

## II- Cémentation des aciers

### II-1 Introduction

De nombreuses applications nécessitent l'utilisation d'un acier présentant une bonne résistance au adoucissement aux températures de fonctionnement. On peut citer, à titre d'exemple, les pignons, roulements, arbres à cames et autres pièces utilisées dans les systèmes de distribution des moteurs thermiques. De plus, les zones superficielles des pièces d'aciers soumises à des sollicitations mécaniques ont un rôle important car leurs propriétés conditionnent la tenue à l'usure, à l'abrasion et à la fatigue. On cherche donc souvent à réaliser des couches superficielles de dureté élevée reposant sur un cœur résistant. La cémentation apparaît comme le meilleur compromis.

Dans ce chapitre, on rappelle l'étude du traitement de la cémentation des aciers, les mécanismes de base et les différentes techniques, les phénomènes essentiels résident dans la modification d'une couche superficielle de la pièce traitée liée à l'apport d'éléments durcissant (carbone) et à la présence de la structure martensitique à cause de la trempe et l'effet de revenu effectué après la trempe sur les constituants. Puis, on introduit l'influence de la composition chimique surtout des éléments d'addition sur les propriétés mécaniques obtenus. Ensuite, on appelle le comportement de la pièce d'acier et discute les critères d'obtention de microstructure, ainsi que la structure des couches cémentées.

### II-2 But de cémentation

La cémentation est le plus ancien traitement thermochimique de durcissement superficiel d'aciers maîtrisé par l'homme utilisé pour produire une combinaison de propriétés impossibles à obtenir autrement, à savoir, une dureté élevée en surface jointe à une bonne ductilité à cœur.

Il en résulte un véritable matériau composite dont la structure macroscopiquement hétérogène présente une âme résiliente et une zone superficielle de grande dureté avec augmentation simultanée de la résistance à l'usure, à l'abrasion et à la fatigue.

### II-3 Principe de cémentation

La cémentation est une opération chimique qui consiste à faire absorber du carbone par des pièces en acier doux et demi-doux (la teneur de carbone généralement comprise entre 0,1 % et 0.2%). Il suffit pour cela de chauffer la pièce à cémenter à une température suffisante, nécessaire à la formation de la structure austénitique et favorise la diffusion du carbone, en présence d'une source riche en carbone, charbon de bois + carbonate de baryum ou sels alcalins + cyanure de potassium ou gaz carbonique + gaz d'hydrocarbure. La couche superficielle absorbe le carbone et se transforme en acier très carburé. Par refroidissement rapide (trempe à l'huile), la structure de cet acier passe d'austénitique à martensitique, structure contenant des carbures de fer durs et cassants. Après la trempe, les pièces subissent un revenu, qui a pour but de diminuer les effets de la trempe en augmentant la résilience et d'abaisser la fragilité et la dureté de la couche cémentée.

La cémentation se réalise à une température comprise généralement entre 870°C et 1100°C (selon les aciers). La durée de traitement dépend de la profondeur désirée qui se situe le plus souvent dans un domaine de profondeur : de 0,01 à plusieurs millimètres. Les profondeurs de traitement pouvant être réalisées sont en fonction de la durée du cycle thermique et de la matière employée. L'épaisseur de cémentation est conventionnellement fixée à l'épaisseur de la zone qui, après trempe, a une dureté supérieure à 550 HV. Les duretés obtenues sont en fonction des nuances utilisées et des processus de fabrication, elles vont de 650 HV minimum à 950 HV maximum [7].

### II-4 Profondeur cémentée

La profondeur de cémentation est fonction du temps, de la température et du potentiel de carbone en surface. La profondeur de cémentation est plus grande après un long temps de maintien et un potentiel élevé de carbone produit une quantité élevée de carbone en surface. Le choix de l'atmosphère a également une grande influence sur le processus de cémentation. Les différentes atmosphères employées dans l'industrie de cémentation impliquent la dissociation des composants de l'atmosphère en surface de l'acier; ainsi le carbone libéré est aisément dissous par la phase d'austénite et peut diffuser dans la pièce. En outre, certains éléments d'alliage peuvent agir d'une manière sensible sur la vitesse de diffusion du carbone au cours de la cémentation.

