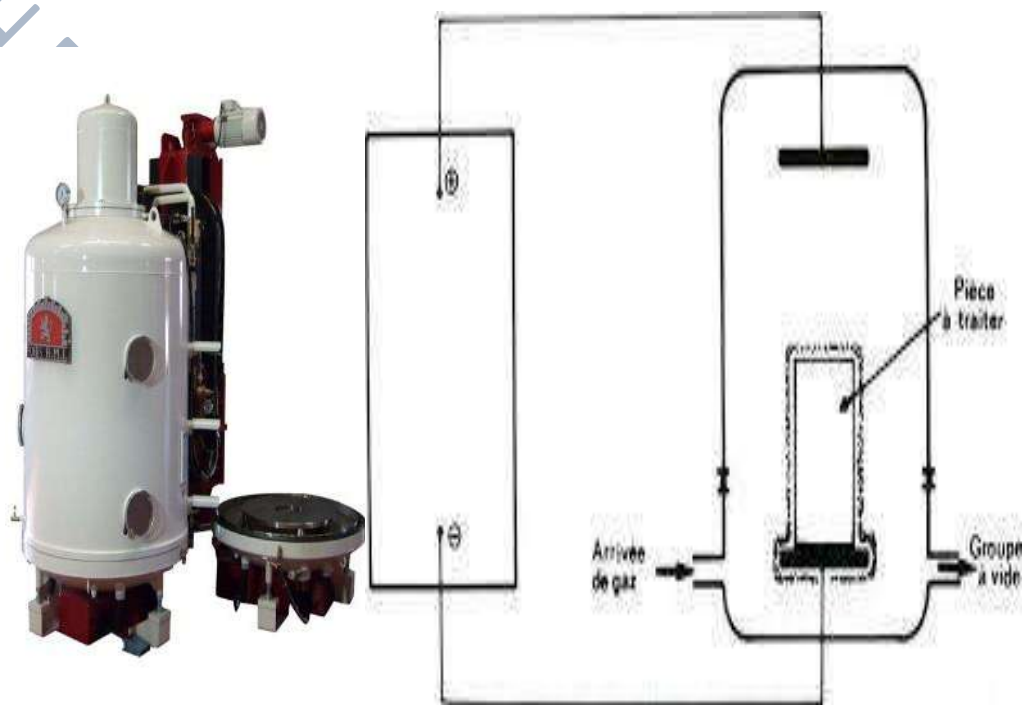


Figure IV 8 Nitruration ionique (four sous vide)

IV.4.b.2.3 Nitruration liquide

La nitruration en bain de sel implique l'utilisation d'un milieu donneur d'azote, comme un sel de cyanure. La présence de sels à la surface de la pièce entraîne également la formation de carbone, ce qui rend le bain de sel un processus de nitrocarburation.

Il s'agit d'une nitruration réalisée dans un bain de sels fondus. Le procédé est réalisé à une température de 570 °C pendant une durée de 0,5 à 3 heures dans un bain contenant des cyanures composés de 40% de KCNO et 60% de NaCN, ainsi que 15% de Na₂CO₃.

La basse température fait que l'azote fourni par la décomposition des cyanures est pratiquement le seul à diffuser dans l'acier. Elle peut être appliquée à une grande variété d'aciers au carbone, aciers faiblement alliés, aciers à outils et aciers inoxydables.

Dans la nitruration liquide, la stabilité dimensionnelle des pièces est préservée. La pièce nitrurée est caractérisée par sa résistance à l'usure, à la corrosion et à la fatigue (Figure IV.9)

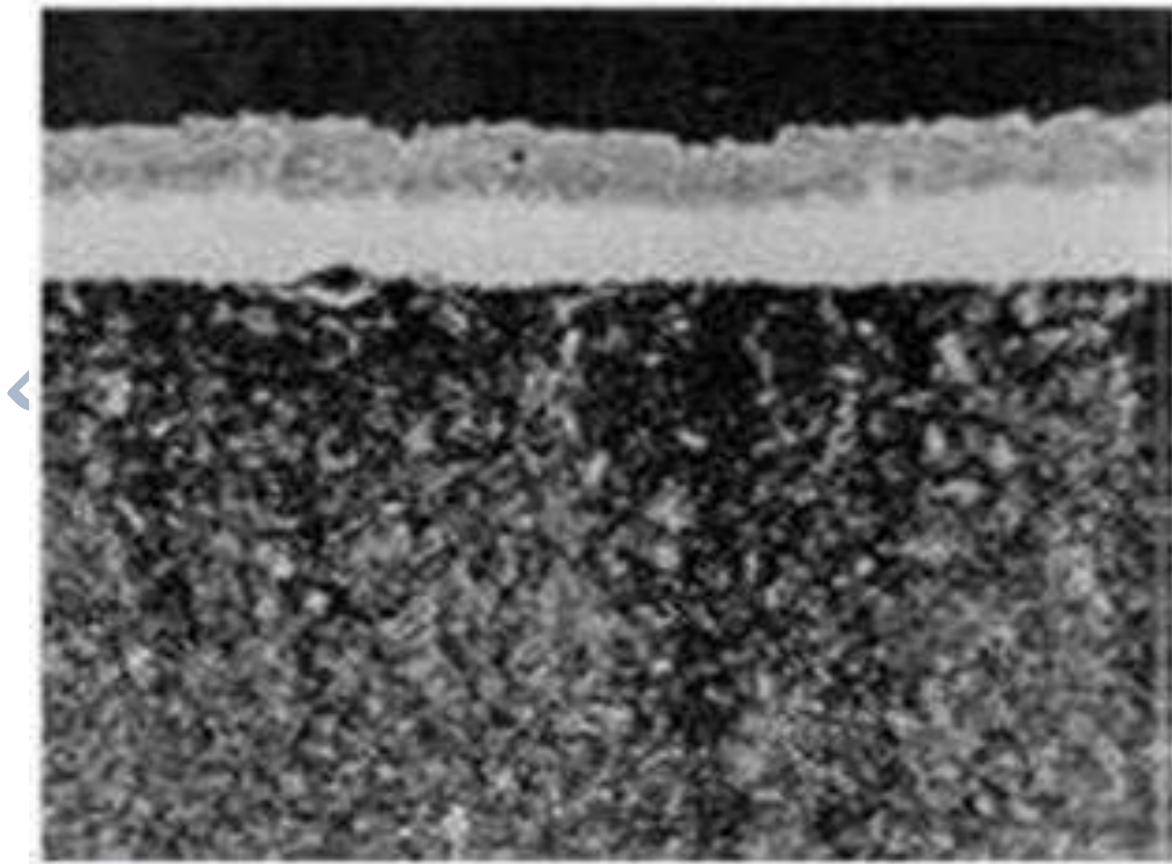


Figure IV 9 Couche nitrurée superficiellement

IV.4.c Carbonitruration

Ce processus consiste en une combinaison de cémentation et de nitruration.

