

Chapitre 05 : Les traitements thermiques superficiels

5.1. Introduction

Outre les traitements thermiques classiques, il existe toute une gamme de traitements thermochimiques et qui diffèrent considérablement des premiers. Les traitements superficiels des aciers ont pour but l'obtention d'une dureté élevée en surface jointe à une ductilité importante à cœur.

Pour n'importe quel métal, il est souhaitable qu'il présente de hautes caractéristiques de résistance alliées à de bonnes caractéristiques de ductilité (allongement, résilience). Mais ces exigences inconciliables avec un métal homogène puisque les caractéristiques citées varient en sens inverse.

Un traitement thermique classique ne convient donc pas pour concilier ces deux caractéristiques contradictoires. La solution apportée à ce problème consiste à utiliser un métal apte à prendre une grande résilience auquel on fait subir un traitement de durcissement superficiel. Ainsi le métal devenant hétérogène est constitué d'une âme résiliente et d'une couche superficielle dure, résistante à l'usure et à la fatigue.

Cette hétérogénéité peut être obtenue

- soit par une modification superficielle de la structure du métal (trempe superficielle),
- soit par modification d'une zone superficielle par traitement thermochimique de diffusion d'un élément d'alliage par contact avec un milieu adapté :
 - ✓ Nituration : diffusion d'azote
 - ✓ Sulfonituration : diffusion simultanée d'azote et de soufre
 - ✓ Chromisation : diffusion de chrome
 - ✓ Boruration : diffusion de bore
 - ✓ Shérardisation : diffusion de zinc
- soit par un double traitement, d'abord chimique par diffusion suivie d'un traitement thermique par trempe et revenu :
 - ✓ Cémentation : diffusion de carbone suivie d'un durcissement par trempe.
 - ✓ Carbonituration : diffusion simultanée d'azote et de carbone suivie d'un durcissement par trempe.
 - ✓ Cyanuration : diffusion de cyanure de sodium suivie d'un durcissement par trempe.

5.2. Trempe superficielle

La trempe superficielle consiste à réaliser une trempe martensitique dans une couche superficielle de quelques millimètres d'épaisseur (1 à 100 mm environ) sans apporter de modification au métal sous-jacent.

Pour cela, on chauffe très rapidement cette couche au-dessous de A_{c3} et on refroidit immédiatement (de façon que la chaleur n'ait pas le temps de se transmettre à l'intérieur) et énergiquement à l'eau généralement, afin d'y réaliser l'état martensitique.

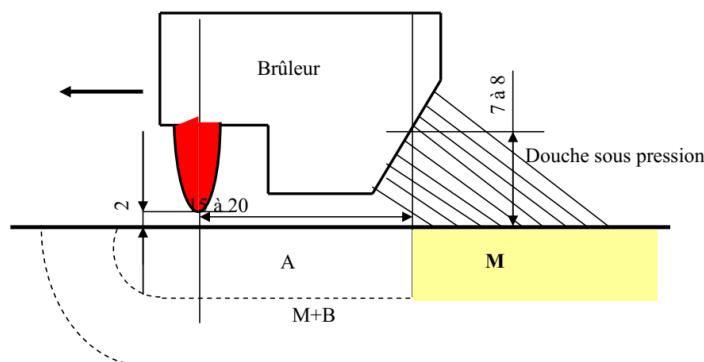
Le traitement se fait soit sur un métal recuit, soit sur un métal trempé et revenu.

Le chauffage se fait par :

- a. **Par un chalumeau** : Il est utilisé lorsque la trempe concerne les parties superficielles des grosses pièces (cylindres de laminaires, gros arbres, etc...) fabriquées en petites séries, et convient surtout pour des pièces de formes irrégulières. La méthode consiste à donner une puissance calorifique considérable de façon à ce que la surface obtienne la température de trempe et le cœur reste froid. Un refroidissement rapide ultérieur est assuré par un jet d'eau qui se déplace conjointement avec le chalumeau.

L'épaisseur de la couche trempée varie de 2 à 4 mm et sa dureté atteint l'ordre de 55 HRC.

