

5. TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS

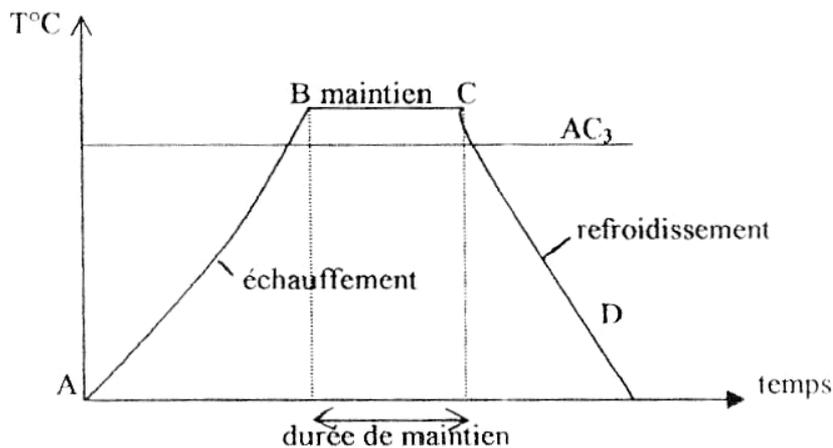
Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- a. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :
 - Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément.
 - Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- b. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- c. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. Les traitements thermiques sont appliqués surtout aux aciers XC et aciers alliés ZR alliages non ferreux. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage.

5.1. Définitions et procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (fig. 124).



(fig.124)

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC_3).

- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

5.1.1. Chauffage des pièces

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces.

a. Par transmission de la chaleur :

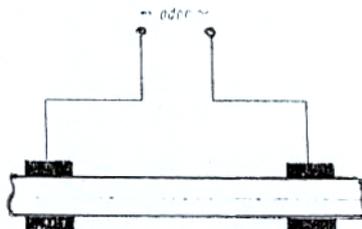
On distingue trois possibilités :

- **Par conductibilité** : La pièce est chauffée dans un four ordinaire où elle est en contact qu'avec le sol du four, elle ne reçoit par conductibilité qu'une petite quantité de la chaleur dépensée.
- **Par convection** : Dans ce cas, la pièce est chauffée par contact avec un fluide chaud (gaz ou liquide) qui se déplace et lèche la pièce en lui cédant une grande partie de la chaleur dépensée.
- **Par rayonnement** : La chaleur absorbée par les parois et la voûte du four est rayonnée vers la pièce qui l'absorbe. C'est le cas où l'apport de chaleur est le plus important.

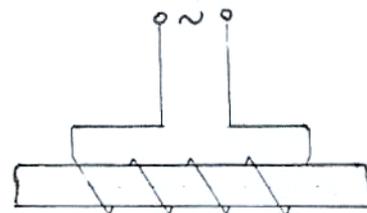
Dans la plupart des cas, le chauffage des pièces, est effectué simultanément par convection et rayonnement.

b. Par production de la chaleur dans la pièce :

C'est une possibilité de chauffer la pièce en créant dans cette dernière un flux de courant, soit par l'utilisation de la pièce comme conducteur dans un circuit électrique (chauffage par résistance) ou l'emplacement de la pièce dans un champ variable (chauffage par induction) comme le montre les figures 125 et 126.



Chauffage par résistance
(fig.125)



chauffage par induction
(fig.126)

Cette méthode est utilisée surtout pour les pièces à sections petites et uniformes. On peut obtenir des vitesses de chauffage très élevées. Par exemple pour une pièce de section \varnothing 150 mm, la durée de chauffage pour atteindre $T = 1200^{\circ}\text{C}$ est de :

- 20 mn pour le chauffage par induction.
- 8 mn pour le chauffage par résistance.
- 2 à 3 heures pour le chauffage dans un four.

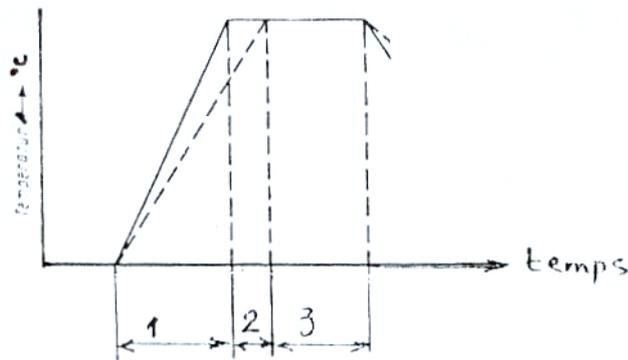
Cette méthode est rentable seulement pour des sections inférieures à 150 mm.

Les difficultés qui peuvent se présenter lors d'un chauffage rapide sont les fissures et étirages des pièces à la suite de la différence de dilatation de la couche extérieure et du cœur de la pièce où se créent des contraintes pouvant provoquer des fissures pour des températures basses et des déformations plastiques pour des températures élevées.

Quelque soit le procédé de chauffage utilisé, il existe toujours une différence de température dans les différentes parties de la pièce. Répartition de la chaleur non uniforme.

La figure 127 représente la courbe de chauffage pour le contour de la pièce et le cœur de la pièce, la courbe est simplifiée comme une droite.

Durant le chauffage, on distingue trois étapes :



(fig.127)

- Durée de préchauffage :** C'est le temps de début de chauffage jusqu'à ce que la température nominale est atteinte à la surface de la pièce.
- Durée de chauffage de pénétration ou d'égalisation :** C'est le temps nécessaire pour atteindre la température nominale à la surface et au cœur de la pièce.
- Durée de maintien :** C'est le temps nécessaire pour maintenir la pièce à une température, et à partir de la température atteinte dans le cœur.