- Chauffage dans une atmosphère gazeuse à une température de 600 à 900 °C permet d'augmenter la surface de carbone et d'azote.

La carbonitruration est une méthode thermochimique proche de la cémentation. On porte l'état austénitique du produit ferreux pour effectuer un enrichissement superficiel en carbone et en azote. En général, cette intervention est immédiatement suivie d'un durcissement par trempe.

L'action chimique se déroule dans une atmosphère gazeuse. Environ 5 % d'ammoniac et 2 % de propane sont ajoutés, à une température de 840 °C, pendant quelques heures (Figure IV.10). La production se fait à partir d'aciers au carbone ou d'aciers de cémentation.

L'azote a deux effets :

- Il accélère l'enrichissement en carbone.
- Il modifie les propriétés de la couche enrichie.

En effet, l'azote a une action fortement gammagène, il augmente la stabilité de l'austénite et abaisse donc la vitesse critique de refroidissement pour la formation de la martensite.

- L'opération est généralement suivie par une trempe.

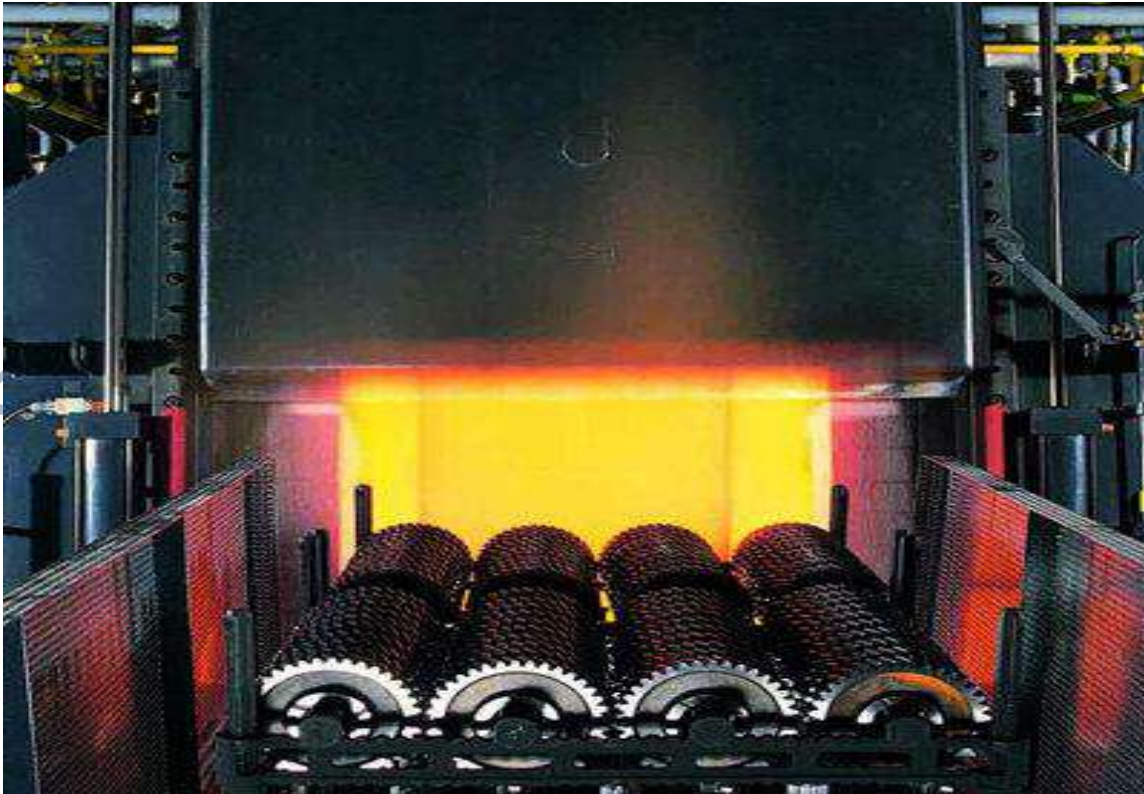


Figure IV 10 Procédé de carbonituration

IV.4.c.1 Traitements thermiques des pièces carbonitrurées

Les pièces carbonitrurées peuvent être traitées de diverses manières :

- Trempe directement à l'huile, éventuellement suivie d'une période de détente à une température de $160 \div 180$ °C.

- Étape de trempe : huile chaude/air. Ce procédé diminue les déformations et renforce la résistance des pièces.

- Trempe étagée dans un bain de sels, conformément aux instructions pour la cémentation, mais :

- Le N est très gammagène et des températures d'austénitisation plus basses peuvent être utilisées.

- L'augmentation de la trempabilité permet de refroidir à des vitesses plus faibles, ce qui réduit les déformations.

- N réduit considérablement M_s , ce qui entraîne une augmentation des niveaux d'austénite résiduelle.

IV.5 Matériaux traités

*Traitement thermique d'un métal

*Le traitement thermique du verre permet de renforcer sa résistance au bris en le recueillant dans certaines conditions.

*Le traitement thermique du bois permet de rendre le bois plus foncé tout en lui conférant une couleur plus homogène ; de renforcer sa stabilité dimensionnelle ; de renforcer sa résistance aux champignons (en portant le bois au-delà d'une certaine température, ce qui dégrade le glucose), mais en modifiant sa résistance ou son aspect (parfois pelucheux), plus chez les feuillus que chez les résineux.

Tab IV-1 Traitements thermiques en fonction des éléments diffusants

Éléments diffusants	Traitement
Carbone	Cémentation
Azote	Nitruration
Carbone + azote	Carbonitruration
Azote + carbone	Nitrocarburation
Soufre + azote + carbone	Sulfonitrocarburation
Azote + carbone + oxygène	Oxynitrocarburation
Bore	Boruration
Chrome	Chromisation
Aluminium	Aluminisation
Zinc	Shéardisation
Soufre	sulfuration

IV.6 Conclusion

Les traitements de surface jouent un rôle crucial dans la conception d'une pièce afin de satisfaire toutes les caractéristiques nécessaires aux conditions d'utilisation.

