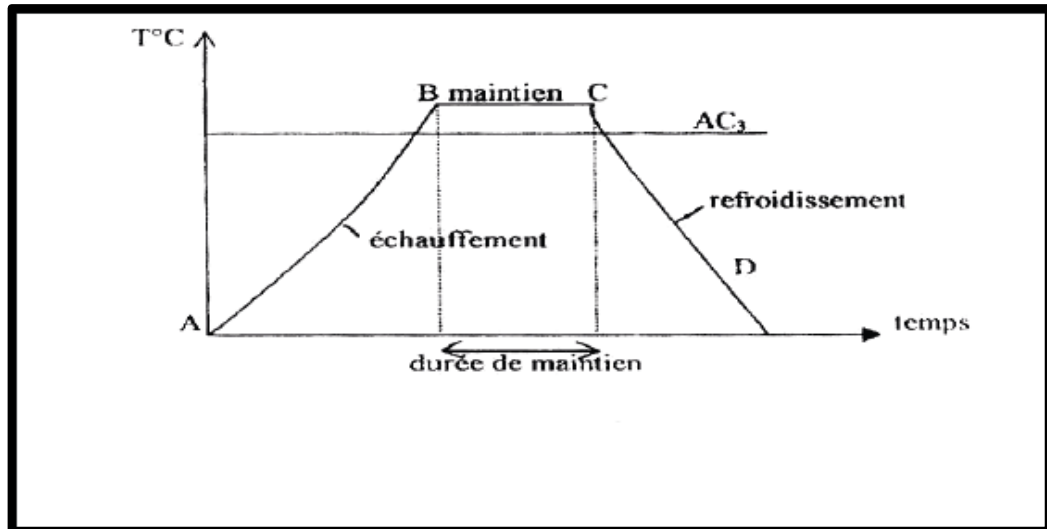


Chapitre II. Les traitements thermiques:**II.1. Introduction:**

Les traitements thermiques sont définis comme étant des opérations de chauffage et de refroidissement réalisées sur les métaux en générale et sur les aciers en particulier dans le but de modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques. Pour le cas des aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, certains traitements sont nécessaires pour permettre d'acquérir une performance optimale. Parmi ces traitements on peut citer les traitements thermiques ordinaires comme la trempe, le revenu et le recuit. Ces dernières permettent de modifier les microstructures initiales et par conséquent de modifier les propriétés mécaniques de l'acier telles que: la limite élastique, la résistance à la traction, la ténacité, la dureté et la résilience selon les besoins de l'utilisateur. A l'inverse de la trempe, les traitements de recuit sont généralement effectués avec comme objectif de ramener le métal vers un équilibre structural et mécanique. De ce fait, ils sont réalisés dans le but de faire disparaître les états hors équilibre résultant des traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques.[11]

II.2.Type des Traitements Thermiques:**II.2.1. Les traitements thermiques ordinaires:**

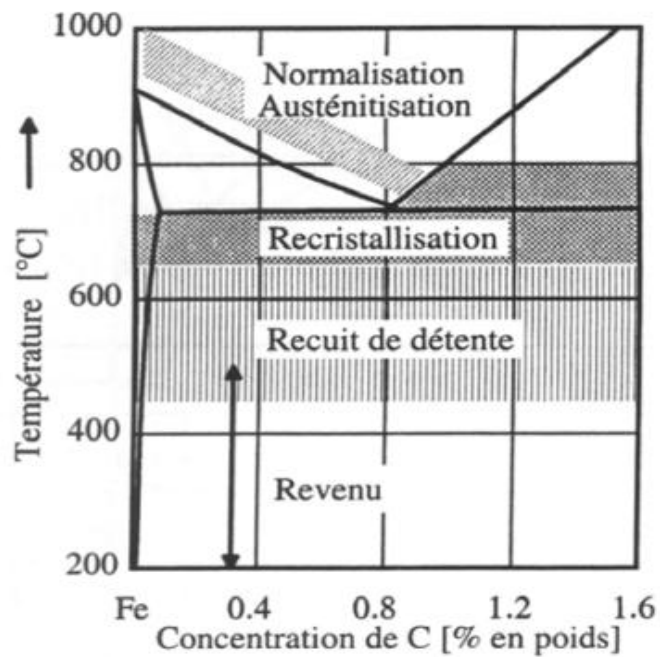
On appelle traitement thermique ordinaire tout traitement réalisé selon le cycle suivant : chauffage à une température donnée (le choix de la température dépend du type de traitement à être effectué), maintient à cette température pendant un temps déterminé, puis refroidissement dans un milieu choisit.