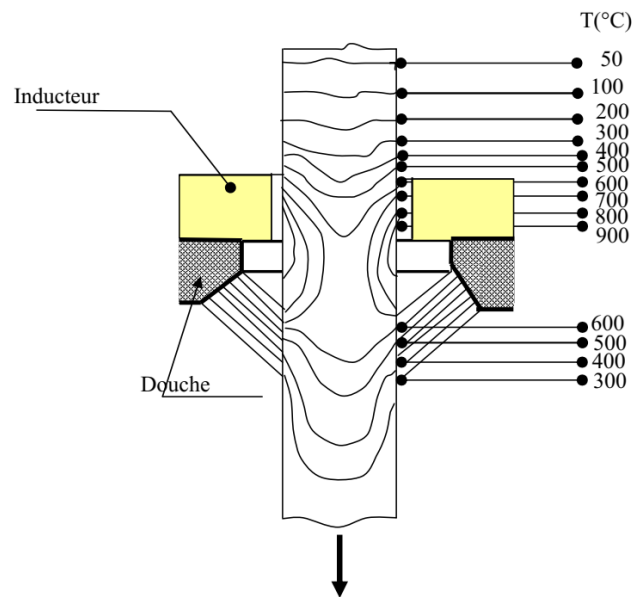
La couche superficielle acquiert une structure martensitique alors que la couche sous-jacente a une structure bainite + martensite.



- b. **Par induction** : Lorsqu'on applique un courant alternatif à un conducteur, il tend à circuler sur la périphérie, alors qu'un courant continu l'occupe toute la section du conducteur. Cette particularité du courant alternatif est exploitée pour réaliser la trempe superficielle par induction. L'épaisseur de la couche où circule le courant est d'autant plus faible que la fréquence du courant est élevée (10 à 10000) kHz.

Pour réaliser l'échauffement, la pièce est placée convenablement dans un inducteur ou solénoïde, à une ou plusieurs spires refroidies généralement à l'eau. Le passage du courant alternatif dans le solénoïde crée dans la pièce un courant superficiel de même fréquence, qui porte la couche périphérique au-dessus de A_3 , alors que le cœur reste froid.

La trempe par induction semble préférable pour les pièces de forme régulière (engrenage, arbres à cames, vilebrequins, pignons....) traitées en grande série.



5.3. Traitements thermochimiques

On désigne par traitement thermochimique, la saturation superficielle de l'acier par un élément chimique (C, N, Al, Cr...). Cette saturation se produit par diffusion à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur porté à une température convenablement choisie. Le traitement thermochimique consiste à chauffer les pièces, dans un milieu solide, liquide ou gazeux, capable de lui céder l'élément diffusant, à les maintenir à cette température, puis à les refroidir. Ce traitement permet de changer la structure de l'acier et la composition chimique des couches superficielles, ce qui entraîne une large variation des propriétés.

La vitesse de diffusion des atomes diffusants qui s'insèrent dans le réseau du fer n'est pas la même. La saturation en carbone et en azote, qui forment avec le fer des solutions solides d'insertion, rend la diffusion plus rapide que la saturation en métaux, qui forment avec le fer des solutions solides de substitution ; c'est pour cela que les températures dans ce dernier cas doivent être plus élevées.

5.3.1. Cémentation de l'acier

La cémentation est une opération de durcissement superficiel par accroissement de la teneur en carbone suivie de trempe. Le principe consiste à former à la surface d'un acier doux (0.1 à 0.2)% C,

une couche superficielle plus ou moins profonde riche en carbone (0.8 à 0.9 %) C en chauffant les pièces à une température convenable dans un milieu capable de leur fournir du carbone, appelé cément.

La cémentation s'obtient suite à :

- Une réaction chimique dans le cément qui produit du carbone actif à la surface du métal.
- Une diffusion de ce carbone dans les couches superficielles de l'acier porté à l'état austénitique.

5.3.1.1. Mécanisme de la cémentation

La diffusion du carbone dans l'acier n'est possible que lorsque le carbone se trouve à l'état atomique à la surface du métal. Le carbone atomique absorbé par la surface de l'acier diffuse vers l'intérieur des pièces.

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 AC_3 (920 à 950°C) qui rendent stable l'austénite, dissolvant en quantité le carbone.