Les facteurs principaux, qui influent sur le chauffage de la pièce sont le diamètre (épaisseur), conductibilité, température du four, etc. En général le régime de chauffage pour les aciers est déterminé selon le diamètre de la pièce et les caractéristiques qui sont définis par le carbone équivalent.

$$C_{\text{équivalent}} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + V + \frac{Si-0,5}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Ti}{5} + \frac{Al}{10}$$

Pour des teneurs maximales jusqu'à : 0,9 % C, 1,1 % Mn, 1,8 % Cr, 0,5% Mo, 5,0 % Ni, 0,25% V, 1,8% Si, 2% W, 0,4 %Ti, 2% Al, et selon RUHFUS et PLFAUME, il est possible de déterminer la durée de chauffage de la pièce en dépendance de son diamètre et du carbone équivalent (C_{eq}).

Les paliers représentés sur les courbes (fig. 128) ont pour but de diminuer la différence de température entre le cœur et la couche extérieure de la pièce (égalisation de la température). Ces courbes sont valables pour des chauffages de trempe et de recuit de normalisation.



Temps de chauffage en min, recommandés pour revenu normal et trempe en dépendance de C_{eq} pour une pièce de diamètre 60 mm.

(fig. 128)

Pour les différents chauffages, on peut choisir les vitesses suivantes :

- Chauffage lent : 3 à 10°C/min.
- Chauffage technique conventionnel (normal) : 50°C/s.
- Chauffage rapide : > 50°C/s.

5.1.2. Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques

L'appareil de chauffage doit permettre :

- D'atteindre et de maintenir toutes les parties de la pièce à une température déterminée et avec une précision de l'ordre de plus ou moins 5°C.
- D'éviter une dénaturation du métal et principalement une décarburation dans le cas des aciers.
- De présenter des possibilités de préchauffage lorsque la température à atteindre est élevée.

En général seul le chauffage dans une enceinte fermée possédant une régulation automatique de température est susceptible d'offrir la solution cherchée.

5.1.3. Types de fours et leurs atmosphères

a. Fours à sole :

Dans les fours à sole, le chauffage se fait surtout par rayonnement et ils présentent une chambre dans laquelle on met la pièce à chauffer. Dans certains cas une deuxième chambre située au dessus de la première et récupérant une partie de la chaleur formée, sert comme chambre de préchauffage.

b. Fours à bain de sels :

Ils présentent les avantages suivants :

- rapidité de chauffage : car la pièce est en contact sur toutes ses faces avec le sel liquide en mouvement permanent.
- Uniformité de chauffage : les écarts de température entre les différents points du bain sont très faibles, la pièce s'échauffe régulièrement, ce qui diminue l'importance de déformation.
- Absence de dénaturation du métal : le bain qui peut être choisi neutre, oxydant ou réducteur, protège la pièce de tout contact avec l'oxygène de l'air

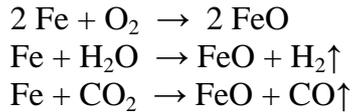
c. Fours électriques :

Les fours électriques peuvent être à sole ou à bain de sel. Ils sont chauffés le plus souvent par résistances métalliques en nickel-chrome pour des températures ne dépassant pas 1000°C et en silicium pour des températures de 1300°C. Les fours électriques à bain de sel à haute température sont à électrodes, le sel fondu formant résistance entre celles-ci.

d. Atmosphères :

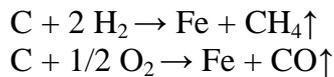
Lorsque les pièces sont chauffées jusqu'aux hautes températures dans ces fours à flammes ou dans les fours électriques, les gaz entrent en réaction avec la surface du métal, ce qui entraîne l'oxydation ou la décarburation des couches superficielles des pièces.

- L'oxydation résulte de l'interaction du métal avec l'oxygène ou la vapeur d'eau se trouvant dans le milieu du four. En général, le dioxyde de carbone CO₂ réagit avec le fer en l'oxydant.



L'oxydation produit une perte de métal et dégrade l'état des couches superficielles. Au début du chauffage, ces réactions se produisent à la surface après formation d'une pellicule d'oxyde. Ce phénomène se propage par diffusion des atomes d'oxygène dans les joints de grains à travers la calamine et, réciproquement, par diffusion inverse, le fer passe vers la surface.

- La décarburation se produit, en même temps, aux températures élevées par interaction des atomes de carbone de l'acier avec l'hydrogène suivant les réactions :



L'intensité d'oxydation et de décarburation de l'acier dépendent de la température, de la composition chimique et du milieu environnant. Pour assurer une atmosphère neutre, on doit satisfaire l'équilibre :

Oxydation ↔ réduction
 Décarburation ↔ carburation

Pour préserver les pièces de l'oxydation et de la décarburation, on introduit dans l'espace utile du four des gaz chimiquement neutres vis-à-vis du métal qu'on appelle 'atmosphères contrôlées', on a plusieurs genres :

- Atmosphère endothermique : obtenue par combustion partielle du gaz naturel et composée de (21 % CO + 40 % H₂O + 2 % CH₄ + 37 % N₂).
- Atmosphère exothermique : obtenue par combustion partielle de CH₄, et composée de (2 % CO₂ + 2 % H₂ + 96 % N₂).
- Azote technique : composé de ((2 à 4) % H₂ + 96 % N₂).
- Chauffage sous vide (de 10⁻² à 10⁻⁶) mm Hg réservé souvent aux alliages spéciaux (réfractaires, inoxydables, électrotechniques).
- Chauffage dans des bains de sels : réservés aux outils de coupe et aux petits éléments de machine.

5.1.4. Refroidissement des pièces

Le point important pour la détermination du régime de refroidissement de la pièce est celui de l'état de structure souhaitée à obtenir. Bien sûr, on cherche toujours à refroidir rapidement pour avoir une productivité élevée, mais on doit prendre en considération les dangers de fissuration et d'étirage des pièces. La vitesse de refroidissement nécessaire à l'obtention d'un état de structure est déterminée selon le diagramme TTT (Température, Transformation, Temps). Le refroidissement s'effectue dans des bacs utilisant l'eau ou l'huile, dans les deux cas, le bain est maintenu à température constante. L'eau chaude se trouvant constamment remplacée par de l'eau froide arrivant par le bas du bac.