Fig(II.1) la variation de la température en fonction du temps.[11]

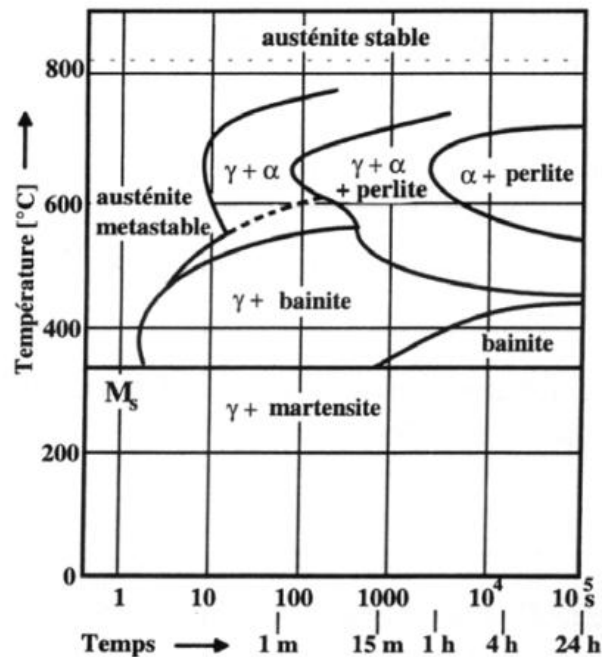
On peut distinguer trois types de traitements thermiques ordinaires : la trempe, le revenu et le recuit.

II.2.1.1. La trempe:



Fig(II.2) Domaines de température d'austénitisation et d'autres traitements thermiques des aciers au carbone.[11]

La trempe suit le cycle ordinaire qui consiste à chauffer l'acier dans le domaine austénitique puis refroidit rapidement dont le but d'obtenir une structure hors d'équilibre qui permet de donner à l'acier une dureté très élevée par la formation de la martensite ou de la perlite fine. La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier. L'austénitisation consiste d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés (30-50°C) au-dessus de son point de transformation. Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques α (c.c) en austénite γ (c.f.c) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite. La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier. Pour les aciers au carbone, la trempe s'effectue généralement à des températures comprises entre 20-40°C. Pour une trempe plus efficace qu'avec l'eau pure certains ajoutent 10% de chlorure de sodium. Il est évident que les couches d'oxyde adhérant à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente. Le refroidissement rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable. L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion. Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, appelés plans d'accolement, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de même orientation. Un plan d'accolement est un plan cristallographique dans lequel la disposition des atomes est aussi identique que possible dans l'ancienne et la nouvelle structure (minimum de distorsion). Lors de la transformation les atomes ne se déplacent que d'une distance nettement inférieure au paramètre de la maille. L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation



Fig(II.3) courbe TTT(acier faiblement allié 0.35%C.ce diagramme se lit en suivant une isotherme.[11]

II.2.1.1.2. Les paramètres de trempe:

Les transformations des aciers après la trempe dépendent de plusieurs paramètres. Pour le cas par exemple des pièces ou échantillons de petites dimensions ces paramètres sont au nombre de trois : La composition chimique de l'acier, la température de trempe et la loi de refroidissement. Le premier paramètre dépend en premier lieu de la courbe TRC (fig:II.5) . Les aciers qui présentent une bonne trempabilité, l'obtention d'une structure martensitique se fait à une vitesse de refroidissement moins rapide, alors que pour les aciers qui ont une mauvaise trempabilité l'obtention d'une structure martensitique demande des vitesses de refroidissement plus rapides.