Pendant la cémentation, les atomes de carbone diffusent dans le réseau du fer γ . Lorsque la limite de saturation de l'austénite en carbone est atteinte, les conditions favorisent la formation à la surface d'une couche de cémentite continue.

Dans les conditions réelles, il est rare qu'on observe la formation d'une couche de cémentite continue à la surface. Dans les conditions courantes, la cémentation au-dessus du point Ac_3 , ne forme que l'austénite qui se décompose après refroidissement lent en précipitant la ferrite et la cémentite.

Dans ces conditions un refroidissement lent produit trois zones dans la structure de la couche cémentée.

- Une structure hypereutectoïde constituée de perlite et de cémentite secondaire formant un réseau suivant l'ancien grain d'austénite.
- Une structure eutectoïde constitué de perlite lamellaire.
- Une structure hypoeutectoïde constituée de perlite et de ferrite. La quantité de ferrite augmente à mesure qu'on s'approche du cœur de la pièce.

L'épaisseur de la couche cémentée diminue avec l'augmentation de la concentration en carbone dans l'acier. Pour un acier à $\leq 0,17$ % C, elle est de 15 % de l'épaisseur soumise à la cémentation, pour

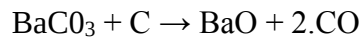
les aciers à $> 0,17\%$ C, elle est de 5 à 9 %. Le plus souvent, l'épaisseur de la couche varie de 0,5 à 2 mm et la concentration en carbone dans la couche superficielle doit être de 0,8 à 1,0 %. Des concentrations plus élevées dégradent les propriétés mécaniques de la pièce cimentée.

5.3.1.2. Les procédés de cémentation

a. Cémentation par agent solide

Dans ce cas, on utilise comme agent de cémentation le charbon de bois activé en grains, ainsi que du coke. Pour activer la cémentation, on ajoute de 10 à 40 % du poids du charbon, le carbonate de baryum BaCO_3 et le carbonate de sodium Na_2CO_3 .

Le ciment solide employé à l'état granulé favorise le déplacement des gaz et permet d'obtenir une vitesse de pénétration plus élevée que dans le cas de poudre. La présence de carbonates enrichit l'atmosphère de cémentation en gaz CO selon la réaction :



A son tour, le gaz CO s'oxyde en présence du fer en donnant du carbone actif C qui diffuse dans l'acier :



Les pièces prévues pour la cémentation sont préalablement décapées ensuite placées dans des caisses en acier. Lors de la pose des pièces, on couvre le fond de la caisse d'une couche de ciment, damée de 20 à 30 mm d'épaisseur, sur laquelle est placée la première série de pièces en maintenant une distance de 10 à 15 mm entre les pièces et les parois latérales.

Ensuite cette première couche de pièces est couverte d'une couche de ciment damée de 110 à 115 mm d'épaisseur, sur laquelle on pose la deuxième couche de pièces etc. La couche supérieure des pièces est couverte d'une couche de ciment de 35 à 40 mm d'épaisseur pour compenser son retrait éventuel. La caisse est couverte d'un couvercle dont les bords sont mastiqués avec de l'argile réfractaire ou avec un mélange d'argile et de sable de rivière pétris dans l'eau jusqu'à l'état pâteux.

La caisse est placée dans un four où la température de cémentation varie de 910 à 930°C. Le maintien à la température de cémentation est de 7 à 9 min par centimètre de la dimension maximale de la caisse. Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500°C. Généralement l'épaisseur de la couche à cimenter est choisie selon la température et durée de cémentation.

		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 par agent liquide

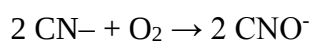
Le milieu liquide est un bain de sels en fusion riche en produits carburants ou carbonitrurants dans lequel on immerge les pièces.

Les bains de cémentation sont formés de cyanure de sodium NaCN, de chlorure de baryum BaCl₂ (activateur) et de chlorures alcalins (modérateurs), permettant de réaliser une fluidité convenable. Du graphite en poudre surnage à la surface du bain et empêche l'action de l'air.