- Pour un coût souvent abordable, les caractéristiques globales de la pièce seront améliorées en optant pour un traitement de surface plutôt que de chercher un autre matériau de base qui répond à toutes les exigences.

De nos jours, de nombreuses petites entreprises sous-traitantes réalisent des opérations de traitement de surfaces pour le compte de grands groupes industriels dans les secteurs : automobile, des bâtiments, aérospatiale, maritime, armement, nucléaire, mécanique.

Les procédés thermochimiques permettent d'obtenir des propriétés spécifiques à la surface d'une pièce sans modifier les propriétés dans la masse. Ils améliorent principalement une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : la dureté de surface, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et le comportement au frottement.

Les diverses techniques de traitement thermique offrent la possibilité de modifier et d'obtenir différentes caractéristiques mécaniques de l'acier, telles que la dureté et l'élasticité désirées.

V. Chapitre V : Comment durcir un acier

V.1 Introduction

L'acier, qui est principalement constitué de fer et de carbone, est présent dans de nombreux objets de notre vie quotidienne. Parler des aciers serait plus précis, car il y en a plusieurs types selon leur composition chimique. L'acier peut être soumis à différents traitements thermiques afin de lui donner certaines caractéristiques. Afin de le durcir, il est nécessaire de le tremper. Il s'agit de chauffer le métal puis de le refroidir de manière régulière dans un bain d'eau ou d'huile. Une fois la trempe terminée, on procède à un revenu qui permet de maintenir les caractéristiques de dureté et de ductilité de l'acier.

V.2 Chauffer l'acier

- Mettez le chalumeau à feu.
 - Débloquez la valve de gaz située à la base de l'équipement.
 - Placez le feu sur la pièce en acier.
 - Utilisez une pince métallique pour prendre la pièce et la maintenir à l'écart de la flamme.
 - Utilisez votre main dominante pour manipuler le chalumeau et maintenez la pièce de l'autre.
- En cas d'impossibilité, placez-la sur un support ignifugé ou sur une enclume (Figure V.1).
- Faites chauffer toute la pièce de manière uniforme.

Le chalumeau offre la possibilité de manipuler des objets de petite taille tels que la lame d'un couteau. Si vous désirez renforcer des pièces de plus grande taille, pensez à faire appel à une forge.

Des appareils simples à propane ou butane existent et des appareils plus avancés comprennent également une bouteille d'oxygène. Pour chauffer du métal de manière simple, il est possible de choisir un chalumeau basique.

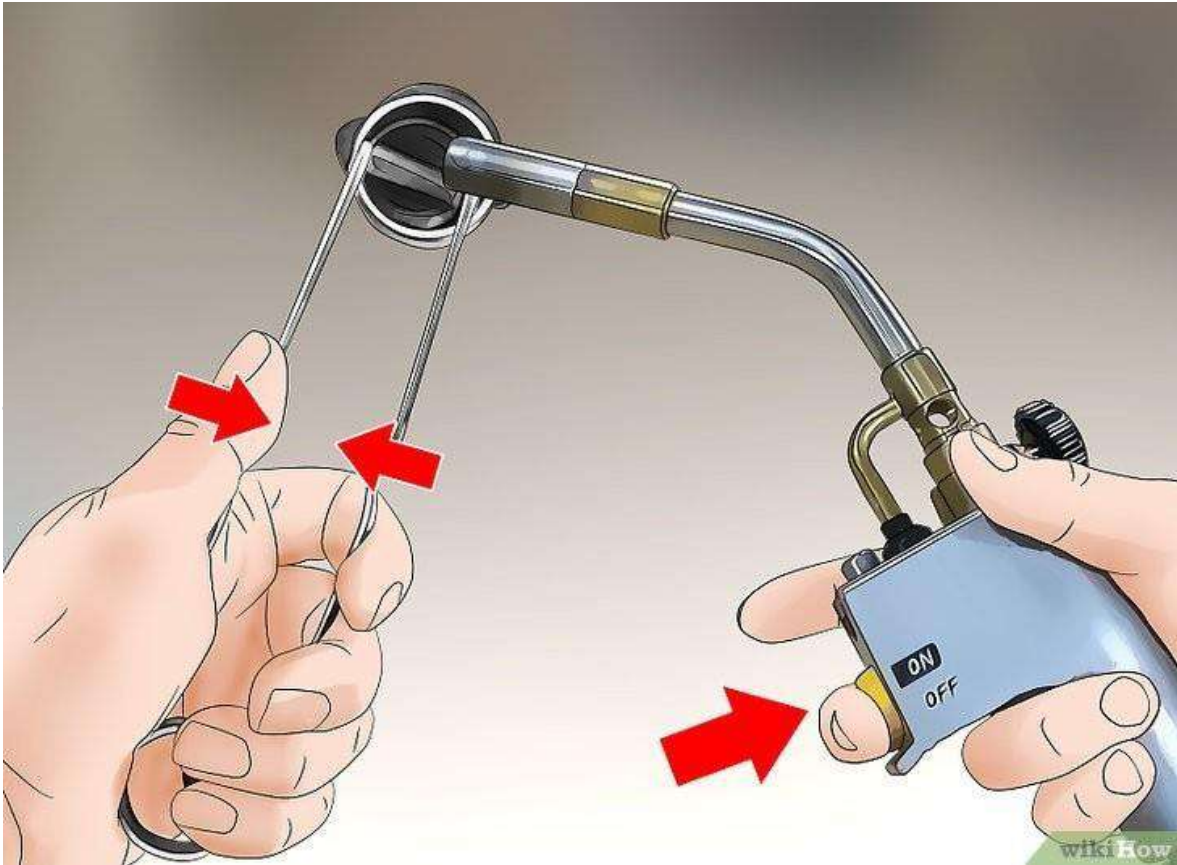


Figure V 1 Manipulation de chalumeau

- Chauffez l'acier jusqu'à ce qu'il devienne rouge cerise (Figure V.2).