La couche traitée peut être caractérisée par le profil de dureté qui permet de mesurer l'épaisseur efficace de la couche, appelée "profondeur conventionnelle de cémentation". Elle est définie par la distance à la surface du point pour lequel la dureté a une valeur égale à 550 HV. La profondeur de durcissement par cémentation dépend partiellement de la trempabilité des aciers, mais surtout des conditions du traitement. L'épaisseur visée pour la couche cémentée varie selon la destination et le volume de la pièce. Les épaisseurs importantes (0.8mm à 1.8 mm ou plus) sont réservées à des pièces devant résister à l'usure et des pièces de forte section. Pour les pièces moyennes de faibles sections, tels que les engrenages d'automobile, des épaisseurs de 0.2 mm à 0.8 mm peuvent être suffisantes. K. Olga a montré que les aciers ayant des concentrations élevées en éléments gamma-gène (Si, Ni) augmentent la diffusivité du carbone dans l'austénite mais réduisent la cinétique de transfert du carbone à partir de l'atmosphère vers la surface de l'acier, par contre, les aciers avec des éléments carbure-gène (Cr, Mo) augmentent le coefficient de transfert de masse dans l'atmosphère en améliorant l'évolution du profil de carbone.

Ce sont des aciers à grains fins et à basse teneur en carbone (0.10% et 0.20 %). les éléments d'alliage sont choisis en fonction de la massivité des pièces et des caractéristiques à cœur visées, ce sont :

- Aciers de construction non alliés
- Acier au carbone
- Acier au manganèse chrome
- Acier au chrome – molybdène
- Acier au nickel – chrome
- Acier au nickel – chrome – molybdène
- Aciers au nickel – chrome
- Aciers au nickel – chrome – molybdène

### II-5 Techniques de cémentation

#### II-5-1 Cémentation solide (en caisse)

Le principe consiste à noyer les pièces dans un ciment solide à base de charbon de bois. Ce ciment est pulvérisé ou granulé et additionné d'adjuvants (20 à 40 % de carbonate de baryum, lequel facilite la circulation des gaz à travers les caisses [11]. Celles-ci sont scellées, puis portées en température de traitement vers (870°C à 930 °C) pendant un temps très long (environ 1 heure pour 0,2 mm traité) [12]. Il se crée, au contact des pièces, une atmosphère riche en oxyde de carbone CO qui va permettre la cémentation.

Dans ces conditions, le carbone est absorbé par les couches superficielles et l'on obtient une teneur en carbone d'environ 1,0 %. En huit heures environ on obtient une profondeur de cémentation qui peut atteindre 1,6 millimètres . C'est une technique pratiquement abandonnée, qui conserve cependant un intérêt pour le traitement des pièces de grandes dimensions et qui n'exige pas d'installation spéciale.

#### II-5-2 Cémentation gazeuse

L'atmosphère des fours est constituée par un gaz porteur auquel sont ajoutés du

méthane ( $\text{CH}_4$ ) ou du propane ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ). Les additions d'hydrocarbures au gaz porteur dépendent du besoin en carbone de la charge. Le gaz porteur est produit le plus souvent par un générateur endothermique par exemple 1 volume de méthane et 2,4 volumes d'air on obtient un gaz constitué de 20%  $\text{CO}$ , 40%  $\text{N}_2$ , 40%  $\text{H}_2$  et des quantités minimales de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ , les deux dernières étant éliminées avant introduction dans le four pour obtenir un gaz réducteur [11].

L'opération s'effectue à environ  $950^\circ\text{C}$  et dure plusieurs heures. La vitesse de pénétration est de l'ordre de  $0,4\text{mm/h}$  [12]. La cémentation gazeuse permet de contrôler très exactement la profondeur de cémentation et elle est plus rapide que la cémentation en caisse, car le temps nécessaire pour chauffer le matériel se trouve économisé. Ce procédé nécessite toutefois des investissements importants et son emploi ne peut donc être envisagé que pour des traitements de grandes séries de pièces.

### II-5-3 Cémentation en bains de sels

Les pièces sont immergées dans un bain de sels fondus maintenu à la température choisie pour la réaction chimique et la diffusion. L'agent de carburation a pour base le groupe des cyanures alcalins. Le ciment liquide contient de cyanure dont le rôle est d'accélérer la diffusion du carbone dans l'acier (la pénétration est de l'ordre  $0,33\text{mm/h}$ ). Le traitement s'effectue de  $700$  à  $900^\circ\text{C}$  [11].