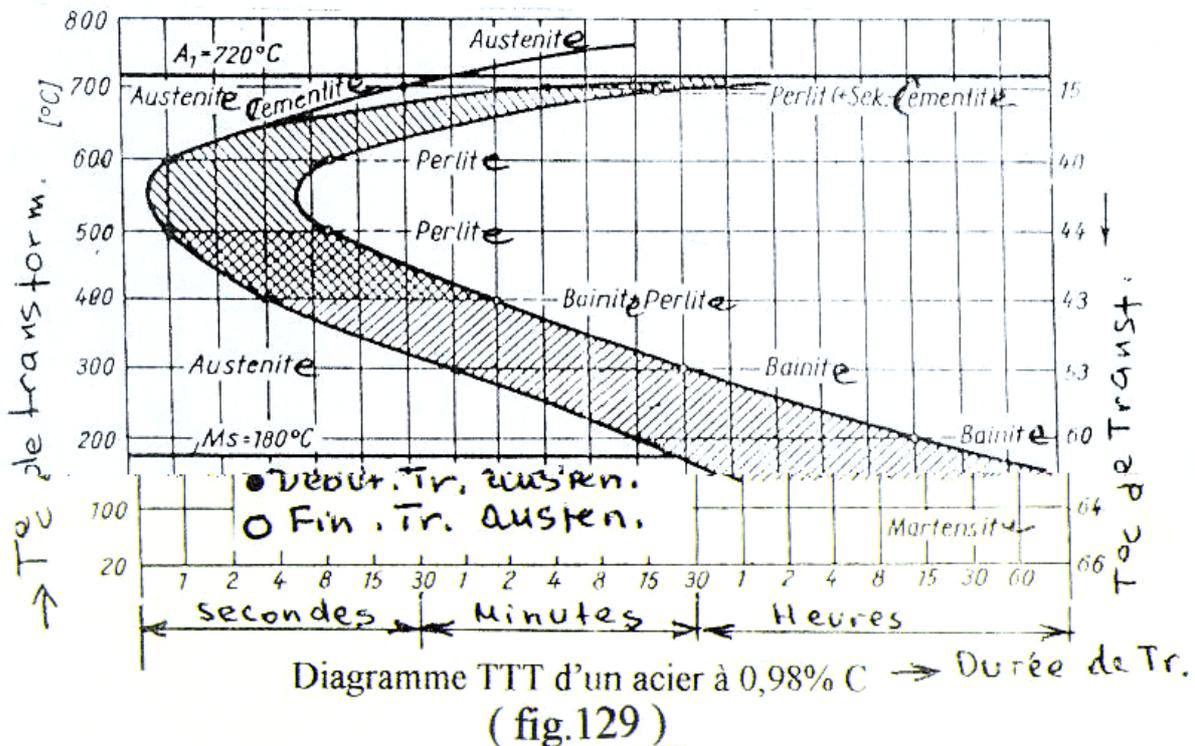
On utilise aussi les jets permettant de régler le refroidissement des pièces sur toute leur surface, et enfin des chambres spéciales avec production du brouillard obtenu par jet d'eau et d'air sous pression, surtout utilisé en aviation pour le traitement de certaines pièces en aluminium.

5.2. Transformations isothermes

Le diagramme d'équilibre déjà envisagé au chapitre précédent, indique la constitution normale de l'acier, constitution d'équilibre, pour les différentes températures.

L'expérience prouve que cette constitution n'est acquise que si la température varie assez lentement pour donner aux transformations le temps de s'effectuer. Dans le cas contraire, non seulement les transformations pourront ne pas avoir lieu du tout ou au contraire se faire incomplètement. On obtient dans ces deux cas de nouveaux constituants que le diagramme d'équilibre ne peut indiquer, ils correspondent à des états hors d'équilibre ou états trempés.

Si un acier à structure austénitique est obtenu par chauffage à une température supérieure à AC_3 , est surfusionné à une température inférieure à A_1 , l'austénite acquiert un état métastable et subit des transformations. Pour décrire l'allure cinétique des transformations, on utilise le diagramme TTT (fig.129).



La transformation isotherme de l'austénite (acier C100, austénitisation à la température de 900°C, pour une durée de 5 min).

Température °C	Transformation		Structure obtenue	Durée de la Structure finale
	Début	Fin		
700	4,2 min	22 min	Perlite	15
600	1 s	10 s	Perlite	40
500	1 s	10 s	Perlite	44
400	4 s	2 min	Bainite + perlite	43
300	1 min	30 min	Bainite	53
200	15 min	15 h	Bainite	60
100	-	-	Martensite	64
20	-	-	Martensite	60

Le diagramme de transformation isotherme (Temps, Température, Transformation), dont les abscisses indiquent le temps et les ordonnées la température, la courbe de gauche montre le début de la transformation de l'austénite en mélange mécanique et la courbe de droite montre la fin de la transformation de l'austénite.

Le domaine situé à gauche de la courbe gauche détermine la durée d'incubation dans l'intervalle de température et de temps déterminés, pendant lesquels la transformation ne se produit pas, (l'austénite est à l'état surfusionné et ne se décompose pas). C'est la période d'incubation qui caractérise la stabilité de l'austénite surfusionnée. Quand l'acier est surfusionné à un petit degré, le nombre de germes est petit et le temps d'incubation est grand. Au fur et à mesure de l'augmentation du degré de surfusion, le nombre de germes augmentent et le temps d'incubation diminue.

L'abaissement de la température provoque une diminution de la vitesse de diffusion et la stabilité de l'austénite augmente au dessous de 555°C, la limite supérieure du diagramme TTT est donnée par le point A₁ aux environs de 720°C et la limite inférieure par le point de martensite MS = 180°C. A droite de la courbe de droite sont données les différentes structures à obtenir et entre les deux courbes (partie hachurée) la transformation de l'austénite est saisie.

La ligne qui représente la précipitation de la cémentite secondaire sur le diagramme TTT existe seulement pour les aciers hypereutectoïdes. Pour un acier hypoeutectoïde, elle n'existe pas, mais il possède une ligne correspondant à la précipitation de la ferrite prééuteutoïde, suivant le degré de surfusion de l'austénite.