La température de trempe est un paramètre très important, car le séjour dans le domaine austénitique pendant longtemps peut conduire à l'échauffement de l'acier et par conséquent on assiste au grossissement du grain austénitique qui à son tour va altérer la structure, et il est donc difficile de remédier à ce défaut par un traitement ultérieur. En effet, le choix de la température de trempe dépend de la nuance de l'acier et des propriétés qu'on désire obtenir. Le troisième paramètre qui doit être pris en considération est le bain de trempe (loi de refroidissement). Ce dernier dépend aussi des courbes TRC et TTT.

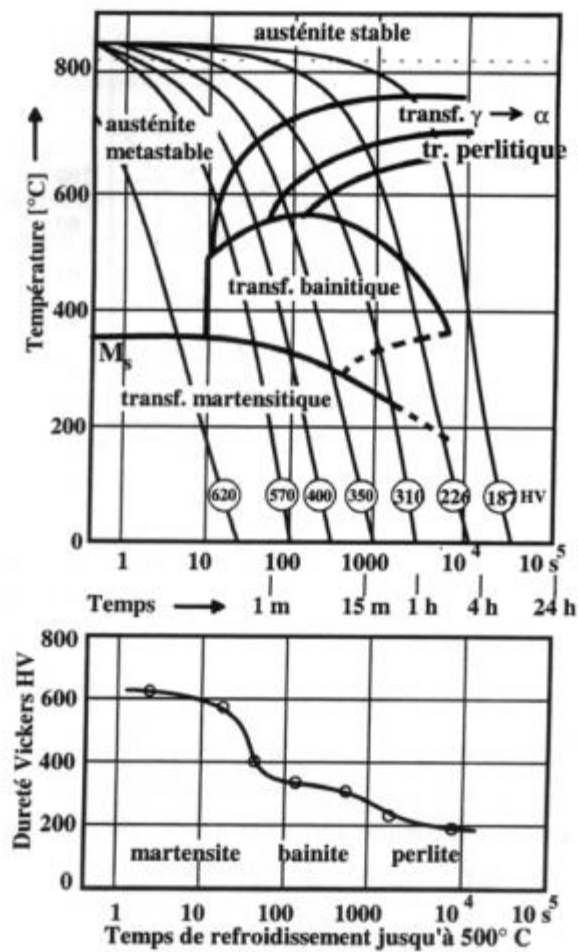


Fig(II.4).structure martensitique (labo).

II. 2.1.2. Le revenu :

La trempe est toujours suivie d'un revenu, car l'acier trempé est très dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, ($< A_{c1}$) à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Selon la nuance de l'acier, le revenu peut s'effectuer selon plusieurs stades. Pour le cas des aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, trois stades de revenu sont distingués, le premier est effectué vers 150°C , le deuxième est effectué vers 300°C et le troisième est effectué vers 450°C . Le revenu a pour but de revenir à l'état stable et d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe). D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le

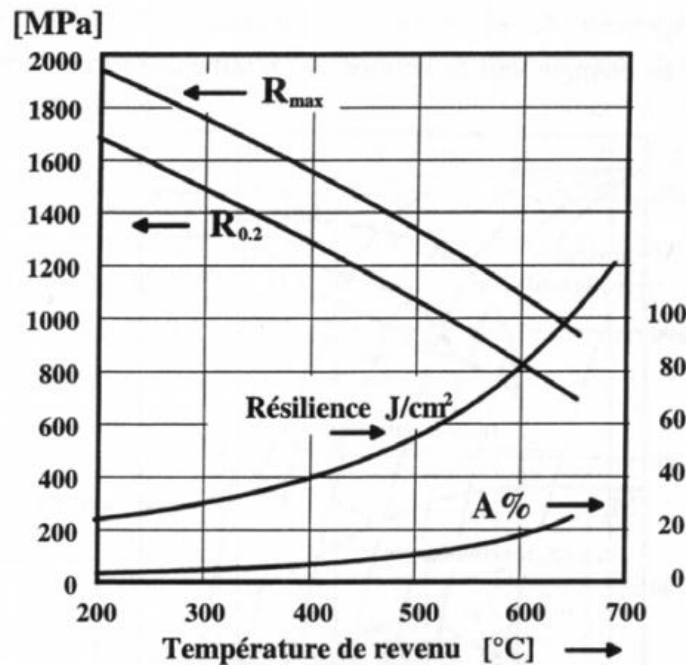
changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.