La cémentation en bains de sels présente les inconvénients liés au retraitement des déchets à base de cyanure et aux risques de pollution. Elle est plutôt réservée au traitement de petites pièces.

### II-5-4 Cémentation ionique

La pièce à cémenter est placée en cathode. On crée une différence de potentiel (un champ électrique qui va créer un plasma à partir de l'atmosphère introduite dans

l'enceinte). On introduit sous faible pression un hydrocarbure. Avec le champ, ils se dissocient en carbone actif et  $H_2$ . Le carbone actif diffusé d'autant mieux qu'il est actif dans la surface. Le transfert du carbone dans l'acier est rapide.

Les cémentations « basse pression » et « assistée plasma ou ionique » sont utilisées pour le traitement de pièces petites ou moyennes. Elles permettent d'obtenir une bonne qualité de la couche cémentée qui conduit, grâce à l'absence d'oxydation interne, à des caractéristiques de tenue en fatigue supérieures à celles obtenues avec les autres procédés [13].

### II-6 Rôle des éléments d'alliage sur la cémentation

Les aciers de cémentation contiennent une faible teneur en carbone ( $C < 0,25 \%$ ) et des éléments d'alliage tels que : Cr, Mn, Mo et Ni... L'augmentation de la teneur en carbone à cause de l'opération de cémentation assure le durcissement. Les éléments d'alliage sont présents dans les aciers de cémentation pour améliorer leur aptitude à subir la transformation martensitique (trempabilité). Plus l'acier est trempant et moins il est nécessaire de refroidir énergiquement une pièce pour obtenir la transformation martensitique.

#### II-6-1 Carbone

Élément fondamental, il apporte la capacité de durcissement en participant à la précipitation de carbure de fer  $Fe_3C$  ou  $M_3C$  (M étant un élément d'alliage Cr, Mn..., en substitution partielle du fer) ou de carbure d'éléments d'alliage carbure-gènes (tels V, Mo, W...). Dans les aciers trempés et revenus, le carbone a un effet sur la dureté de la martensite obtenue et sur l'abaissement de la température  $M_s$  (températures de début de transformation martensitique). Il est aussi susceptible de modifier la trempabilité par effet de l'association avec les éléments d'alliage. Cette influence est d'autant plus

forte que l'acier est plus riche en éléments d'alliage, elle peut devenir nulle quand ces derniers sont absents [19].

### II-6-2 Autre éléments d'alliages

Les éléments susceptibles d'entrer en solution solide de substitution dans le fer constituent ce que l'on appelle communément les éléments d'alliage (Mn, Si, Ni, Cr, Mo, V, W...). Ils augmentent tous la trempabilité de l'acier à l'exception d'un seul d'entre eux : le cobalt, dont l'addition entraîne une diminution de celle-ci. La trempabilité croît bien entendu avec la quantité d'éléments mise en solution dans l'austénite, mais aussi avec l'identité de chaque élément; ainsi, à des teneurs semblables, le manganèse, le chrome, le molybdène apportent une forte augmentation de la trempabilité alors que le nickel, le cuivre et le silicium n'ont qu'une influence plus limitée.

La présence d'éléments d'alliage dans l'acier modifie aussi l'activité du carbone dans l'austénite. Les éléments tels que le chrome ou le manganèse sont sur carburants tandis que le silicium et le nickel sont sous carburants. Un point important est aussi que la solubilité de carbone dans l'austénite est améliorée par la présence d'éléments d'alliages tels que le manganèse, le chrome, le vanadium et surtout le molybdène. Les éléments d'alliages tels que le chrome, le manganèse et le molybdène activent le traitement de cémentation, le nickel s'oppose au grossissement du grain de l'austénite.

On doit noter aussi que les éléments d'alliage engendrent des modifications des limites du domaine de stabilité de l'austénite et on doit distinguer les éléments gamma-gènes, tels Ni et Mn, élargissent le domaine de stabilité de l'austénite et abaissent les températures de transformation  $Ac_1$  et  $Ac_3$ ; tandis que les éléments alpha-gènes parmi lesquels on trouve Si, Cr, Mo, V, W, Ti rétrécissent le domaine de stabilité de l'austénite et élèvent les températures de transformation  $Ac_1$  et  $Ac_3$ . A titre indicatif, la température du point critique ( $Ac_1$ ), température de la transformation

eutectoïde, se situe généralement dans la gamme allant de 700 à 800°C, tandis que la température du point critique ( $Ac_3$ ), température de la transformation  $\alpha/\gamma$ , se situe généralement dans la gamme allant de 900 à 980°C.