Dans le diagramme TTT existe trois domaines de températures ou zones de transformation :

- Domaine perlitique (au dessus de 550°C).
- Domaine bainitique (intermédiaire) entre 550 et 200°C.
- Domaine martensitique au dessous de 200°C.

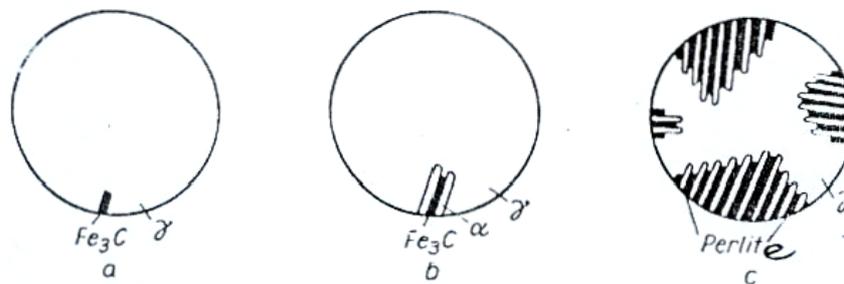
Un acier porté à une température supérieure à A₃ devient austénitique et par refroidissement à une vitesse suffisante, on obtient de la martensite qui correspond au maximum de dureté.

Si le bain de refroidissement est à une température supérieure à A_r'' tout en conservant un pouvoir refroidisseur suffisant, on aura l'austénite mais pas de martensite. Si la température maintenue constante est proche de A_r'' tout en lui étant supérieure, l'austénite, au bout d'un temps qui peut varier de quelques heures à quelques jours se transforme en un constituant nouveau appelé bainite, qui semble correspondre à une disposition particulière de ferrite et de cémentite, ce constituant confère au métal une dureté presque aussi élevée que celle de la martensite et une ténacité plus grande.

Enfin si cette température est maintenue pendant un temps assez court (quelques minutes), l'austénite donne au refroidissement de la martensite, mais en raison de l'homogénéisation température réalisée pendant l'arrêt momentané du refroidissement, les risques de tapures sont écartés et les refroidissements sont réduits

5.2.1. Transformation perlitique

Pour des températures de transformation entre 720°C et 450°C (phase perlitique), débute la transformation par la formation des premiers germes de cémentite sur les joints des cristaux de l'austénite, ces germes se développent à l'intérieur des cristaux γ et le voisinage des cristaux de cémentite s'appauvrit en carbone et se fustige en ferrite α . La solubilité du carbone dans la ferrite est très faible, ce qui conduit à la précipitation du carbone se trouvant dans la ferrite dans le domaine de l'austénite voisin et ce qui donne la formation de la perlite ($\text{Fe}\alpha + \text{cémentite}$). La figure 130 donne les différentes étapes de la formation de la perlite (transformation austénite en perlite).



(fig.130)

La transformation perlite a le caractère de diffusion, à première étape, elle est caractérisée par l'apparition des germes de cémentite sur les joints des grains de l'austénite. La deuxième étape montre le développement des germes de la cémentite tout en provoquant l'appauvrissement des places voisines en carbone et en se transformant en ferrite et enfin la troisième étape c'est la formation de la perlite.

Une petite surfusion donne un petit nombre de germes de cémentite avec des lamelles épaisses, mais quand la vitesse est assez considérable, c'est à dire le degré de surfusion est élevé, dans ce cas le nombre de grains est plus grand et les lamelles de la perlite sont plus fines c'est à dire on a le constituant Sorbite ou Troostite.

La perlite, la sorbite et la troostite se distinguent l'une de l'autre par l'épaisseur des lamelles. Dans la perlite, leur dureté est aussi différente :

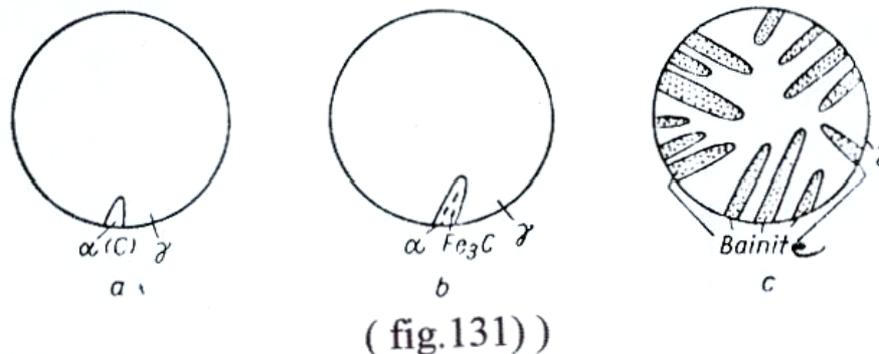
- Perlite : HB 200.
- Sorbite : HB 300.
- Troostite : HB 400.

La sorbite et la troostite sont des perlites très fines obtenues par vitesses de refroidissement assez importantes. La distance entre les lamelles est déterminée par la vitesse de diffusion du carbone dans l'austénite. Cette distance diminue avec l'augmentation de la température, ce qui conduit à l'obtention de lamelles épaisses (faible dureté).

5.2.2. Transformation intermédiaire (bainitique)

Comme pour la transformation perlitique, l'austénite se décompose en deux phases par diffusion, mais cette diffusion ne se produit pas jusqu'à la fin et la phase de la ferrite, dans ce cas, elle représente une solution solide de carbone dans le fer α , mais elle est sursaturée lors de la transformation bainitique. On peut arriver au fait qu'il reste une quantité de l'austénite résiduelle, qui peut se transformer en martensite lors d'un refroidissement ultérieur.

Pour des surfusion très élevées, entre 400°C et le point Ms (transformation bainitique) se forme la bainite à partir de l'austénite. Les températures très basses empêchent la diffusion du carbone dans l'austénite (elle est pratiquement arrêtée), le début de la décomposition se ralentit et la durée de la transformation augmente. La représentation schématique de la formation de la bainite (transformation austénite bainite) est donnée par la figure 131.