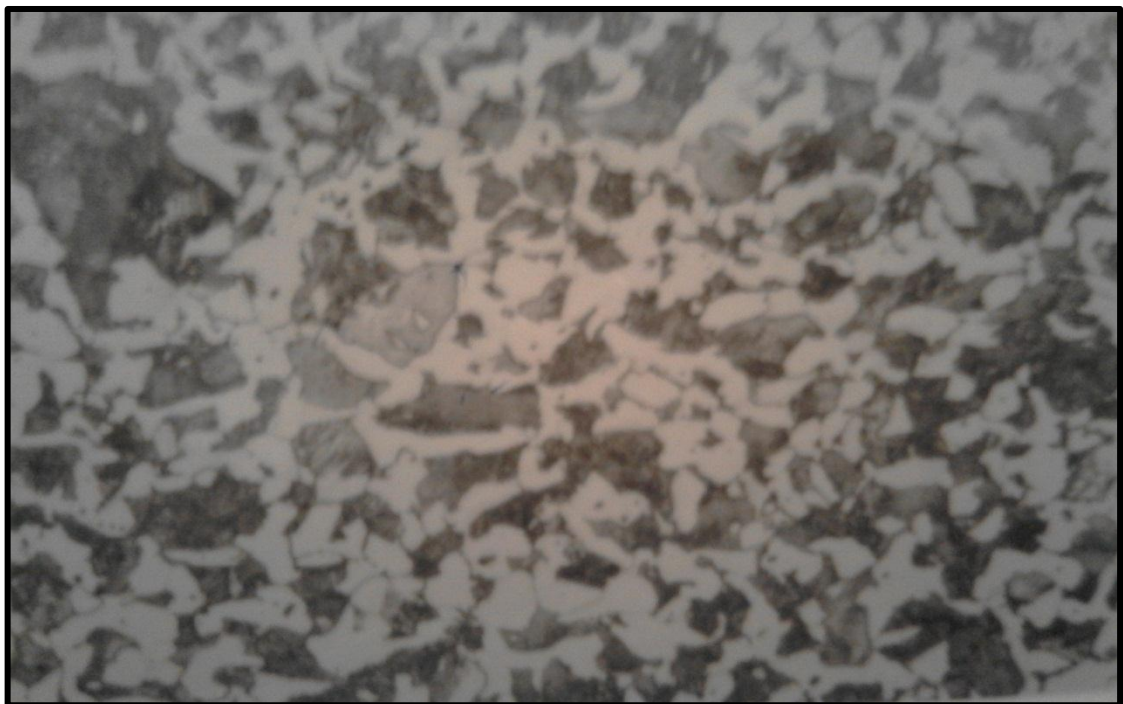
Fig(II.5) Courbe TRS et dureté après trempe. le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement.[11]

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 30 min sont représentées dans le diagramme de revenu et qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier. Le diagramme montré en fig. 5 correspond à celui d'un acier d'amélioration que l'on utilise pour la réalisation des pièces de construction

fortement sollicitées (arbres, engrenages). En particulier il s'agit de l'acier 40NiCrMo6 qui a la composition : 0.4% C, 1.4% Ni, 0.8% Cr et 0.4% Mo.



Fig(II.6) diagramme de revenu de l'acier 40NiCrMo6. Evolution des propriétés en fonction de la température de revenu(température de trempe 840°C).[11]



Fig(II.7).structure ferrito-perlitique(labo).