### II-7 Traitements après cémentation

Pour donner aux pièces leurs propriétés finales, on les soumet après cémentation à des traitements thermiques dont le but est :

- De corriger la structure et d'affiner le grain au cœur et dans la couche cémentée.
- D'obtenir une dureté élevée de la couche cémentée et de bonnes propriétés mécaniques de cœur.
- D'éliminer le réseau de carbure dans la couche cémentée, qui peut apparaître par suite de la sursaturation en C.

Le traitement thermique conduit dans la couche cémentée à une structure composée de martensite d'une certaine quantité d'austénite résiduelle et des carbures. L'opération terminale des pièces ayant subi la cémentation est un revenu à basse température à 160 ou 180 °C, qui transforme la martensite de trempe de la couche superficielle en martensite de revenu assurant ainsi un adoucissement.

Dans le cas d'une trempe d'aciers fortement alliés, la structure de la couche cémentée garde en quantité (jusqu'à 50%) de l'austénite résiduelle qui altère la propriété de dureté. Après trempe, ces aciers sont traités à froid contribuant à la transformation de la plus grande partie de cette austénite en martensite.

La quantité d'austénite résiduelle peut être diminuée en réduisant la quantité de carbone dans la couche ou en ajoutant dans le four, avant l'achèvement du processus, de l'ammoniac pour former des nitrures des éléments d'alliages.



La cémentation suivie d'un traitement thermique élevé la limite de fatigue des pièces par suite de la formation dans la couche cémentée de contrainte de compression résiduelles importantes. La limite à la fatigue peut être encore élevée par écrouissage réalisé par grenaillage.

### II-8 Etapes de cémentation

#### II-8-1 Etape d'enrichissement de carbone

C'est l'étape thermochimique du traitement. Par mise en contact avec un milieu cémentant, on forme à la surface de l'acier (teneur initiale en carbone 0,1 à 0,2% C) une couche superficielle plus ou moins enrichie en carbone. Les teneurs atteintes en surface varient selon les applications de ,7 à 1,2% de carbone en général [11]. Deux phénomènes en fait interviennent simultanément : une réaction chimique qui fournit du carbone à la surface du métal et un processus de diffusion de l'élément de carbone dans la zone superficielle, de la surface vers l'intérieur de la pièce.

Cette opération se fait à haute température (870–950°C) pour être en phase austénitique pour deux raisons : le carbone étant plus soluble en phase austénitique qu'en phase de ferrite, de plus la diffusion étant facilitée par la température et on doit partir de cette phase pour assurer la formation de la martensite. Une température plus élevée (950°C-1000°C) risquerait de provoquer un grossissement des grains d'austénite [11].

Dans cette étape, il y a une création du carbone actif, qui va diffuser dans la couche superficielle, par suite de réactions chimiques. La source de carbone est appelée cément. On peut utiliser un cément solide, liquide ou gazeux. La cémentation peut être réalisée en caisse à l'aide d'un cément solide, sous atmosphère contrôlée, dans un bain de sels actifs ou sous vide (basse pression) assistée ou non par plasma. La diffusion du

carbone à la surface résulte de la recherche d'un équilibre entre la concentration de carbone provenant du milieu carburant et la concentration initial en carbone de l'acier.

### II-8-2 Trempe au cours de cémentation

L'opération de diffusion de carbone est toujours suivie d'une opération de trempe (plus rapide) dont le but est d'obtenir le durcissement de la couche enrichie par formation de martensite (trempe martensitique). En outre, le durcissement par trempe martensitique crée des contraintes de compression dans la zone superficielle de la pièce dont la tenue en fatigue est ainsi améliorée. La trempe martensitique consiste à amener rapidement un acier austénitique à une température inférieure à la valeur critique  $M_s$ , température de début de transformation martensitique, généralement inférieure ou égale à  $20^{\circ}\text{C}$ . Ce procédé porte aussi le nom de trempe étagée.

Les paramètres principaux de cette trempe sont le taux de carbone dissous (la dureté de la martensite augmente avec l'augmentation de la teneur en carbone), la vitesse de refroidissement qui doit être suffisamment rapide pour permettre l'augmentation de dureté (formation de martensite), ainsi que les proportions de certains additifs qui sont présents dans les aciers de cémentation pour améliorer leur aptitude à subir la transformation martensitique (trempabilité) comme le chrome, le manganèse et le molybdène.