A partir des joints des grains de l'austénite se forment les cristaux sursaturés de ferrite dans le carbone, lesquels se développent au fur et à mesure. Le carbone se précipite sous forme de cristaux de cémentite lamellaire ou globulaire car la vitesse de diffusion du carbone dans la ferrite est grande par rapport à celle de l'austénite. Plus la température de formation de la bainite est basse, plus la vitesse de diffusion du carbone dans le réseau α est petite et les cristaux de cémentite dans la ferrite deviennent fins.

Donc la bainite est comme la perlite, elle se compose de ferrite et de cémentite, mais elle ne se forme pas directement à partir de l'austénite, mais suivant presque la même transformation que celle de la martensite, elle possède une dureté assez élevée. Le carbide formé dans la bainite supérieure possède de gros grains par rapport à celui formé dans la

bainite inférieure. La bainite supérieure est moins dure malgré sa formation à la température basse.

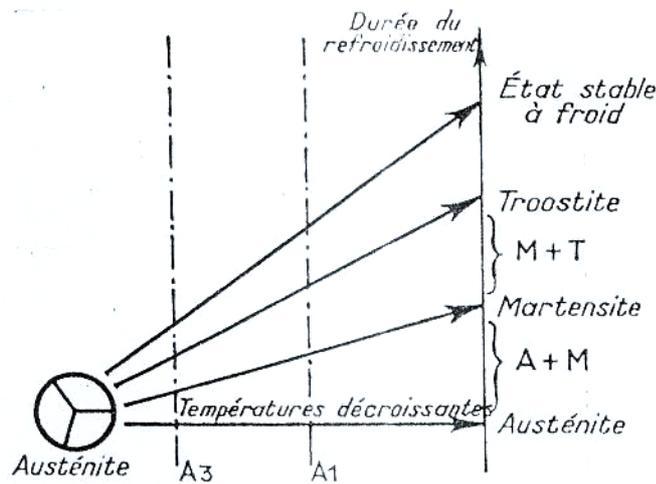
5.2.3. Transformation martensitique

C'est au dessous d'une température d'environ 180°C que se forme la cémentite à partir de l'austénite surfusionnée. Lorsque la température de l'austénite surfusionnée diminue jusqu'à environ T 180°C, ou même plus bas, le processus de diffusion est complètement arrêté et une transformation sans diffusion se produit, elle est appelée transformation martensitique.

La martensite est une solution solide de carbone dans le fer α mais très saturée, son réseau cristallin est très distorsé (déformé). La transformation martensitique se produit sans déplacement des atomes de carbone, seulement les atomes de fer qui se déplacent à une distance plus petite que la distance inter-atomique, cette transformation se produit très vite. Les points de début et fin de transformation dépendent du pourcentage de carbone, avec l'augmentation du % C, les points M_f et M_s diminuent.

La martensite a une structure très dure, le phénomène de durcissement a un caractère physico-chimique avec le réseau cristallin du fer α très déformé par la présence des atomes de carbone ce qui explique son durcissement.

Pour des refroidissement continus, les diagrammes TTT ne correspondent plus à cette réalité, mais il existe d'autres types de diagramme appelés diagramme de surfusion. La figure 132 nous donne une idée de l'influence de la vitesse de refroidissement sur les différentes transformation de l'austénite.



(fig.132)

Quand la température du milieu de trempé est supérieure au point M_f , l'austénite ne se transforme pas complètement en martensite, d'habitude il y a une certaine quantité d'austénite résiduelle. Elle est instable et lors des basses températures elle peut donner la martensite. Cette transformation provoque des déformations plastiques, donc l'austénite résiduelle

dégrade les propriétés de la structure en diminuant la dureté (tenue à l'usure). Pour des températures $T < 100^{\circ}\text{C}$, la martensite et l'austénite sont très stables et on a plus de transformation de structure.

Pour des procédés techniques de traitement thermique important tels que recuit de normalisation, trempe etc., l'acier est refroidi continuellement à partir du domaine de l'austénite.

La trempe s'effectue soit dans l'eau, l'huile, dans un four ou à l'air, dans ce cas l'austénite ne se transforme pas à une certaine température constante. mais la transformation de cette dernière s'étend sur un intervalle de température, par la suite on obtient des aciers traités en même temps avec des structures différents. Par exemple : (martensite et bainite), (perlite à coté de la bainite) ou encore (perlite avec bainite et martensite).

5.3. Variation de la grosseur du grain d'austénite en fonction de la température

Lorsque la température est portée au dessus de A_1 , il se forme à l'interface de la ferrite--cémentite, des germes de l'austénite qui croissent jusqu'au moment où toute la structure se transforme dans l'austénite.

En élevant la température ou en prolongeant la durée de séjour à la température donnée, on déclenche une cristallisation qui grossit le grain austénitique. Cette croissance est spontanée car le système a tendance à diminuer l'énergie libre en réduisant la surface des grains. Les gros grains se développent aux dépens des petits grains thermodynamiquement moins stable.

Les dimensions des grains formés lors du chauffage jusqu'à une température donnée ne changent naturellement pas au refroidissement ultérieur. L'aptitude du grain austénitique à la croissance varie suivant les conditions de fusion même pour les aciers de composition identique. Il existe deux types d'aciers qui dépendent des conditions de fusion.

a. Acier à grains fins par hérédité :

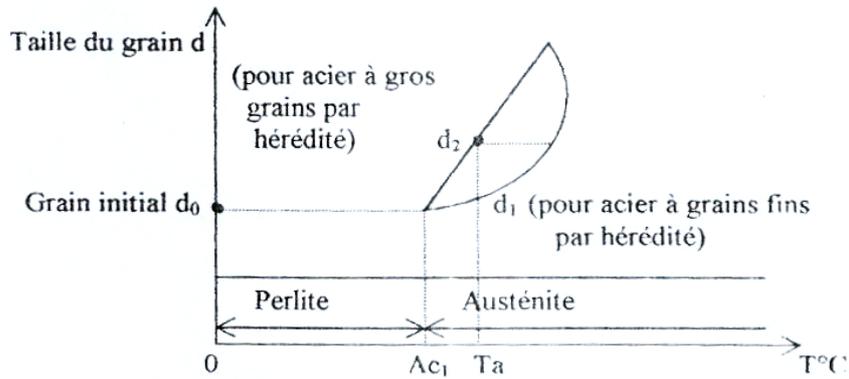
Dans lequel, même à la température poussée à 1000 ou 1050°C , la croissance du grain reste négligeable, mais si l'échauffement est encore plus poussé, il provoque un brusque grossissement du grain.

b. Acier à gros grains par hérédité :

Dans ce type d'acier, c'est l'inverse, un fort développement du grain s'observe même lorsque l'échauffement dépasse A_1 , d'une valeur négligeable.