II.2.1.3 Le recuit:

A l'inverse de la trempe le recuit s'effectue dans le but d'obtenir une structure stable et en équilibre. En effet, le recuit amène le métal en équilibre physico-chimique et tend à réaliser l'équilibre structural. Le recuit permet d'obtenir des propriétés mécaniques maximales de ductilité (A% et K) et des propriétés minimales de résistance (Rm, Re, H). On peut distinguer plusieurs types de recuits :

1. Le recuit d'homogénéisation
2. Le recuit de régénération
3. Le recuit d'adoucissement
4. Le recuit de détente
5. Le recuit de recristallisation[11]

II.2.1.3.1 Recuit d'homogénéisation:

Le recuit d'homogénéisation s'applique aux aciers bruts de coulée pour lesquels le refroidissement a entraîné l'hétérogénéité de composition chimique (ségrégation) de l'austénite. Il s'obtient en maintenant l'acier dans le domaine austénitique (solution solide α) à une température aussi élevée que possible afin d'accélérer la diffusion du carbone et celle des autres éléments d'alliage.[11]

II.2.1.3.2 Recuit de régénération:

Le recuit de régénération ou normalisation sert à affiner le grain (le rendre plus petit) pour les pièces qui ont subi un grossissement de grain parce qu'ils étaient exposés à une température élevée lors d'une opération de forgeage, moulage ou soudage. Le traitement s'effectue, pour une durée de quelques minutes, entre 50 à 100°C au-dessus de la limite inférieure du domaine austénitique (fig. 1). Le refroidissement (normalement à l'air) ne doit pas être trop lent pour éviter un grossissement de grain de la ferrite.[11]

II.2.1.3.3 Recuit d'adoucissement:

Sous les mêmes conditions, mais pour une durée un peu plus longue (15 à 30 min) on pratique le recuit d'adoucissement sur les pièces trempées pour faciliter ensuite leur usinage et formage. On peut obtenir le même résultat par un revenu à une température en-dessous de la température de transformation $\alpha\text{-}\gamma$ pendant environ 15h.

II.2.1.3.4 Recuit de détente

Le recuit de détente remet l'alliage en équilibre mécanique en diminuant les contraintes résiduelles (contraintes internes) résultant d'un travail à froid ou d'une opération de soudage. La température du traitement n'est pas liée à la transformation $\alpha\text{-}\gamma$ mais dépend fortement de l'acier.

II.2.1.3.5 Recuit de recristallisation

Le recuit de recristallisation sert à diminuer la fragilité d'un métal écroui et de lui redonner sa capacité de déformation. Pour un acier ordinaire, ce traitement s'effectue au-dessus de 600°C. Il est clair qu'un de ces traitements mentionné peut remédier à plusieurs défauts à la fois. Ceci est évident puisque les domaines de température des différents traitements se recouvrent partiellement.[11]

II.2.2. Traitements thermochimiques:

Il est bien évident que si l'on pouvait disposer d'aciers courants, présentant en même temps de hautes caractéristiques de ductilité et de résilience, les problèmes de la construction seraient grandement facilités. Mais dans les aciers, ces deux types de caractéristiques varient en sens contraire. La résistance s'obtient avec les aciers pauvres en carbone. On doit donc se contenter d'un compromis.

Ce compromis peut être amélioré par un traitement de durcissement superficiel pratiqué sur un acier présentant une grande résilience. Le métal deviendra donc hétérogène. Cette hétérogénéité sera due:

- ✓ Soit à la modification superficielle de sa constitution (trempe superficielle),
- ✓ Soit à un double traitement, chimique d'abord, puis thermique (cémentation, nitruration, carbonitruration),

Soit enfin à la création d'une couche superficielle différente chimiquement (chromage électrolytique, dit improprement chromage dur).[12]

II.2.2.1. Cémentation:

La cémentation est une opération de durcissement superficiel par accroissement de la teneur en carbone suivi de trempe. Le but principal de ce type de traitement est d'obtenir une surface dure et résistante 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.