La structure métastable obtenue par la trempe et, par conséquent, les caractéristiques mécaniques de l'alliage sont nettement différentes de celles de l'état d'équilibre résultant d'un refroidissement lent. Dans le domaine austénitique, le fer a une structure cubique à faces centrées qui possède des sites interstitiels plus grands que dans la structure cubique centrée, ce qui permet au carbone de se dissoudre beaucoup mieux dans le fer que dans le fer  $\alpha$ . Si on le soumet maintenant à un refroidissement lent et en équilibre, il y aura précipitation du carbone et on retournera à l'état initial avant l'austénitisation, chose qui ne nous

intéresse pas car on n'aura pas obtenu le durcissement souhaité. Par contre, si le refroidissement se produit à une vitesse assez rapide, la précipitation est empêchée et en conséquence la matrice de fer est contrainte par les atomes de carbone. De cette façon, on obtient le durcissement. Ce traitement de trempe transforme l'austénite en martensite, qui présente une dureté proportionnelle à la teneur en carbone [14].

Le terme transformation martensitique est à l'origine associé à la transformation qui se produit lors de la trempe des aciers : l'austénite formée à haute température se transforme en martensite, par refroidissement rapide, sans diffusion. C'est une transformation de phase du premier ordre : les deux phases coexistent et il existe une interface entre l'austénite et la martensite. Elle se manifeste par un changement de structure cristalline qui se produit par un déplacement coordonné des atomes sur quelques distances interatomiques. C'est pourquoi la transformation martensitique est sans diffusion. L'absence de diffusion implique non seulement que la phase austénitique (phase mère) et la martensite ont la même composition chimique, mais que de plus, la martensite hérite de l'ordre et des défauts de la phase mère [15].

### II-8-3 Structure obtenue après trempe

#### **II-8-3-1 Martensite**

La martensite c'est la structure obtenue en générale après trempe dans le cas de la cémentation. La martensite possède une structure quadratique centrée (figure 1-a). Les atomes de carbone sont distribués sur les sites interstitiels octaédriques en position  $(0, 0, \frac{1}{2})$  (milieu des arêtes parallèles à l'axe c) et  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$  (base de la maille). Ainsi, la martensite est une solution solide sursaturée en carbone dans le fer  $\alpha$ . Cette sursaturation en carbone entraîne une distorsion du réseau de la maille qui devient quadratique, distorsion d'autant plus marquée que la teneur en carbone est élevée [15].

Les paramètres de maille de la martensite  $c$  et  $a$  sont en fonction de la teneur en éléments d'insertion et plus particulièrement en carbone. Cette dépendance a été vérifiée dans plusieurs études [16, 17]. Kurdjumov [17] propose une relation linéaire entre les paramètres de mailles  $c$  et  $a$  et la teneur en carbone de la martensite :