Cette aptitude de différence à la croissance du grain est déterminée par le caractère de la désoxydation et par la composition de l'acier.

La figure 133 montre la croissance des grains d'austénite par hérédité à une température de maintien T_a .

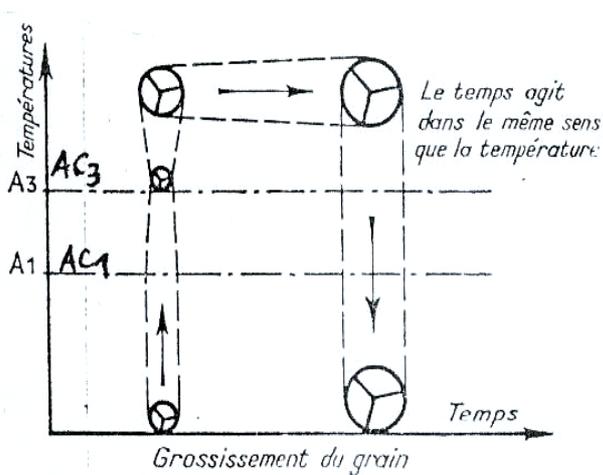


(fig.133)

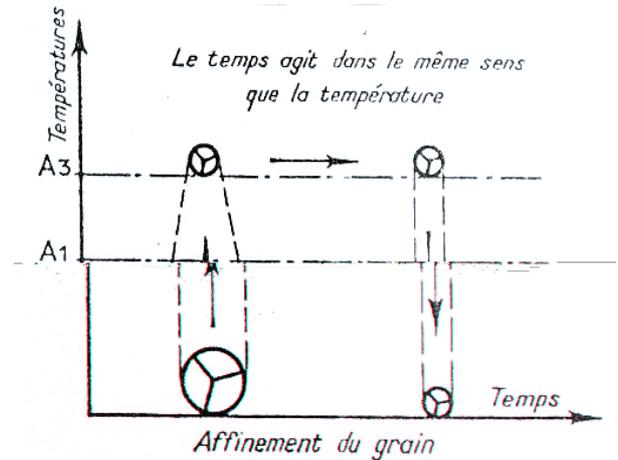
Les aciers désoxydés par l'aluminium sont à grains fins par hérédité, puisqu'ils sont le siège de formation de particules qui ralentissent la croissance du grain d'austénite. Dans les aciers hypereutectoïdes, l'intervalle de température $AC_1 - A_{cm}$ est celui où la croissance des grains d'austénite est ralentie par les particules de carbone B, les plages de ferrite dans les aciers hypoeutectoïdes exercent la même action dans l'intervalle de température $AC_1 - AC_3$.

Les éléments d'alliages surtout les éléments carborigènes qui ralentissent la cristallisation, freinent la croissance du grain austénitique, dans ce sens l'action la plus forte est exercée par Ti, V, Zr, Nb, W, Mo qui forment des carbures difficilement solubles dans l'austénite γ .

Le Mn et P contribuent à la croissance de grains austénitiques. Il convient de souligner que les termes aciers à gros grains ou à grains fins par hérédité ne signifient pas que l'acier considéré a toujours de grains gros ou fins. Lorsqu'à une température donnée, un acier à grains fins par hérédité peut même avoir un grain d'austénite plus gros qu'un acier à gros grains par hérédité. Les figures 134 et 135 indiquent comment varie la grosseur du grain d'un acier porté à différentes températures et elles indiquent respectivement le grossissement du grain et l'affinement du grain.



(fig. 134)



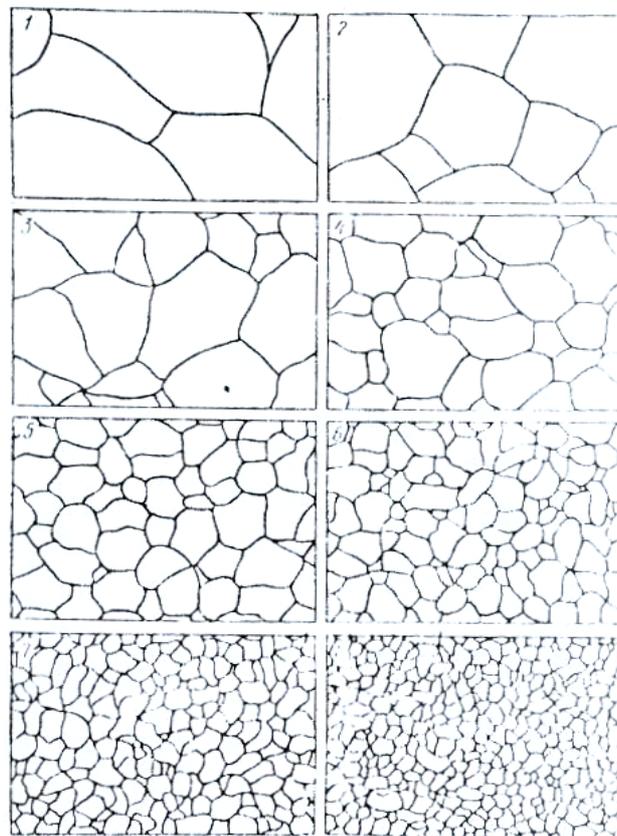
(fig. 135)

Sur la figure 134, entre AC_1 et AC_3 , les grains se divisent. de grains plus petits et en plus grands nombre se forme le phénomène qui sera au maximum à la température AC_3 . Au dessus de AC_3 , le phénomène inverse se produit, le grain grossit en fonction de la température atteinte et la durée de maintien de cette température.