Son objectif est d'atteindre la température d'austénisation de l'acier grâce au chauffage. C'est un point où la structure change, ce qui rend l'alliage extrêmement dur et cassant. La température critique varie en fonction du type d'acier, mais elle se situe habituellement entre 750 °C et 800 °C. L'acier acquiert ainsi une teinte rouge cerise à rouge foncé. Une fois que vous avez obtenu cette couleur, votre acier est prêt à subir la phase de cooling.



Figure V 2 Changement de couleur de l'acier pendant le chauffage

Il convient de souligner que la durée de chauffage est d'autant plus longue que l'acier est très carboné. En effet, lorsque l'acier n'est plus magnétique, il est prêt à être refroidi. Dans la réalité, placez un aimant sur votre espace. Si elle tombe, vous pouvez passer à la prochaine étape.

V.3 Refroidir l'acier

-Mettez en place le bain de trempe. Le récipient doit résister aux températures élevées, être assez grand pour y plonger toute la pièce à travailler et présenter une ouverture suffisamment large. Le choix du liquide de trempe varie en fonction du type d'acier, mais l'huile est la méthode la plus répandue. Il est nécessaire que le liquide soit au moins à température ambiante, mais il peut être chauffé lui-même.

-Veuillez remplir votre récipient d'eau ou d'huile jusqu'à quelques centimètres du bord.

L'utilisation de l'eau permet de refroidir rapidement une pièce, cependant cette approche peut engendrer des fissures dans le métal, connues sous le nom de tapures. Ainsi, les petites pièces peuvent aisément se tordre et se briser après avoir été trempées à l'eau. Afin de réduire ce risque, on ajoute des substances telles que du sel à l'eau, mais cette méthode est complexe à maîtriser.

Le refroidissement de l'huile est plus lent que celui de l'eau, car son point de fumée est plus élevé. Cependant, en présence d'acier chaud, l'huile peut être enflammée. Pour obtenir une trempe efficace, il est recommandé de chauffer l'huile jusqu'à ce qu'elle soit parfaitement fluide, idéalement entre 50 °C et 90 °C.

- Plongez la pièce d'acier dans le bain. Manipulez-la avec une pince
- Attendez que la pièce refroidisse.

Le transfert de chaleur fait bouillir le liquide de trempe tant que l'acier est chaud. Continuez à immerger la pièce jusqu'à ce que le bouillonnement s'arrête. Le temps nécessaire pour se refroidir varie de quelques secondes à quelques dizaines de secondes.

- Retirez le corps en acier du bain.

Après la trempe, l'acier est extrêmement solide, mais il est aussi fragile. En effet, lorsqu'il est soumis à un choc, il peut se briser tel du verre. Il est donc primordial de faire preuve de prudence en manipulant votre pièce.

- Assouplissez la pièce en acier. Recouvrez-la d'un tissu propre pour éliminer l'excès d'eau susceptible d'attaquer l'acier. Si vous avez effectué une trempe à l'huile, nettoyez la pièce en utilisant un produit adéquat tel que l'acétone



Figure V 3 Milieux de refroidissement

V.4 Effectuer le revenu

Donnez une température au four à 200 °C. L'opération du revenu implique de chauffer légèrement l'acier pour lui redonner sa souplesse et sa solidité.

Assurez-vous d'atteindre la température désirée avant d'enfourner la pièce. Ainsi, votre pièce sera renforcée de manière homogène.

Cuire la pièce pendant une durée de trois heures. Au cours de cette étape de chauffage, l'acier diminue sa dureté, mais développe sa souplesse et sa résistance. Ainsi, le revenu permet d'ajuster l'équilibre entre les diverses caractéristiques de l'acier en fonction de son utilisation.

De cette façon, la température de retour peut varier en fonction de la nature de la pièce, qu'il s'agisse d'une lame de couteau ou d'un ressort. Il est nécessaire de maintenir cette température pendant au moins une heure.

Si vous avez recours à un chalumeau, étendez la flamme sur toute la superficie de la pièce. Continuez à vous déplacer pour assurer un durcissement aussi homogène que possible. Mettez votre pièce à chauffer jusqu'à ce qu'elle atteigne la température désirée. On peut chauffer une lame de couteau à 230 °C, ce qui lui donne une couleur jaune pâle. En utilisant une lame de scie, il est recommandé d'augmenter la température jusqu'à 300 °C, ce qui donnera à l'acier une teinte bleue.

Optez pour l'éteindre du four et laissez la pièce refroidir. Après trois heures de temps.



Figure V 4 Four de revenu

V.5 Avertissements

- Assurez-vous de porter des lunettes, un tablier et des gants de protection à chaque étape du processus.
- Il est préférable de ne pas toucher le métal à mains nues, car cela pourrait vous causer des blessures graves.
- Maintenez toujours un extincteur à proximité. Il est complexe de maîtriser les opérations de trempe et de revenu pour les novices. Si vous avez des interrogations, n'hésitez pas à solliciter des conseils auprès de spécialistes.

Il est important de souligner que les paramètres de température et de temps diffèrent en fonction du type d'acier. En cas de doute quant aux caractéristiques de votre matériau, veuillez prendre contact avec le fabricant ou le fournisseur.

V.6 Éléments nécessaires

- Un chalumeau
- Un allume-gaz
- Une pièce en acier
- Une pince métallique
- Des lunettes de protection
- Des gants épais de protection
- Un contenant résistant à la chaleur
- De l'eau ou de l'huile végétale
- Un tissu propre et un produit de dégraissage
- Un four

V.7 Mesures de sécurité

- Assurez-vous de toujours porter des gants et des lunettes de protection lors de l'utilisation d'un chalumeau.
- Avant de vous servir d'un chalumeau, veillez à bien lire la notice et à prendre toutes les précautions requises.
- Assurez-vous de travailler dans un environnement bien ventilé pour prévenir toute accumulation de gaz.

VI. Annexe 1 : TP Traitements thermiques

VI.1 Rappel théorique

VI.1.a Introduction

Les traitements thermiques sont des procédés qui impliquent un chauffage puis un refroidissement, dans le but de donner à une pièce métallique les caractéristiques les plus adaptées à son utilisation ou à sa mise en forme.

VI.1.b Quels sont les différents types d'un traitement thermique

Les principaux traitements thermiques de larges applications sont :

- La trempe.
- Le revenu.
- Le recuit.

VI.1.c Quels sont les éléments d'un traitement thermique ?

Un processus de traitement thermique implique de prendre en compte trois facteurs :

- La température d'échauffement
- Le temps de conservation.
- La manière de refroidir (environnement, nature et vitesse))

VI.1.d Quelles sont les caractéristiques de mise en œuvre ?