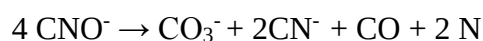
Il existe trois types de bains :

- les bains non activés à haute teneur massique en cyanure (30 à 40 %) pour lesquels la diffusion d'azote est importante avec pour conséquence une limitation de la teneur en carbone. Ce sont les véritables bains de carbonituration ; leur emploi est limité à 870 °C;
- les bains activés ou accélérés à moyenne teneur en cyanure (15 à 20 %) employés jusqu'à 900°C, bien adaptés aux faibles profondeurs, faciles à employer grâce à leur fluidité ;
- les bains activés à faible teneur en cyanure (8 à 10 %) pour la cémentation profonde employés jusqu'à 950 °C.

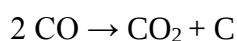
Au contact de l'air, le cyanure de sodium s'oxyde en formant du cyanate NaCNO :



à la température de traitement, le cyanate se décompose en carbonate et en cyanure et libère du monoxyde de carbone et de l'azote actif



L'azote diffuse dans le fer alors que le CO se décompose en surface des pièces



La cémentation par agent liquide permet d'obtenir les mêmes profondeurs de cémentation pour les temps plus courts relativement à la cémentation par agent solide et gazeux.

c. Cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse se fait en chauffant les pièces dans un milieu de gaz contenant du carbone. Ce traitement permet d'obtenir, par rapport à la cémentation par agent solide, une concentration exacte du carbone dans la couche à cémenter et diminue la durée du processus.

Le ciment est un mélange réducteur composé de $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{N}_2$ additionné d'une faible proportion d'hydrocarbures (CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 et surtout le propane C_3H_8).

Par exemple : 38 % d'azote + 40 % d'hydrogène + 20 % de monoxyde de carbone (CO) + 2 % C_3H_8 .

Le mélange réducteur $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{N}_2$ s'obtient généralement par combustion partielle de gaz de distillation de la houille ou d'hydrocarbure. Le produit obtenu est ensuite réduit par du carbone, afin d'éliminer les gaz décarburants (O_2 , CO_2 , H_2O).

La réaction principale qui assure la carburation est la dissociation du méthane et de l'oxyde de carbone.

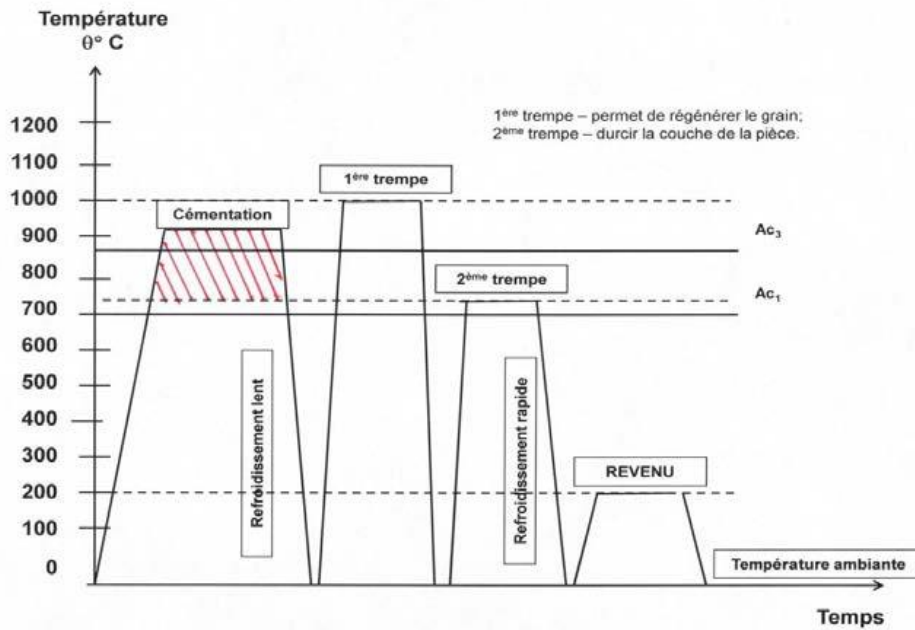


La cémentation s'effectue à la température de 930 à 950°C, la durée de l'opération assurant l'obtention d'une couche de 0,7 à 1,5 mm d'épaisseur dans les fours à moufle ou à marche continue est de 6 à 12 heures.

