

Chapitre 9 :**Traitements mécaniques****Traitements thermochimiques**

- **Objectifs spécifiques :**
 - Savoir les Traitements mécaniques des aciers
 - Savoir les Traitements thermochimiques des aciers

- **Pré-requis :**
Niveau BAC, notions élémentaire de chimie,
Propriétés des matériaux

- **Éléments de contenus :**
 1. *Introduction*
 2. *Traitements mécaniques*
 3. *Traitements de durcissement par trempe après chauffage superficiel*
 4. *Traitements thermochimiques*
 - Cimentation*
 - Nitruration*
 - Carbonisation*
 - sulfonation*

CHAPITRE9

TRAITEMENTS MECANIQUES- TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES

I. INTRODUCTION :

Nous avons, dans les chapitres précédents, décrit les principes de base des traitements thermiques qui intéressent tout le volume du produit ou de la pièce, en visant à conférer au métal en chaque point la microstructure et les propriétés désirées pour l'emploi envisagé. Mais dans de très nombreux cas, en particulier dans les industries mécaniques, ce sont surtout les surfaces des organes de machines qui sont soumises à des sollicitations mécaniques sévères, de nature diverses : frottement, usure, sollicitations de fatigue. Il faut alors conférer des propriétés particulières des couches externes des pièces en leur appliquant des traitements appropriés. Les traitements superficiels ont essentiellement pour objectif de durcir superficiellement le métal, ce qui améliore la résistance à l'usure et au frottement, et de produire un système de contraintes de compression favorable à la tenue des pièces en service, notamment pour celles qui sollicités en fatigue, tout en ayant une structure résiliente et ductile au cœur des pièces, ce qui confère à l'ensemble une combinaison intéressante de propriétés, telles qu'une bonne résistance mécanique et une bonne ductilité.

Les procédés de traitements superficiels se classent en trois grandes catégories :

- ✓ Les traitements mécaniques, avec déformation plastique du métal localisé en surface,
- ✓ Les traitements de durcissement par trempe après chauffage superficiel, sans modification de la composition chimique des couches superficielles,
- ✓ Les traitements thermochimiques, dont l'objet est de modifier la composition chimique des couches superficielles, en vue d'obtenir les caractéristiques désirées, soit directement, soit à l'aide d'un traitement ultérieur.

II. TRAITEMENTS MECANIQUES OU PAR ECROUISSAGE :

Dans ce type de traitements superficiels, l'augmentation de dureté et la création de contraintes résiduelles de compression sont obtenues par une déformation plastique du métal localisé en surface des pièces grâce à des moyens mécaniques tels que le galetage et surtout le grenailage. En plus de l'accroissement important de la dureté et de la limite d'élasticité dû à l'écrouissage du métal, le comportement en service des pièces, notamment au point de vue résistance à la fatigue, à l'usure et à la corrosion, est ainsi très notablement amélioré.

2.1. Galetage :

Dans ce procédé, le durcissement des couches superficielles est obtenu par déformation plastique sous l'action d'un important effort de pression exercé par des galets très durs animés d'un mouvement de rotation. Une étude très récente a donné un exemple intéressant des possibilités offertes par ce traitement. Cette étude s'intéresse à un acier du type 38MoV7 destiné à la fabrication des vilebrequins par forgeage et refroidissement contrôlé, de façon à obtenir directement la structure bainitique désirée. Dans le cadre de cette étude, des essais de fatigue ont été réalisés sur des éprouvettes de différents états dont les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

<i>nuance</i>	<i>Etat</i>	<i>Renforcement</i>	<i>Limite d'endurance σ_D (MPa)</i>
38MoV7	Bainitique	Sans	435
		Nitruration	988
		Galetage 5700N	810
		Galetage 9000N	960
		Galetage 12000N	1160

2.2. Grenailage :

C'est un traitement mécanique des surfaces réalisé le plus souvent en projetant sur la pièce à traiter, à une vitesse de quelques dizaines de mètres par seconde, de billes en acier dur dont le diamètre peut se situer entre 0.1 et 2 mm. En agissant sur les conditions dans lesquelles le grenailage est effectué : nature, dureté, et dimension de la grenaille, vitesse de projection, angle d'impact...etc, on peut ainsi réaliser un écrouissage contrôlé des couches superficielles sur une profondeur de l'ordre de 0.1 à 1 mm, de façon à obtenir l'augmentation de dureté ainsi que les précontraintes de compression désirées. Le grenailage provoque une transformation plus ou moins importante de l'austénite résiduelle éventuellement présente dans les couches superficielles