L'objectif est de trouver un équilibre entre les caractéristiques suivantes :

- Ductilité (aptitude à se déformer)
- Résistance (élasticité limitée, résistance à la traction)
- Résilience, ou persévérance (résistance face aux chocs)
- Dureté

VI.2 Objectifs

- Étudier comment le milieu de trempe affecte certaines caractéristiques mécaniques et structurales des aciers ;
- Étudier comment la vitesse de refroidissement, en se basant sur les diagrammes TTC, affecte la structure de l'acier après trempe.

VI.3 Equipements utilisés

Eprouvettes en acier ;

Polisseuse ;

Duromètre ;(est un instrument utilisé pour mesurer la dureté d'un matériau)

Four électrique ;

Bains de trempes (Huile, l'eau.....)

Quatre échantillons en aciers.

Gants de protection thermique

Masque de protection de visage

Pince

Microscope optique

VI.4 Etude expérimentale

VI.4.a Durcissement par trempe

VI.4.a.1 But

La trempe est un traitement thermique qui donne à l'acier une grande dureté

VI.4.a.2 Principe

- Lors de l'essai, la pièce est exposée à un cycle thermique spécifique.
- Avant et après traitement, il est possible de mesurer la dureté d'une pièce afin d'avoir une idée de l'impact de la trempe sur sa dureté et donc sur certaines propriétés mécaniques.

VI.4.b Préparation des échantillons

VI.4.b.1 Nettoyage des surfaces

Avant tout traitement, il est essentiel de nettoyer les surfaces afin d'éliminer les souillures présentes à la surface des composants.

Le dégraissage consiste à éliminer les corps gras en utilisant des méthodes mécaniques, chimiques et électrolytiques.

Le décapage consiste à éliminer toute trace de corrosion et d'oxyde qui se fixent à la surface des pièces en utilisant une méthode mécanique (sablage ou grenaillage), chimique ou électrolytique.

La polisseuse est utilisée pour polir une de ces faces avec un papier abrasif de 120.

VI.4.b.2 Manipulation

1-Il y a quatre échantillons d'acier identiques. On ne mettra pas un échantillon dans le four ; il sera facturé comme un échantillon de référence (état initial). (état initial). Évaluer sa dureté Brinell HB (utiliser un duromètre et un pénétrateur Brinell

2- Placer trois échantillons d'acier dans le four, augmenter progressivement sa température jusqu'à ce qu'ils atteignent la température de trempe ($T_{tr} = \dots\dots\dots$) pendant une période ($t_{ch} = \dots\dots\dots$).

- 3- Conserver les divers échantillons au four pendant une période ($t_m = \dots$).
- 4- Il est nécessaire de sortir les trois échantillons du four et de les tremper dans un environnement de trempe différent (un dans l'eau, l'autre dans l'huile et le dernier à l'air libre). Il est nécessaire de saisir les échantillons en utilisant une pince.
- 5- Appliquer un papier abrasif 400 sur chaque face de chaque échantillon et évaluer la dureté Rockwell de chaque HRC : faire appel à un duromètre équipé d'un pénétrateur Rockwell. Recommencer cette procédure de polissage en utilisant une polisseuse.
- 6- Évaluer les duretés avant trempe (la dureté de l'échantillon de référence) et les résistances après trempe pour chaque milieu (eau, air, huile). Appliquer les résultats aux tableaux ci-dessous :

Tableau 1 :

Echantillons	Milieux de trempe	Température de trempe (T_{tr}) °C	Temps de chauffage (t_{ch}) h/min	Temps de maintien (t_m) h/min	Temps de refroidissement (T_{re})
1	Eau				
2	Huile				
3	Air				

- 7- Tracer le cycle thermique $T = f(t)$ de la trempe pour chaque échantillon et expliquer ces courbes

Tableau :2

	H_1	H_2	H_3	H_{moy}
Echantillon de référence				
Refroidissement à l'eau				
Refroidissement à l'air				
Refroidissement à l'huile				

- 8- Déterminer qualitativement la constitution de l'acier après trempe en utilisant le diagramme TRC de l'acier étudié et les lois de refroidissement des milieux de trempe pour le même diamètre de l'échantillon utilisé.
- 9- Comparer les valeurs théoriques avec celles obtenues expérimentalement. Conclure.

VI.4.b.3 Observation structurale

- 1- Mettre la surface préalablement polie dans le Nitral et la faire remuer pendant quelques minutes.
- 2- Arroser la pièce à l'eau pour arrêter l'attaque chimique ; ensuite sécher la pièce avec un chiffon propre sans frottement.
- 3- Observer la structure de la surface à l'aide de microscope optique

4- Les différents échantillons (avant et après traitement) doivent être observés par un microscope optique. Choisissez la bonne structure et sauvegardez-la.

5- Faites une analyse structurale entre les trois échantillons selon :

La couleur des pores

La forme des grains

La taille des grains (avant et après traitement)

VI.4.c Conclusion

- Nous utilisons le diagramme de transformation fer -carbone pour déterminer la température de transformation (austénitisation)
- Nous utilisons le diagramme de refroidissement TRC pour décrire la transformation d'un acier à l'état austénitisé au cours d'un refroidissement continue.

VII. Annexe 2 : Diagrammes TTC, TRC et TTT

Deux modélisations des transformations diffusionnelles sont disponibles pour le métallurgiste : une approche isotherme d'une part, des diagrammes TTT (Transformations Temps Températures), et une approche anisotherme d'autre part, des diagrammes TRC (Transformations à Refroidissement Continu).