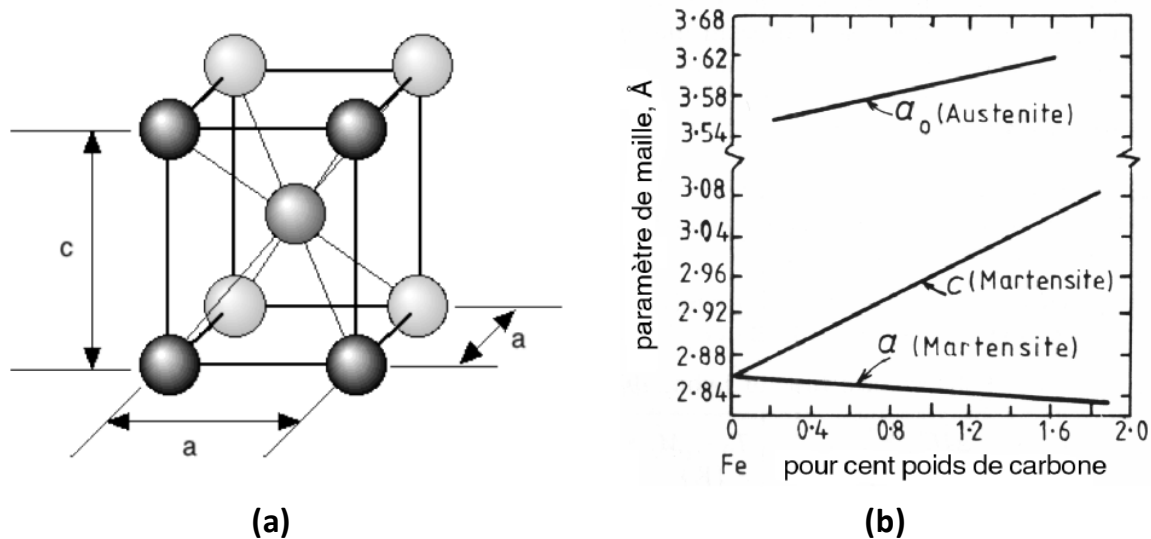


Figure (II-1) : (a) Distorsion tétragonale de la cellule élémentaire de la martensite et b) l'ampleur de la martensite en fonction de la teneur en carbone.

Le durcissement de la martensite est d'ordre physico-chimique; chaque atome de carbone, plus volumineux que l'interstice où il est inséré (l'atome de carbone a un diamètre vaut 0,63 fois celui de l'atome de fer), écarte les deux atomes de fer voisins, le réseau du fer est ainsi fortement distordu, et ces perturbations en bloquant le mouvement des dislocations durcissent l'acier. En même temps, ce durcissement provoque aussi des effets indésirables comme par exemple une augmentation de la fragilité du matériau. C'est pour cette raison que souvent, après la trempe, on peut appliquer le revenu.

### II-8-3-2 Austénite résiduelle

L'austénite résiduelle est un constituant de dureté faible inférieur à 150 HV, il est très défavorable à la dureté mais a une bonne résistance à la fatigue en flexion [10], sa présence en plus ou moins grande quantité dépend de la teneur en carbone de la couche cémentée, et du cycle thermique réalisé. L'existence de l'austénite résiduelle provient aussi du fait que la couche cémentée est trop chargée en éléments (Cr, Ni, Mn, N) qui abaissent la température de transformation martensitique (Si cette température est abaissée, la rétention d'austénite est favorisée), ou d'une stabilisation de l'austénite au cours de cycle de trempe. Mais, il faut tenir compte, enfin, de la décomposition de l'austénite résiduelle éventuelle, soit au cours du revenu, soit pendant le refroidissement consécutif à ce traitement.

### II-8-3-3 Cémentite et Carbure

La cémentite et les carbures respectivement peuvent se présenter sous deux aspects bien distincts en nodules ou en réseau. Leur présence est favorisée par un excès de carbone dans la couche cémentée qui forme avec les éléments d'alliage tels que (le chrome, le manganèse ou le molybdène) des carbures. En effet, l'élévation de la concentration de carbone des pièces d'aciers cémentées donne lieu à la formation des carbures à cause de présences des éléments d'additions comme le chrome, le molybdène, le vanadium, le tungstène,... qui participent en effet à la précipitation du carbone sous forme de carbures différents de la cémentite. Donc la teneur de carbone diffusée dans les pièces d'aciers se transforme non seulement à l'austénite mais à d'autres carbures. Pendant le traitement de cémentation se produit simultanément une mise en solution solide de carbone dans l'austénite et une précipitation fine de carbures qui s'accompagne d'un durcissement important et de la mise en compression de la couche cémentées.

### II-8-4 Revenu au cours de la cémentation

C'est un traitement complémentaire à la trempe. Il diminue ses effets, il supprime les tensions internes; par conséquent, il permet de contrôler exactement les propriétés mécaniques de l'acier en réduisant dans une certaine mesure sa dureté et sa résistance à la traction, mais en augmentant sa ductilité, c'est-à-dire son coefficient d'allongement et sa résilience par affinage de la structure et de la dispersion des carbures de fer dans la ferrite. On effectue un revenu immédiatement après la trempe sur les pièces complètement refroidies pour être certain que la transformation martensitique est terminée. Le revenu consiste à chauffer une pièce trempée à une température déterminée, on maintient cette température puis on refroidit.

La température de revenu est inférieure à 723°C, c'est-à-dire en dessous de la température d'austénitisation. Elle varie également en fonction du type d'acier et des résultats désirés. Elle devra être d'autant plus élevée que l'on voudra garder moins de dureté au profit de la résilience. Pour obtenir de grandes duretés et de grandes résistances mécaniques sur des structures martensitiques (trempe complète), le revenu sera effectué à une température comprise entre 100 et 200°C (revenu de détente), il diminue légèrement la résistance à la rupture mais augmente la limite élastique et améliore la ductilité [8].