5.3.1.3. Traitement thermique de l'acier après cémentation

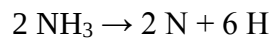
Après cémentation et en raison de la température maintenue et de la durée de l'opération, l'acier cémenté obtient une structure à gros grains, et devient ainsi fragile. Pour remédier ce défaut, il faut procéder aux traitements thermiques suivants :

- Une trempe avec austénisation vers 950°C, dont le but est de corriger la structure et affiner le grain au cœur et dans la couche cémentée.
- Une deuxième trempe avec austénisation vers 750°C, pour obtenir une dureté élevée de la couche cémentée et de bonnes propriétés mécaniques du cœur.
- Un revenu vers 175°C qui a pour rôle d'atténuer les tensions internes et la fragilité des pièces.



5.3.2. La nitruration

La nitruration est un procédé de durcissement superficiel appliqué à certains aciers et fontes permettant d'obtenir des duretés plus élevées que celles obtenues par cémentation. La nitruration consiste à saturer en azote, la surface de l'acier dans le milieu ammoniacque qui se dissocie suivant la réaction suivante :



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 nitruration se produit généralement à des températures oscillant entre 504 °C et 566 °C, à partir desquelles le matériau se trouve à l'état ferritique plutôt que dans le domaine austénitique utilisé pour la cémentation.

Le gaz ammoniac, est utilisé comme agent de nitruration, dans lequel les pièces baignent et sont chauffées jusqu'à 550°C. Au contact du fer, l'ammoniac se dissocie en azote et hydrogène. Une partie de l'azote est absorbée par le métal, tandis que les gaz H_2 , NH_3 , H_2 en excès sont évacués. La diffusion de l'azote dans la couche superficielle est plus rapide que celle du carbone à la température 550°C.

La présence du chrome, de l'aluminium et du molybdène dans l'acier permet la formation des nitrures de ces éléments qui augmentent effectivement la dureté des pièces nitrurées jusqu'à 1200 HV.

La nitruration n'est suivie d'aucun traitement thermique, ce qui permet d'éviter toute oxydation du métal et toute déformation des pièces. Pour la pratique de la nitruration, les pièces à nitrurer doivent subir au préalable un traitement thermique (trempe + revenu) pour obtenir le maximum de résilience et bien sùre, leur usinage doit être aussi effectué avant l'opération de nitruration.

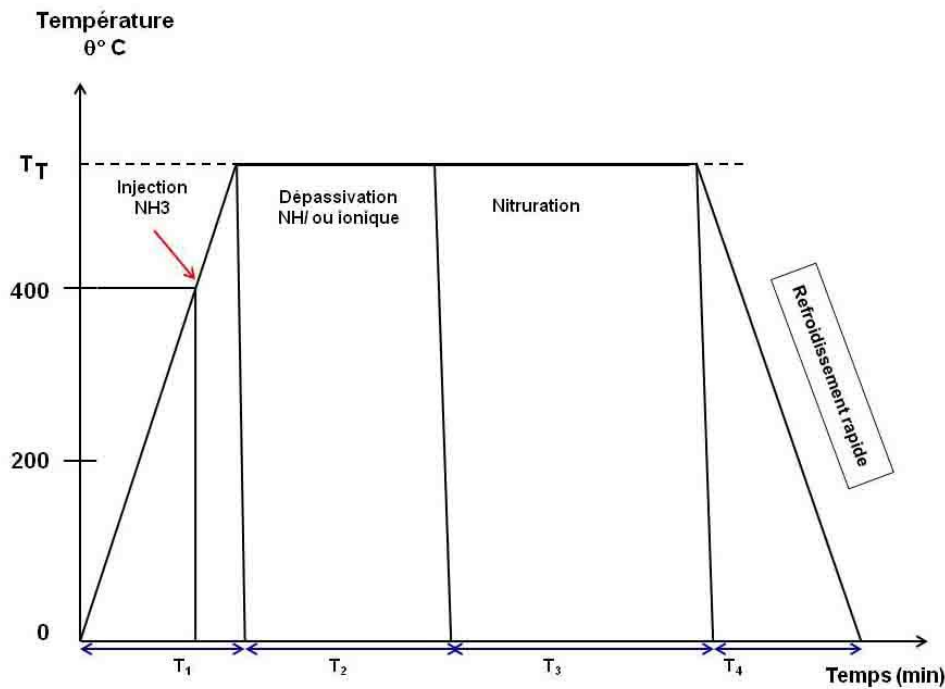
La nitruration présente beaucoup d'avantages sur la cémentation :