VII.1 Diagramme de phase fer-carbone (TTC)

Il s'agit du schéma d'équilibre métastable du fer-carbone. Il illustre la structure des phases et la composition des alliages, dont la teneur varie de la pureté du fer à celle de la cémentite. (Figure VII.1)

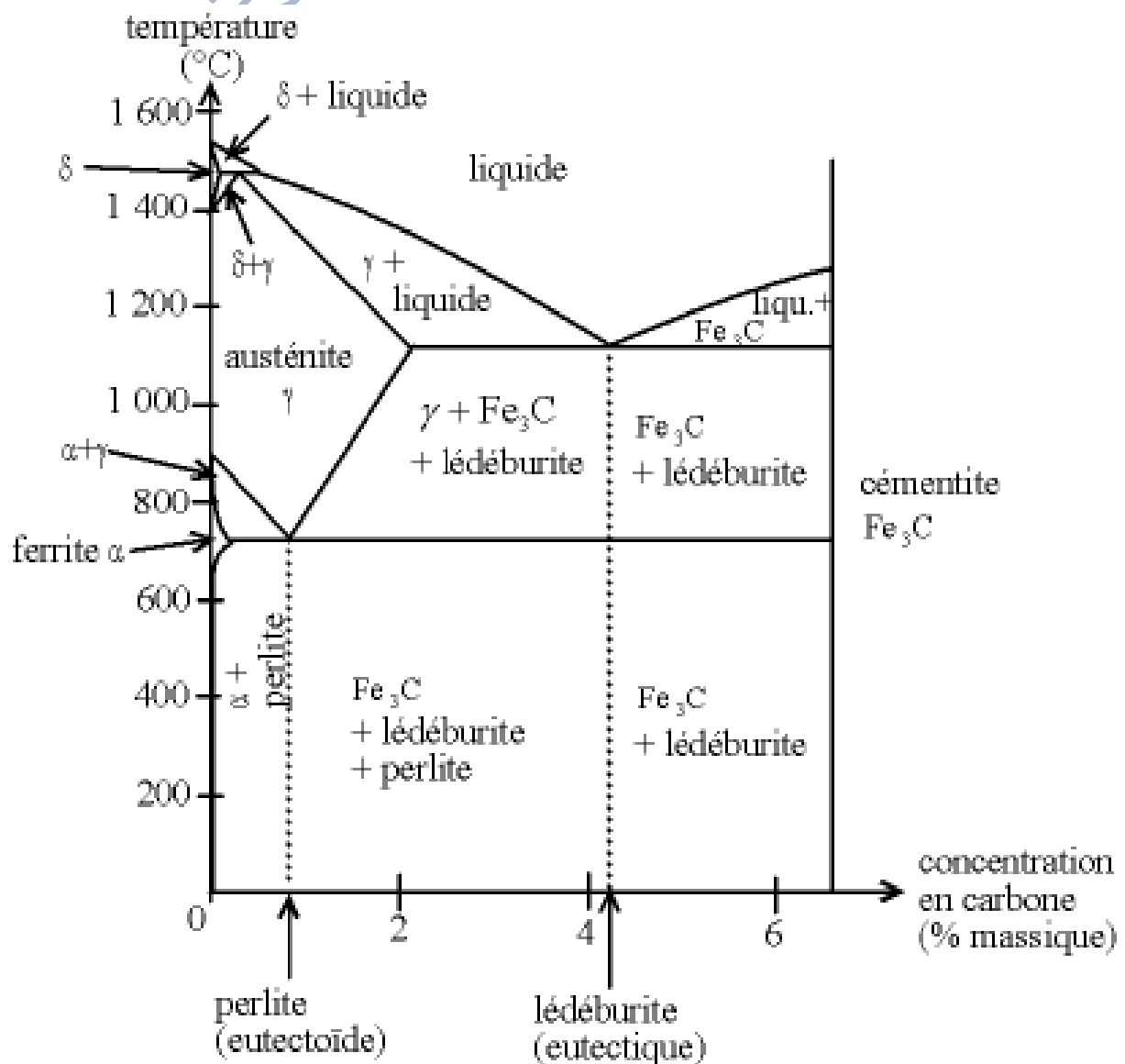


Figure VII 1 Diagramme de phase fer-carbone sous une atmosphère

VII.2 Diagramme de refroidissement TRC

Un diagramme TRC, également connu sous le nom de diagramme de transformations en refroidissement continu, est un schéma qui permet de prédire la structure cristallographique d'un acier qui subit des modifications thermomécaniques. (Figures VII.2 et VII.3) Une échelle logarithmique du temps en secondes est présente en abscisse. La température est exprimée en degrés Celsius. Les caractéristiques identifiées A, B ou C désignent les vitesses de refroidissement à utiliser en fonction de la dureté à atteindre.