Le réchauffage doit être conduit lentement au début du revenu, une trop brusque élévation de température pouvant produire des contraintes internes, d'une part à cause du gradient de température de la surface au noyau, d'autre part par suite de la contraction de la martensite chauffée. La durée du revenu est minimum une heure et s'allonge en fonction de l'épaisseur des pièces. Au-delà d'une heure, les transformations sont très lentes.

Comme le revenu se pratique à une température inférieure au point de transformation de l'acier, celui-ci en se refroidissant ne traversera aucune région de transformation, et la vitesse de refroidissement ne pourra avoir d'influence sur la structure. Cependant, il

est conseillé d'éviter un refroidissement trop violent qui pourrait provoquer des tensions internes. On peut donc, si on désire hâter le travail, refroidir les pièces à l'huile ou à l'eau, mais, si on le préfère, on peut simplement laisser refroidir à l'air ambiant après revenu.

### II-8-5 Effet de revenu

Dans le cas de cémentation, le revenu a un effet sur la ténacité des couches enrichies de carbone. L'effet de revenu se porte sur la structure martensitique. L'état martensitique pure, sans austénite résiduelle s'obtient pour les aciers hypereutectoïdes refroidis vers 200°C [18]. Les réactions au cours du revenu varient avec le temps et surtout avec la température. Ce dernier paramètre a un effet sur la structure de la martensite selon les intervalles de températures suivants:

- Vers 100°C-150°C, la martensite initiale dite ( $\alpha'$ ) (réseau quadratique) se décompose et donne carbure-epsilon et  $\alpha$ , avec epsilon est un carbure de fer hexagonal (semblable à la composition  $\text{Fe}_2\text{C}$ ) et  $\alpha$  est martensite à faible teneur de carbone.
- De 200°C à 400°C, la martensite  $\alpha$  perd progressivement son carbone sous forme de cémentite et donne ferrite ( $\alpha$ ) + cémentite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).
- De 280°C à 350°C, transformation de carbure epsilon en réagissant sur la ferrite qui l'entoure et qui devient ainsi un carbure-kappa plus pauvre en carbone. Kappa est un carbure de fer de structure orthorhombique  $\text{Fe}_5\text{C}_2$ .
- De 450°C à 500°C, transformation du carbure kappa en réagissant avec la ferrite donnant  $\text{Fe}_3\text{C}$  (cémentite).

Dans le cas des aciers trempés non entièrement martensitiques, si l'acier contient de l'austénite résiduelle. Celle-ci se décompose à partir d'environ 250°C et jusqu'à 50°C, selon des réactions qui se superposent aux précédentes en les masquant plus ou moins. Finalement, on arrive à l'état ferrite + cémentite. Tandis que, s'il contient des constituants en équilibre physico-chimique (perlite, troostite, ferrite, cémentite), cas d'une trempe incomplète, lors du revenu, ces constituants ne peuvent subir que des variations de dimensions et de forme [18].

### II-9 Conclusion

La cémentation est le plus ancien traitement thermochimique maîtrisé par l'homme utilisé pour augmenter la dureté superficielle de pièces en acier doux et demi doux. Pour cela on augmente la teneur superficielle en carbone par mise en contact avec une source riche en carbone gazeux, liquide ou pâteux. Elle se réalise à une température comprise généralement entre 870 et 950°C. La durée de traitement dépend de la profondeur désirée. La diffusion superficielle de carbone conduit à la formation d'une couche dure en surface dont l'épaisseur peut aller jusqu'à 1 voire 2 mm et dont la dureté est de 700 à 900 HV.

Cette phase d'enrichissement est généralement suivie d'une trempe à l'huile ou au polymère et d'un revenu basse température. Ces traitements confèrent aux pièces des propriétés métallurgiques et mécaniques nouvelles, il en résulte une couche superficielle de dureté élevée grâce à la formation de la martensite et d'autres carbures de fer et une bonne ductilité à cœur. Il est possible d'obtenir dans les couches cémentées d'autres constituants, et qui sont, en particulier, de l'austénite résiduelle, de la perlite et de la bainite, de la cémentite et des carbures.