- La dureté est plus grande (1100 HV au lieu 800 HV)
- Elle se conserve jusqu'à 500°C, alors que la dureté d'une couche cémentée chute à partir de 200°C.
- Donne le maximum de résistance à l'usure et une certaine résistance à la corrosion

Par contre, la nitruration coûte plus chère que la cémentation et présente un léger gonflement de la couche nitrurée dont il ne faut pas négliger.

Généralement il existe deux types de nitrurations :

- **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.
- **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). 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 (10 à 15 μm) riche en azote et d'une zone de diffusion d'environ 0.5 mm.



5.3.3. La carbonitruration

La carbonitruration est un procédé de durcissement superficiel des pièces en acier que l'on chauffe dans une atmosphère gazeuse ($\text{CO} + \text{N}_2 + \text{C}_3\text{H}_8$), permettant au métal d'absorber simultanément du carbone et de l'azote. Après le temps de diffusion, les composants sont directement trempés à l'huile. Le traitement thermique est terminé par un revenu à basse température, située entre 150 °C et 200 °C, pour les plages de profondeur de couche cémentée les plus profondes, ce qui permet de réduire la fragilisation en fonction des circonstances tribologiques.

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 partie de l'azote pénètre dans le réseau cristallin de l'acier en provoquant entre autres une augmentation importante de la trempabilité. Les pièces carbonitrurées peuvent donc ensuite être trempées.

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.

Un vaste éventail d'aciers peuvent être carbonitrurés²⁹, des aciers au carbone ordinaire aux aciers doux (avec une teneur en aluminium réduite), en passant par les aciers faiblement alliés avec un maximum variant de 0,25 % à 0,50 % de carbone, les aciers de décolletage et les aciers frittés. La carbonitruration est généralement appliquée aux pièces de formes complexes.

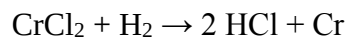
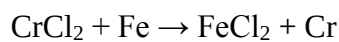
Il s'agit d'un traitement de plus en plus, prisé par les industries exigeant une grande précision pour leurs pièces (véhicules automobiles et aéronautique).

5.3.4. La chromisation

C'est la saturation en chrome de la couche superficielle des pièces de l'acier, par diffusion du chrome en milieu pulvérulent à une température supérieure à AC_3 . Les pièces sont mises en caisses et entourées de poudres formées essentiellement de ferro-chrome et d'une matière poreuse réfractaire. Une circulation d'hydrogène est assurée de bas vers le haut. A $1000^{\circ}C$, on introduit du chlorure d'hydrogène qui réagit avec le ferro-chrome selon la réaction :



une partie du $CrCl_2$ réagit avec le fer, l'autre partie réagit avec l'hydrogène.



Le chrome ainsi formé, peut diffuser dans l'acier. L'opération dure quelques heures jusqu'à 12 heures.

Deux procédés de chromisation sont utilisés :

- **Chromisation douce** : appliquée aux aciers à faible teneur en carbone, doux et extra doux. Ce traitement confère à l'acier une résistance à la corrosion remarquable et l'acier peut subir sans dommage, les traitements de pliage et d'emboutissage.
- **Chromisation dure** : appliquée aux aciers à haute teneur en carbone ($> 0,3 \% C$) et en particulier aux aciers à outils. Elle conduit à la formation d'une couche compacte et adhérente de carbures pouvant atteindre une dureté de (1600 à 2000 HV).

5.3.5. La boruration

C'est une saturation de la couche superficielle de l'acier en bore par diffusion de ce dernier en milieu pulvérulent et à une température supérieure à AC_3 . Le bore permet d'obtenir des borures, de type FeB ou Fe_2B de dureté très élevée (1800 à 2000 HV) qui assure une bonne tenue à l'usure et à la corrosion.