Au refroidissement, le grain se stabilise, tel qu'il se présente au moment où le métal repasse par la température AC_3 , les dimensions des grains ne varient plus quelque soit la vitesse de refroidissement.

Sur la figure 135, il s'agit du chauffage d'un acier avec gros grains au départ, son passage à travers le domaine AC_4 et AC_3 puis le maintien pendant un temps diffusant à la température AC_3 permettra de rétablir un grain fin.

Il existe un tableau de granularité des aciers qui permet d'identifier la taille moyenne des grains à l'aide d'un numéro allant de 1 jusqu'à 8 et donc de départager les structures à gros grains et à grains fins (fig. 136).



Echelle de granularité de l'acier.
 Les chiffres indiquent le n° du point du grain. x 100
 (réduction de 3/5 à l'impression)

(fig. 136)

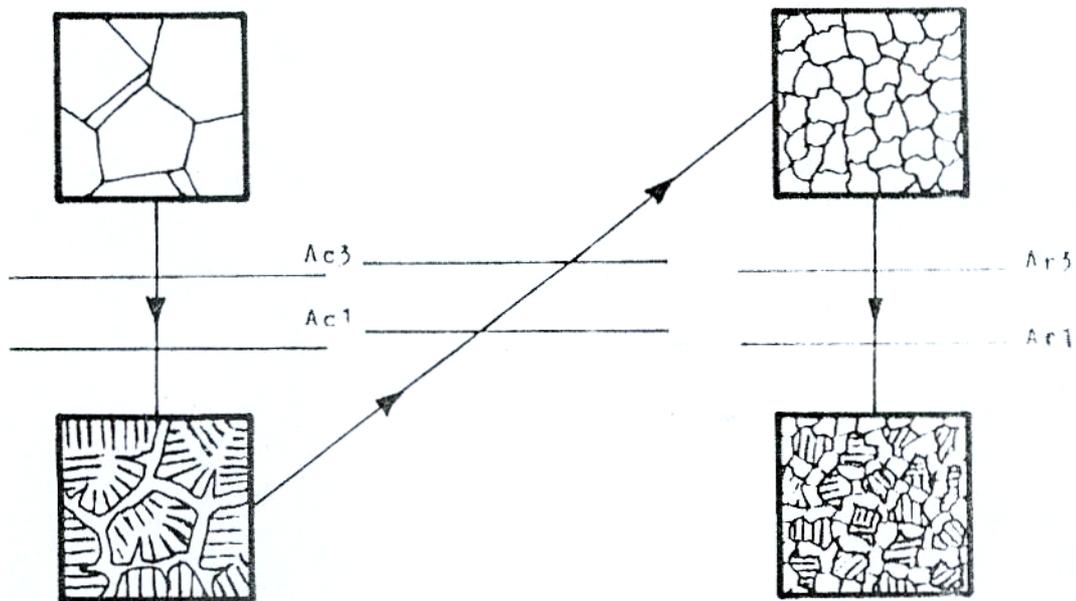
Donc la grosseur du grain d'austénite réel est déterminée par la température de chauffage, la durée de séjour à cette température et l'aptitude de l'acier à la croissance. du grain pendant l'échauffement. Un acier est dit "surchauffé" lorsque son échauffement jusqu'à

une température nettement supérieure à AC3, ou AC4, reste prolongé, ceci conduit à un grossissement du grain austénite aussi bien à cette température de maintien, qu'après refroidissement à la température ambiante.

La surchauffe peut être corrigée par un traitement thermique d'affinage structural (fig. 137). Il est préférable d'éviter les surchauffes de l'acier en raison d'une éventuelle décarburation superficielle qui se produit.

Un acier est dit "brûlé" lorsque la température de chauffage est plus poussée et l'atmosphère est oxydante. La brûlure est un défaut irréparable à cause de la formation des oxydes de fer aux joints de grains.

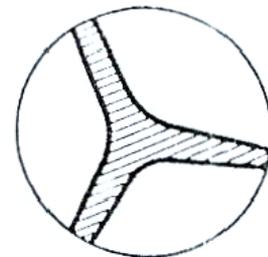
D'une manière générale l'influence de la grosseur du grain sur les propriétés mécaniques à peu d'importance, sauf sur la résilience qui chute notablement surtout dans le cas d'une dureté élevée et le seuil de fragilité à froid qui s'élève. Plus le grain est gros, plus l'acier est apte aux tapures et aux déformations de trempe.



(fig. 137)

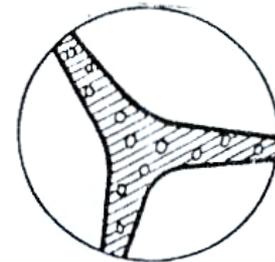
Les différents cas de brûlures sont représentés sur les figures 138, 139 et 140.

1. Fusion partielle : le carbure accumulé entre les grains donne un alliage plus fusible. Peut être corrigé par traitement thermique .



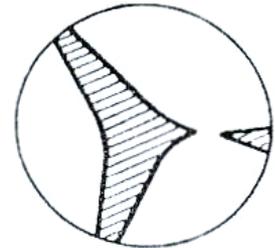
(fig. 138)

2. Dégagement de gaz : formation de bulles. Peut être corrigé par forgeage .



(fig. 139)

3. Pénétration d'air qui oxyde le métal : formation d'étincelles. Pas de remède



(fig. 140)

5.4. Gammes des traitements thermiques de l'acier

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont :

- Le recuit.
- La normalisation.
- La trempe.
- Le revenu et le vieillissement.

Les principaux facteurs qui permettent de distinguer entre les différents types de traitements thermiques sont la température de maintien et la vitesse de refroidissement.