III. TRAITEMENTS DE DURCISSEMENT PAR TREMPE APRES CHAUFFAGE SUPERFICIEL :

Il consiste à effectuer un chauffage éventuellement localisé des couches superficielles des pièces, dans des conditions telles que le métal soit porté à l'état austénitique et à faire suivre ce chauffage d'un refroidissement suffisamment rapide pour qu'il y ait transformation martensitique.

Les procédés de chauffage les plus utilisés sont le chauffage par induction et le chauffage au chalumeau.

3.1. Chauffage par induction :

La pièce à traiter est placée dans un champ d'un inducteur constitué d'une bobine en tube de cuivre. Cette bobine est parcourue par un courant à haute fréquence (=400000 Hz). La température s'élève rapidement jusqu'à la température de trempe et la pièce est ensuite refroidie sur place, après coupure de courant, par projection d'un fluide de trempe.

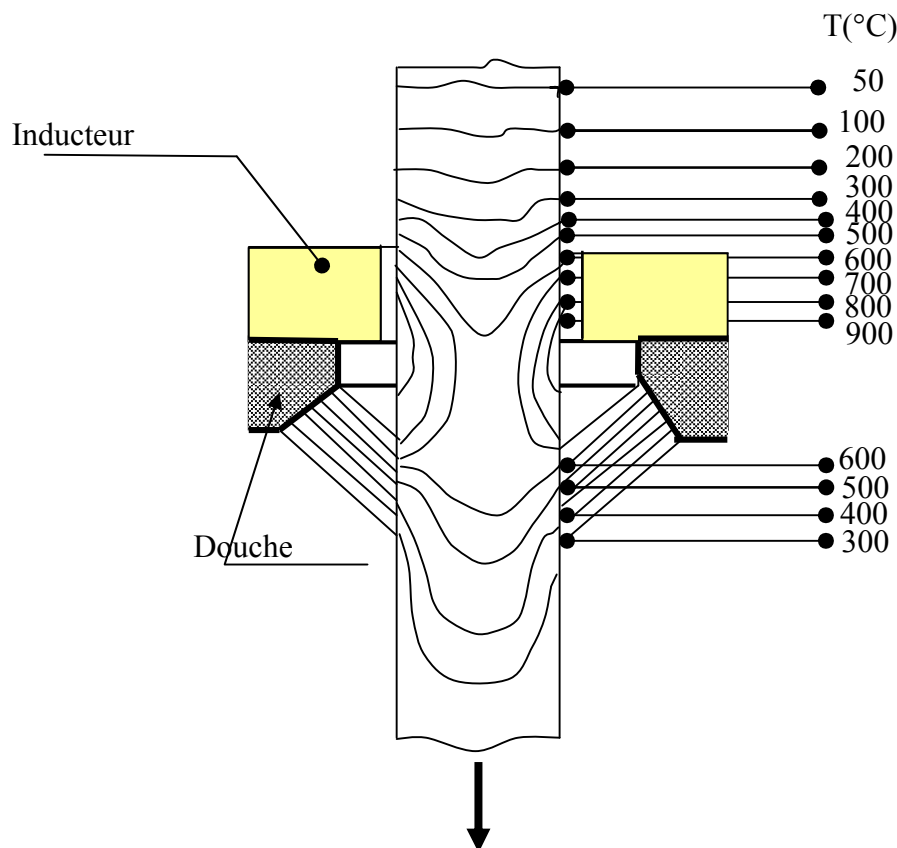


Figure IX.1 : Chauffage par induction

3.2. Chauffage au chalumeau :

Dans ce procédé, la surface de la pièce est chauffée à l'aide de la flamme produite par un chalumeau alimenté avec un mélange de gaz de combustion et d'oxygène ou d'air ; la flamme oxyacétylénique possède la plus forte puissance de chauffe et donne la température maximale la plus élevée. Les profondeurs traitées varient d'environ un millimètre à plusieurs millimètres, selon la puissance de chauffe, le temps de chauffage et la trempabilité de l'acier. En pratique, soit la pièce se déplace devant la flamme puis s'arrose avec de l'eau convenablement répartie sur la surface, soit c'est la flamme qui balaie la pièce et des buses de refroidissement arrosent la pièce en arrière de la flamme.