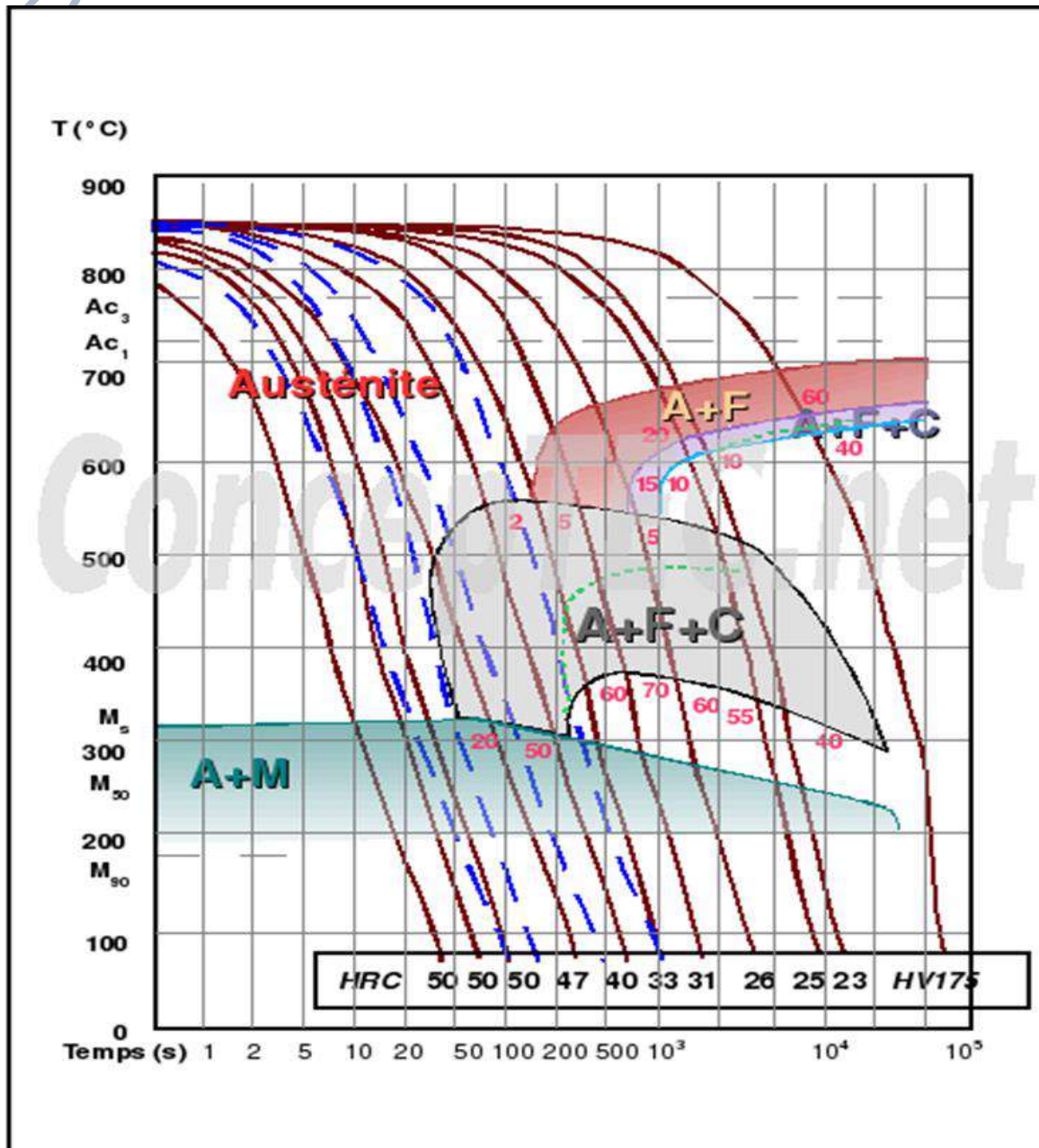


Diagramme TRC de l'acier 30NiCr11 (d'après l'atlas IRSID)

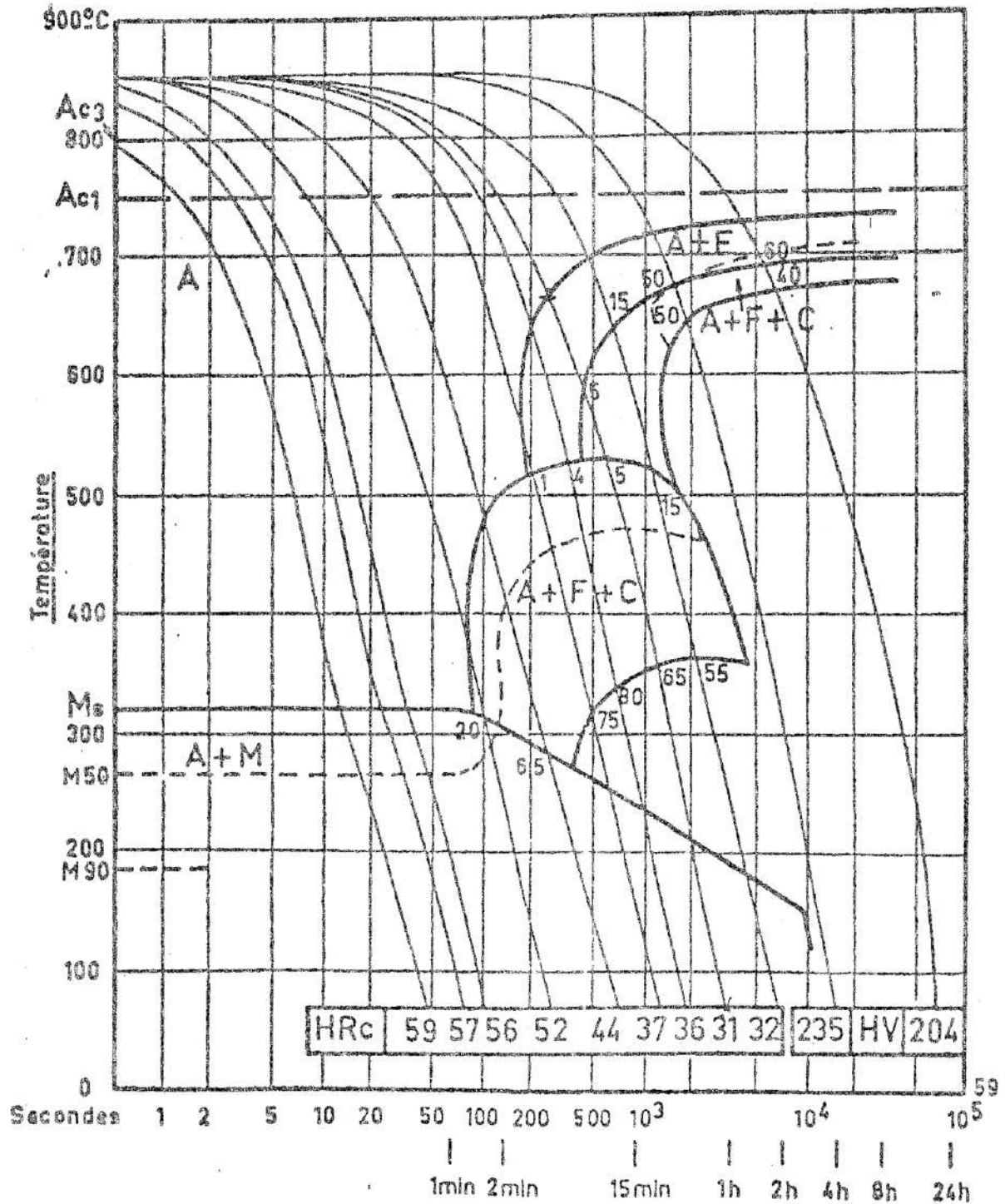
Figure VII 2 Exemple de Diagramme DRC d'un acier 30NiCr11

35 CD 4

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %	Al %
0.37	0.78	0.30	0.010	0.019	0.17	1.00	0.18	0.10	0.072

Austénisé à : 850°C 1/2 h

Grossueur du grain : 8-9



VII.3 Diagramme TTT

Le diagramme TTT représente les évolutions isothermes (à température constante) d'un matériau après un refroidissement extrêmement rapide à partir d'une température d'austénitisation jusqu'à la température d'intérêt (Figure VII.4) par refroidissement. Il est important de ne lire les diagrammes TTT que selon des isothermes. Ils ne peuvent pas être employés pour évaluer les modifications lors d'un processus de refroidissement.