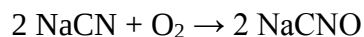
La boruration est effectuée par électrolyse des sels fondus contenant du bore, le bain de bore $Na_2B_2O_7$ fondu, sert de cathode, dans ce dernier on place les pièces. La température de saturation est de 930 à $950^{\circ}C$ et la durée de séjour est de 2 à 6 heures.

La boruration peut être aussi effectuée sans électrolyse dans des bains de chlorures fondus (NaCl , BaCl_2), auxquels on ajoute du ferro-bore (20 %) ou du carbure de bore (10 %) pulvérulents.

La boruration est appliquée aux pièces employées dans l'industrie pétrolière, bagues de pompes à boue, les matrices et estampes pour le formage à chaud. La boruration est un procédé que peuvent subir tous les aciers, car elle confère aux pièces une grande résistance à l'abrasion et à l'usure.

5.3.6. La cyanuration

La cyanuration est un procédé ayant pour but la saturation simultanée de la surface de l'acier en carbone et en azote afin d'augmenter la dureté et la tenue à l'usure. Les aciers destinés à subir un tel traitement contiennent de 0,2 à 0,4 % C. La cyanuration réalisée à des températures de 820 à 860°C, dans des bains contenant 20 à 25 % NaCN , 25 à 50 % NaCl et 25 à 50 % Na_2CO_3 , est destinée pour obtenir une couche de faible épaisseur (0,15 à 0,35 mm). La durée de l'opération varie en fonction de l'épaisseur de la couche à obtenir est de 30 à 90 min. Le carbone atomique et l'azote dégagés selon les réactions ci-dessous, diffusent dans l'acier.



Pour obtenir une couche plus épaisse (0,5 à 2 mm), l'opération se déroule dans un bain différent composé de NaCN , BaCl_2 et NaCl . La cyanuration est très employée dans l'industrie automobile et applicable aux petites pièces, telles que les pignons de commande de la pompe à huile, les compteurs de vitesse, les axes de ressort de la suspension arrière, les vis sans fin du volant, les petits arbres, les écrous etc. L'inconvénient de la cyanuration est le prix élevé et la nocivité des cyanures, ainsi que la nécessité imposée de prendre des mesures de protection spéciales.

5.3.7. Durcissement superficiel par écrouissage

C'est un procédé mécanique qui consiste à créer des micro-déformations plastiques dans les couches superficielles des pièces, ce qui peut avoir deux effets :

- Durcissement par écrouissage, introduction de contraintes superficielles de compression.
- Transformations éventuelles de phases.

Ce durcissement est surtout appliqué aux matériaux ne prenant pas la trempe, au cuivre en particulier.

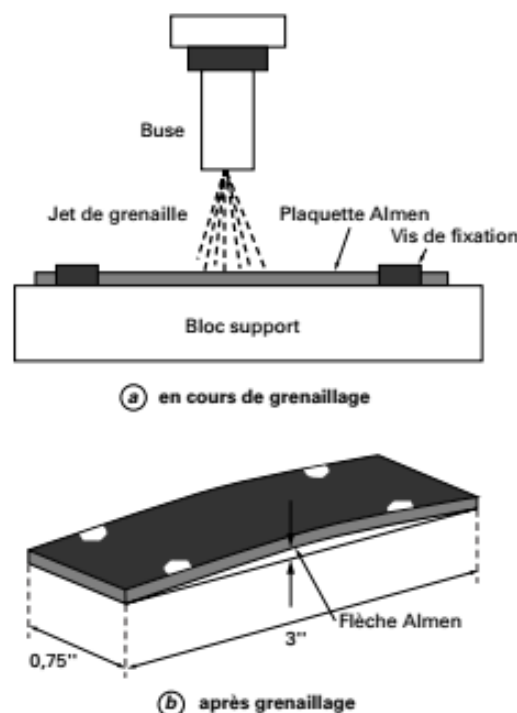
a. Le grenaillage

Une opération de grenaillage consiste à soumettre la surface d'une pièce à un « bombardement » contrôlé de particules généralement sphériques. Elles sont propulsées à grande vitesse soit par une turbine soit par un jet d'air comprimé. Les particules utilisées sont soit de la grenaille d'acier soit des billes de céramique ou de verre. Chaque particule agit comme un minuscule marteau à tête sphérique et « imprime » dans le matériau une cupule de déformation plastique plus ou moins profonde selon la nature du matériau grenaillé et l'énergie cinétique de la particule. L'opération est terminée lorsque la surface est entièrement recouverte par un réseau d'empreintes suffisamment dense.