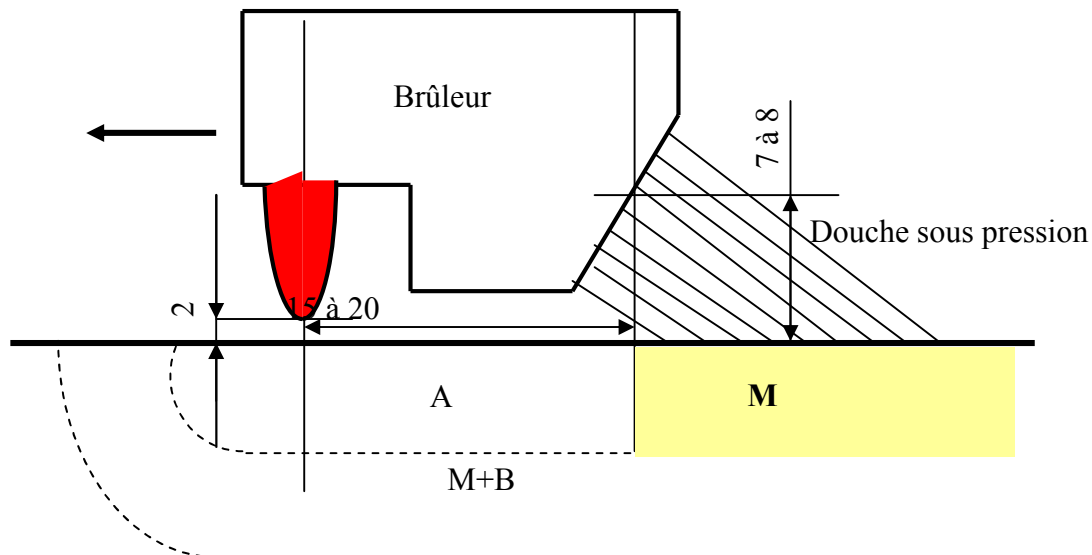


Figure IX.2 : Chauffage au chalumeau

IV. Traitements thermochimiques.

Un traitement thermochimique est un traitement thermique effectué dans un milieu convenablement choisi pour obtenir une modification de la composition chimique du métal de base, par échange avec ce milieu. Dans le cas de ces traitements, les éléments mis en jeu pour enrichir la couche superficielle du métal sont apportés par des milieux qui peuvent être solides (ciments), liquides (bain de sels), gazeux. L'opération de diffusion est suivie ou non, selon la nature des éléments apportés, d'un traitement thermique de durcissement par trempe provoquant la transformation austénite → martensite de la couche enrichie.

Il existe de nombreux types de traitements thermochimiques ayant pour but d'améliorer la résistance des pièces à la fatigue, à l'usure, au frottement, au grippage, à la corrosion...etc, on se limitera à décrire quelques traitements à savoir la cémentation par le carbone, la nitruration, la nitrocarburation et la carbonitruration.

IV-.1. Cémentation :

C'est un traitement thermique auquel est soumis un produit ferreux porté à l'état austénitique pour obtenir un enrichissement superficiel en carbone, élément qui se trouve alors en solution solide dans l'austénite. Le produit ferreux cémenté subit un durcissement par trempe immédiate ou ultérieure.

Remarques :

- a. Les déformations et le calaminage sont importants. Ainsi faut-il nécessairement rectifier après traitement les surfaces de qualité 7, et même 8 éventuellement.
- b. Il faut éviter la cémentation des angles vifs qui deviennent trop fragiles ; en particulier, les [filetages](#) ne doivent pas être cimentés.

4.1.1. Techniques de cémentation :

Les agents de cémentation peuvent être solides, liquides ou gazeux.