Composition: 0.44% C - 0.80% Mn - 0.31% Si - 0.013% S - 0.030% P - 0.46% Ni - 0.96% Cr - 0.05% Mo - 0.18% Cu Grain size: 9 Austenitized at 850°C (1562°F) for 30 min

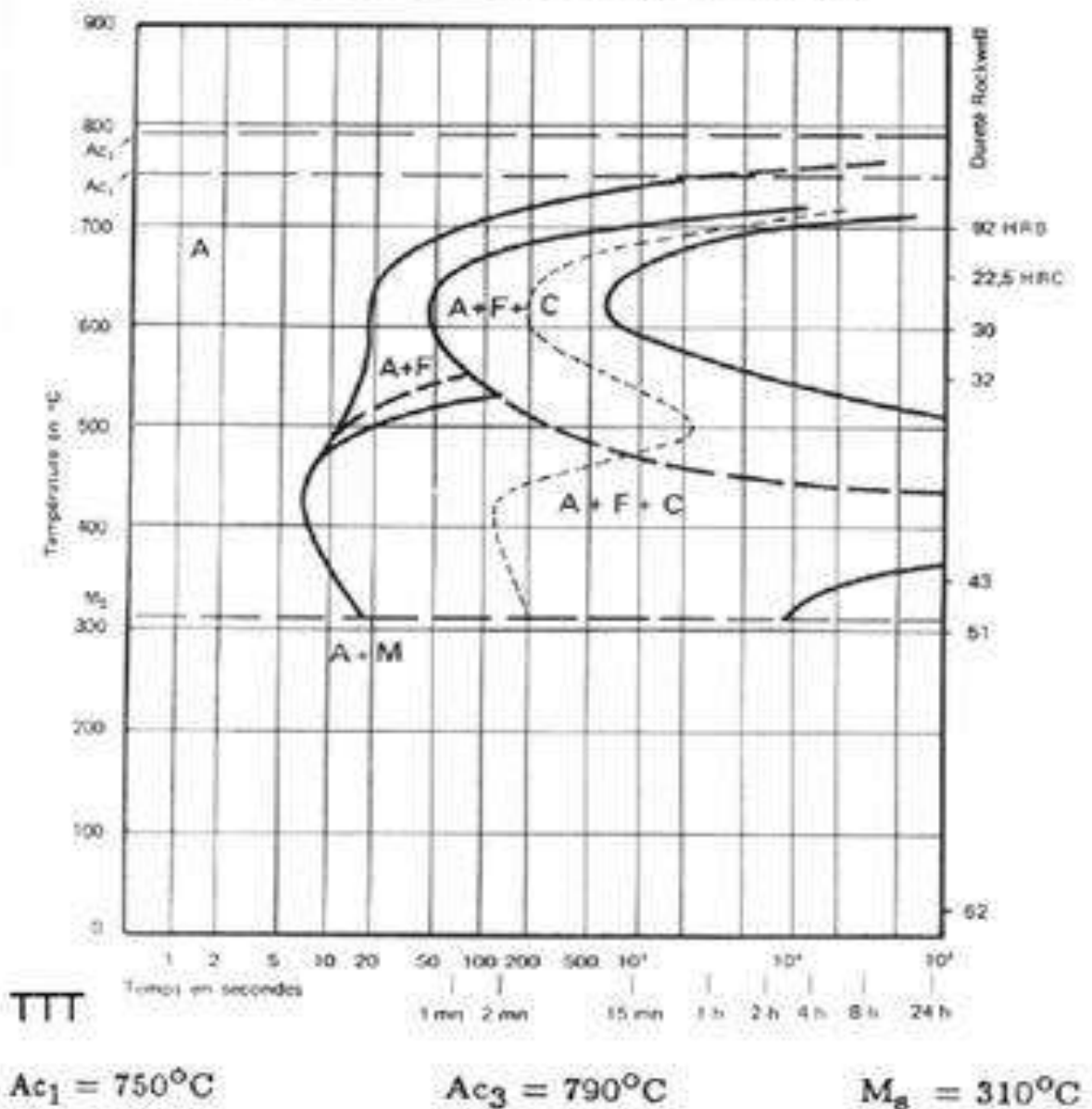


Figure VII 4 Diagramme TTT pour un acier de composition donnée

Bibliographie

1. Matériaux, J.Lignon et M.Mijon, édition librairie Delagrave, 1967.
2. Matériaux, tome 1 et 2, N.Bouaoudja, édition OPU, 1992.
3. Métallurgie, élaboration des métaux, C.Chaussin et G.Hilly, édition Dunod Paris, 1972.
4. Métallographie et traitements thermiques des métaux, I.Lakhtine, édition Mir Moscou, 1978.
5. Technologie professionnelle générale, A.Castel et A.Dupont, édition Desfarges Paris, 1980.
6. Korrosion und korrosionsschutz, Collectif d'auteurs, édition Veb Deutcher Verlag Leipzig, 1973.
7. Corrosion et chimie de surface des métaux, Diter Landolt, édition presses polytechniques et universitaires romandes.
8. INRS, Ateliers de traitement thermique, Hygiène et sécurité. Cahiers de notes documentaires, No183, 2^e trimestre 2001, pp.6 et 7.
9. <http://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/Traitement%20thermique.pdf>
10. <http://www.a3ts.org/wp-content/uploads/fiches-techniques/A3TS-TRAITEMENT-PAR-LE-FROID.pdf>
11. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-traitement-des-metaux-tiamd/archive-1/cementation-carbonitruration-m1226/traitement-en-milieu-solide-cementation-solide-ou-cementation-en-caisse-m1226niv10002.html>
12. Précis de métallurgie : élaboration, structures-propriétés, normalisation / J. Barralis ; G. Maeder / AFNOR /1997
13. Matériaux industriels : matériaux métalliques / M. Colombié / Dunod / 2000
14. Métallurgie : métaux, alliages, propriétés / G. Murry / Dunod / 2004
15. Métallurgie Tome I : alliages métalliques / C. Chaussin ; G. Hilly / Dunod /1967
16. Principes de base des traitements thermiques, thermomécaniques et thermochimiques des aciers / A. Constant ; G. Henry ; J.C. Charbonnier / Pyc Edition / 1992
17. Eléments de Métallurgie Physique T3 à T5 / Adda ; Philibert ; Quere ; Dupouy / CEA / 1988
18. Science des matériaux : métallurgie mécanique - Du microscopique au macroscopique / Cornet ; Hlawka / Ellipses / 2006 / Technosup