On peut mettre en évidence, ces contraintes et montrer que ce sont des contraintes de compression par l'essai ALMEN. Cet essai consiste à grenailler une pièce bridée qu'on relâche ensuite, et on mesure la flèche f .

L'action du grenaillage est double. Elle comprend :

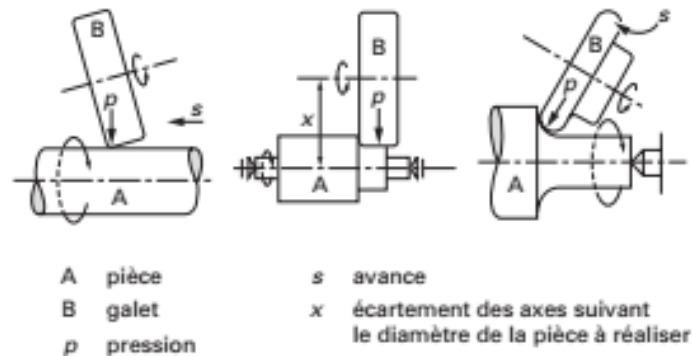
- un effet « de peau » se traduisant par la modification de la rugosité, le « gommage » des défauts superficiels mais également par un fort écrouissage local du matériau qui altère plus ou moins fortement sa capacité de déformation ultérieure et sa dureté ;
- un effet « en profondeur » se traduisant par la génération d'un champ de contraintes résiduelles de compression qui constitue l'atout majeur du traitement.



b. Le galetage

La couche superficielle de la pièce est déformée plastiquement en faisant rouler sur la surface un galet sous forte charge.

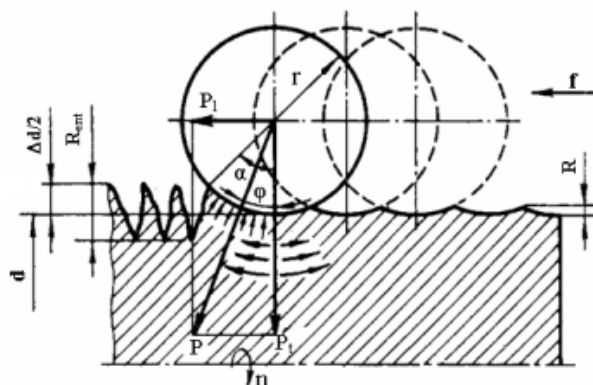
Le galetage est très utilisé pour le traitement des congés de raccordement, en particulier sur les vilebrequins (presque tous les vilebrequins des moteurs des véhicules automobiles). Le galetage effectué à différents rayons est aussi utilisé pour augmenter la stabilité dimensionnelle des scies circulaires.



c. Le brunissage

Le brunissage est un traitement de surface par écouissage. Il permet de nettoyer les pièces traitées, d'atténuer les rayures et les chocs, d'obtenir un durcissement de la surface et de donner un éclat exceptionnel à cette dernière. Le brunissage opère sans enlèvement de matière, il est réalisé par l'action d'une bille dure sur la surface d'une pièce métallique comme montré sur la figure ci-dessous. La déformation de la surface induit l'écrouissage du matériau et l'apparition de contraintes résiduelles de compression qui améliorent les propriétés mécaniques de la surface de la pièce, en offrant une dureté superficielle plus importante et une meilleure tenue à la fatigue et s'applique à de nombreuses pièces : ressorts de soupapes, ressorts de suspension, aubes de turbines, etc.

Parmi ces applications, le matage des bords des trous par pression et rotation d'un outil conique.



r- rayon de la bille
d- diamètre de la pièce
 Δd - déformation restante
 R_{ent} - hauteur de rugosité de la surface de départ
R- hauteur de rugosité après Repassage
 P_l - pression longitudinale
 P_t - pression transversale