4.1.1.a. Cémentation en caisse :

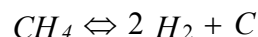
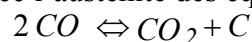
Les ciments solides sont des mélanges à bases de matière carbonées aptes à former les gaz ou les espèces carburantes (CO). La cémentation se fait en vase clos pour éviter que les gaz ne s'échappent, d'où le nom de cémentation en caisse donné à ce procédé, peu utilisé actuellement et réservé au traitement de grosses pièces ou de séries limitées de petites pièces.

4.1.1.b. Cémentation liquide :

Les ciments liquides sont à bases de cyanures ou de ferro-cyanures fondus. Les pièces sont immergées dans le bain de sel fondu à la température choisie pour la réaction chimique et la diffusion. La cémentation en bain de sel permet un chauffage homogène et une action chimique régulière ; sa mise en œuvre est simple et son coût d'investissement est faible, mais les sels de cyanure utilisés ont des effets polluants.

4.1.1.c. Cémentation gazeuse :

La cémentation gazeuse est la plus employée. Elle se fait industriellement à partir d'atmosphères obtenues par décomposition à chaud de liquides organiques tels que méthanol, éthanol utilisé pur ou dilués, ou par combustion des hydrocarbures, atmosphères qui sont caractérisées par leur potentiel carbone. Le potentiel carbone d'une atmosphère est défini comme étant la teneur en carbone à la surface d'un échantillon de fer pur en équilibre avec le milieu de cémentation considéré. Il y a carburation si, initialement, l'activité du carbone dans le métal est inférieure au potentiel carbone de l'atmosphère. Dans le cas inverse, il y a décarburation du métal. Quand ces deux variables sont égales, le système est à l'équilibre et n'évolue pas. Les gaz tels que l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud à la surface de l'acier, de telle sorte que le carbone libre libéré s'insère dans le réseau cubique à faces centrées du fer ; ils donnent avec l'austénite des équilibres réversibles :



définis en fonction de la pression, de la température, de la composition gazeuse et de la concentration en carbone C de l'austénite.

4.1.2. Profondeur conventionnelle de cémentation :

La profondeur conventionnelle de cémentation est définie par la distance entre la surface et la couche dont la dureté Vickers est HV= 550 lorsqu'on la mesure sous une charge de 9.807 N. Cette profondeur dépend donc du profil de la teneur en carbone, du degré de transformation martensitique des divers points de la couche enrichie et de la présence éventuelle d'austénite résiduelle.

4.1.3. Aciers pour cémentation :

Ce sont des aciers à grain fin et à basse teneur en carbone. Les aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour cémentation se classent en six familles indiquées dans le tableau suivant :

Types d'aciers	Nuances
Aciers au carbone	C10-C12-C18
Aciers au manganèse-chrome	16MoCr5-20MoCr5
Aciers au chrome-molybdène	18CrMo4
Aciers au nickel-chrome	10NCr6-16NiCr6-20NiCr6- 14NiCr11
Aciers au nickel-chrome-molybdène	20NiCrMo2-18NiCrMo6
Aciers au bore	21Bo3-20MoBo5-19NiCrMoBo2

IV.2. Nitruration :

Une trempe et un revenu précèdent ce traitement.

- But** : Obtenir une pièce résiliente à cœur et très dure en surface.
 - Pièce cémentée trempée : $HRC = 60$ (dureté conservée à $200^{\circ}C$)
 - Pièce trempée nitrurée : $HRC = 75$ à 80 (dureté conservée à $500^{\circ}C$ $HRC = 60$, $R_m = 230$ daN/mm²).
- Principe** : C'est un durcissement superficiel obtenu par réaction de l'azote et de certains alliages ferreux (fer + ammoniac, constitué d'hydrogène et d'azote, le tout chauffé à $550^{\circ}C$). L'azote en présence forme des nitrures de fer, ce qui provoque une augmentation de dureté. L'acier traité doit contenir de l'aluminium car celui-ci limite la pénétration des nitrures.
- Matériaux à nitrurer** : Aciers alliés de 0,3 à 0,6 % de carbone + de l'aluminium et du chrome :

40 Cr Al Mo 6 12

L'agent nitrurant peut être :

- ❖ Liquide : bains de sels fondus ;
- ❖ Solide : poudres ;
- ❖ Gazeux : où l'azote est actif à l'état atomique (nitruration gazeuse) ou à l'état d'ions dans un plasma (nitruration ionique).