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

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

Généralement la profondeur maximum de pénétration est de 2 mm, donc il est exigé que les différentes opérations d'usinage doivent être réalisées avant le traitement de cémentation, c'est à dire, les pièces à cémenter sont fournies après l'usinage qui doit prévoir alors une surépaisseur de rectification de 0,05 à 0,1 mm, ou après finition. Dans le cas où la cémentation ne porte que sur une partie de la pièce, alors les autres parties doivent être protégées par un dépôt électrolytique de cuivre (0,02 à 0,01 mm) ou par des enrobages spéciaux (argile réfractaire, sable, amiante pétrie avec du verre soluble).[12]

II.2.2.1.1.Mécanisme de la formation de la couche cémentée:

La cémentation est basée essentiellement sur la diffusion du carbone dans l'acier et elle n'est possible que lorsque le carbone se trouve à l'état atomique, obtenu, par exemple par dissociation des gaz contenant du carbone sous forme de CO, CH₄, etc. Le carbone atomique absorbé par la surface de l'acier diffuse vers l'intérieur du métal. La progression de la diffusion vers l'intérieur est plus facile dans la ferrite que dans l'austénite à cause de l'énergie d'activation de l'austénite qui est plus élevée. Aux températures de l'existence de la ferrite (au dessous du point A₁), la cémentation ne se fait pas par suite d'une faible solubilité du carbone dans le fer α . La cémentation est réalisée généralement aux températures supérieures au point AC₃ (920 à 950°C) qui rendent stable l'austénite, dissolvant en quantité le carbone.

a- Cémentation par agent solide (par ciment solide):

Dans ce cas, on utilise comme agent de concentration le charbon de bois activé de bouleau ou de chêne en grains, de semi-coke de houille et de coke de tourbe. Pour activer la cémentation, on ajoute de 10 à 40 % du poids du charbon, le carbonate de barium BaCO₃ et le carbonate de sodium Na₂CO₃.

Tableau II.1:Epaisseurs de la couche de cementation en fonction de temps et temperature.

		Epaisseurs de la couche de cémentation en mm				
Durée en heures		1 h	2 h	10 h	30 h	60 h
T en °C	850 °C	0,4 mm	0,8 mm	1,2 mm	1,5 mm	2,5 mm
	900 °C	0,6 mm	1,2 mm	1,5 mm	2,5 mm	4,5 mm

b- Cémentation gazeuse:

Dans ce procédé, la pièce à cémenter est chauffée dans un milieu de gaz contenant du carbone. Cette forme de traitement présente beaucoup d'avantages par rapport à la cémentation par agent solide, elle permet d'obtenir une concentration exacte du carbone dans la couche à cémenter, diminue la durée du processus en rendant inutile le chauffage préalable des caisses remplies de ciment etc.

c- Cémentation par des agents liquides:

La cémentation liquide est effectuée dans des sels fondus contenant du Na_2CO_3 , le processus de cémentation est plus accéléré que les autres méthodes et la cémentation peut être effectuée rapidement à la température de 850°C. Le mélange des sels fondus contient le cyanure de sodium (45%), le chlorure de sodium (18%), le carbonate de sodium (37%), parfois, on utilise dans ce mélange du carbure du silicium

II.2.2.1.2.Traitement thermique de l'acier après cementation:

Après refroidissement, les pièces cimentées subissent une double trempe qui est nécessaire car les pièces sont constituées de deux parties superposées âme extra doux et couche extérieure très dure. De ce fait les traitements thermiques ultérieurs permettent de corriger les défauts de cémentation tels que:

- La correction de la structure et l'affinage du grain austénitique à la surface de la couche cimentée, après un long séjour à la température de cémentation élevée.
- L'Obtention d'une couche cimentée très dure avec de bonnes propriétés

mécaniques au coeur de la pièce.

Après traitement thermique la couche superficielle est composée de martensite ou de martensite accompagnée d'une petite quantité de carbures en excès sous forme de globules. Le revenu des pièces cémentées et trempées aux basses températures (entre 160 et 180°C), va conduire à la transformation de la martensite de trempe de la couche superficielle en martensite de revenu et supprimant ainsi les contraintes résiduelles.