4.2.1. Nitruration gazeuse :

La température usuelle de nitruration est comprise entre 500 et $550^{\circ}C$. La nitruration n'a d'intérêt que pour des aciers alliés contenant des éléments tels que Cr, Mo, V, Al.

Une couche nitrurée comprend généralement :

- En surface, une zone de combinaison : (5 à $30 \mu m$) constitué en proportion variable de nitrure de fer ($Fe_4 N$) relativement ductile et ($Fe_{2-3} N$) relativement fragile et de bonnes propriétés tribologiques (usure et frottement).
- Suivi d'une zone de diffusion (0.05 à 0.8 mm) dans laquelle sont précipité des nitrures des éléments alliés (chrome, nickel, aluminium...) sous forme de particule suffisamment fine et résistante. Les duretés pourront atteindre 900 à 1100 HV. les

nuances essentiellement utilisées sont : 30CrMo12, 30CrAlMo6-12, 40CrAlMo6-12, 30CrAlMo7-32, 32CrMoV12-10...

Domaines d'application :

Axe de piston, soupape, vilebrequins, arbre de machine outil, arbre de pompe à eau, pignonneries de boîte à vitesse.

4.2.1. Nitruration liquide :

Elle utilise des bains de sels fondus vers 570°C. La couche formée a une structure complexe :

- Une zone superficielle mince contenant des nitrures de type $F_{2-3} N$ très résistant au grippage et à l'usure (10 à 20 μm).
- Une zone de diffusion (0.5 mm) correspondante à celle obtenue au nitruration gazeuse.

IV-3. Carbonitruration :

Ce traitement est une combinaison de la [cémentation](#) et la [nitruration](#). Il consiste à faire diffuser simultanément le carbone et l'azote dans la phase austénitique en atmosphère gazeuse constituée de carbone et d'ammoniac. Ce traitement permet d'avoir une bonne résistance à l'usure et à la corrosion, une bonne tenue en service et une grande dureté superficielle.

Domaines d'application :

Articulations, engrenages, arbres,...

IV-4. Sulfonitruration :

C'est l'action de diffusion simultanée de soufre, d'azote et de carbone obtenue par immersion de la pièce dans un bain de sels fondus :

- à 570°C pendant 1 à 3 heures dans un mélange de cyanures et de sulfures alcalins,
- à 565°C pendant 90 minutes dans un mélange de cyanates, de carbonates et de sulfures alcalins.

Par exemple, dans le premier cas, trois zones distinctes se forment dans la couche superficielle :

- en surface, une zone finement poreuse de 15 μm d'épaisseur essentiellement constitué de sulfure et nitrure de fer ($Fe_3N + FeS$), de dureté voisine de 350-400HV ;
- suivie par une zone de 10 μm où se trouvent essentiellement des nitrures de dureté comprise entre 900 et 1000HV ;
- reliée au métal de base par une couche de diffusion à teneur décroissante en azote de 0.5 mm d'épaisseur et dans laquelle peut diffuser également du soufre.

Il est possible de favoriser l'une ou l'autre des deux premières couches en agissant sur les conditions et en particulier la composition du bain.

La présence de nitrures améliore la résistance à l'usure. La présence de sulfures améliore la résistance au grippage. En outre des contraintes de compression prenant naissance dans les couches superficielles, la tenue en fatigue est améliorée également. La sulfonitruration est applicable en fait à tous les alliages ferreux.

Exemples d'application : glissières, paliers, guides, arbre..

IV-5- Sulfinisation.

1. **But :** La sulfinisation ou [cémentation](#) par le soufre communique à la surface traitée une haute résistance à l'usure, sans accroissement de la dureté. Elle s'applique à tous les matériaux ferreux.

2. **Principe** : Les pièces sont chauffées à 570°C pendant trois heures dans un creuset de cyanure et de sels dérivés du soufre, le refroidissement se fait dans l'eau à 80°C.
3. **Résultats obtenus et applications** : On obtient une couche d'environ 0,3 mm, il faut prévoir 0,02 à 0,03 mm de surépaisseur pour la rectification. Une bonne résistance aux frottements résulte de la porosité de la couche traitée (réserve de graissage). Ce traitement est surtout utilisé pour les pièces de frottements servant de contact mobile : les patins, les coussinets, les glissières de machines-outils.