II.2.2.2. Nitruration:

La nitruration consiste à soumettre l'acier à l'action d'un courant d'ammoniac gazeux qui va se dissocier partiellement grâce à la présence du fer comme catalyseur et l'azote naissant est absorbé à la surface, alors que l'hydrogène se dégage. Donc, c'est un, procédé de durcissement superficiel appliqué à l'acier permettant d'obtenir des duretés plus élevées que celles obtenues par cémentation. La nitruration accroît sensiblement la dureté de la couche superficielle, sa tenue à l'usure, la limite de fatigue et la tenue à la corrosion dans des milieux comme l'atmosphère, l'eau, la vapeur etc.

La couche nitrurée garde sa dureté jusqu'aux températures 500 à 550°C, alors que la dureté d'une couche cémentée à structure martensitique ne subsiste qu'à 200 ou 225°C. Elle est très employée dans le cas des arbres des machines-outils de précision, des cylindres des moteurs puissants etc. De la même façon que la cémentation on peut distinguer plusieurs types de nitruration:

a. Nitruration gazeuse :

Elle s'opère avec un courant d'ammoniac gazeux qui se dissocie partiellement en présence du fer qui joue le rôle de catalyseur.

b. Nitruration liquide :

Elle s'effectue à une température de 570°C pendant 0,5 à 3 heures dans un bain de cyanures alcalins (60% NACN et 40% KCN), par lequel on fait passer de l'air sec. La basse température fait que l'azote fourni par la décomposition des cyanures est pratiquement le seul à diffuser dans l'acier. Après nitruration les pièces sont refroidies à l'air ou à l'huile. Ce traitement produit à la surface de l'acier une fine couche superficielle carbonitrurée (7 à 8 μm) de $\text{Fe}_3(\text{N},\text{C})$.

Ce procédé présente l'avantage d'un faible changement de dimensions et l'absence du grandissement des pièces. Ses inconvénients sont la toxicité et le prix élevé des

cyanures.

d- nitruration ionique:

La nitruration ionique est obtenue dans une décharge luminescente, c'est à dire, l'azote est introduit à partir d'ions d'un plasma obtenu par décharge électrique sous tension de 1100 à 1400 V dans une atmosphère raréfiée contenant un mélange gazeux ($N_2 + NH_3$) à faible pression.

Les pièces à traiter sont connectées à l'électrode négative (cathode) et l'anode est constituée par la caisse de l'installation. La décharge luminescente est établie entre la cathode (pièce) et l'anode, et les ions du gaz, en bombardant la surface de la cathode, la portent à la température de saturation. Le processus est réalisé en deux étapes :

- Nettoyage de la surface par pulvérisation cathodique.
- Réalisation directe de la saturation.

II.2.2.3. carbonitruration:

La carbonitruration consiste à diffuser simultanément du carbone et de l'azote à la surface de l'acier dans le domaine austénitique suivie généralement d'une trempe. C'est un procédé de durcissement superficiel des pièces en acier

que l'on chauffe dans une atmosphère gazeuse ($CO + N_2 + C_3H_8$), permettant au métal d'absorber simultanément du carbone et de l'azote. Ce procédé est donc un compromis entre la cémentation et la nitruration. Le durcissement provient surtout de la cémentation par carburation de la couche superficielle des pièces. Le rôle de l'azote est surtout d'abaisser le point de transformation AC_3 . C'est pourquoi la température de chauffage lors de la trempe est moins élevée (700 à 850°C) que pour la cémentation.

Une trempe peu énergétique, généralement à l'huile ou à l'air, est effectuée soit à la sortie des pièces du four après refroidissement, soit après un deuxième chauffage. On a recours par la suite à un revenu à basse température (180°C). La dureté obtenue est de l'ordre de 62 HRC. Une épaisseur cémentée de 0,5 à 0,7 mm demande environ 3 heures de traitement. La couche carbonitrurée doit avoir une structure martensitique à grains fins, une faible quantité de carbonitrides et environ 20 à 30% d'austénite résiduelle. La carbonitruration gazeuse est généralement appliquée aux pièces de formes complexes. C'est un traitement qui est, de plus en plus, adopté par les industries de précision telles que les pièces pour automobiles, avions, métrologie, etc.[13]