5.4.1. Le recuit

Les aciers possèdent un caractère apte d'acquérir grâce à des traitements thermiques variés, toute une gamme de propriétés très différentes. Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Ils tendent à réaliser l'équilibre structural en faisant disparaître les états hors d'équilibre résultants des traitements thermiques et mécaniques antérieurs.

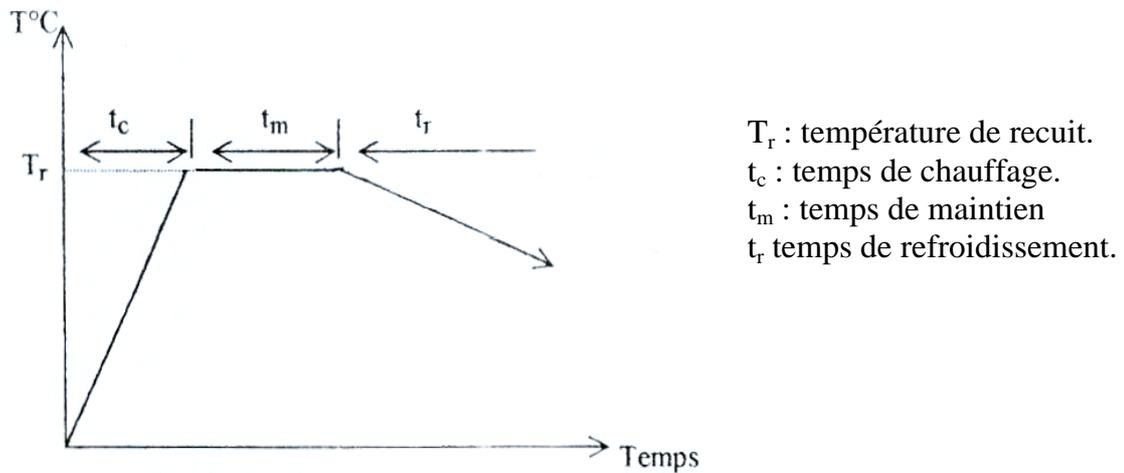
Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité. (résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). Le recuit a pour but de :

- Diminuer la dureté d'un acier trempé.

- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- Homogénéiser les textures hétérogènes.
- Réduire les contraintes internes

Le cycle thermique d'un recuit comprend :

- Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de recuit à réaliser.
- Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- Un refroidissement très lent généralement à l'air calme. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit, voir (fig.141).



(fig. 141)

5.4.1.1. Recuits du premier genre

Suivant l'état initial de l'acier et la température de recuit. on distingue dans ce type de recuit trois types :

- Recuit d'homogénéisation (recuit de diffusion).
- Recuit de recristallisation.
- Recuit de détente (stabilisation).

Cette forme de recuit présente la particularité que ces processus marchent indépendamment des transformations de phase qui peuvent avoir lieu ou ne pas se produire dans les alliages.

C'est pourquoi le recuit de premier genre peut être effectué aussi bien aux températures supérieures qu'inférieures à celles des transformations de phase. Suivant les conditions thermiques de sa réalisation, ce traitement permet d'éliminer l'hétérogénéité chimique et physique produite par les traitements ultérieurs.

5.4.1.2. Recuit d'homogénéisation (diffusion)

Ce type de recuit s'applique aux aciers bruts de coulée et aux aciers moulés dans le but d'affaiblir ou éliminer la ségrégation dendritique ou inter-cristalline (lors de la solidification de l'acier, les éléments d'alliage ou le carbone sont repartis d'une façon hétérogène à l'échelle du grain austénitique), c'est à dire, il y a une différence de concentration de ces éléments qui se présentent dans la structure. La ségrégation renforce la susceptibilité à l'anisotropie des propriétés et aux défauts tels que cassures, stratifiés et flocons (fissures fins internes observées dans une cassure sous forme de taches ovales blanches). La ségrégation diminue la plasticité et la ductilité d'un acier allié. C'est pourquoi non seulement les lingots, mais aussi les grosses pièces moulées sont assez souvent soumis à l'homogénéisation.

L'élimination ou l'affaiblissement de ce défaut est possible seulement lors du chauffage poussé 1100 à 1200°C, sans toutefois atteindre le domaine de surchauffe du métal qui provoque un grossissement indésirable du grain. Donc ce n'est qu'à ces températures que peut être assurée la diffusion la plus complète, nécessaire pour le nivellement de la composition des valeurs d'acier isolés. La diffusion provoque l'échauffement des places des atomes dans la structure, ce qui amène à l'égalisation de la concentration sur tous le volume de l'acier, car plus la température du lingot est élevée, plus la mobilité des atomes est grande, ce qui facilite la diffusion.

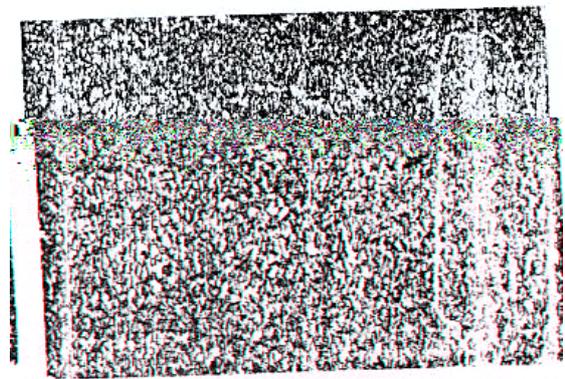
La durée générale de recuit de diffusion (chauffage), séjour et refroidissement lent) de grosses pièces varie de 50 à 100 heures et plus. Suivant la composition de l'acier, le poids de la charge, le séjour dure de 8 à 20 heures.

Pour réduire la durée du processus et la consommation d'énergie, les lingots sont chargés dans le four juste après la coulée quand ils sont chauds. Les températures atteintes lors du recuit d'homogénéisation provoquent parfois une surchauffe, ce qui rend les grains gros. Pour affiner les grains et améliorer les propriétés, ce type de recuit est le plus souvent suivi d'un recuit complet ou la normalisation.

Les figures 142 et 143 présentent respectivement l'état de structure d'un acier avant l'homogénéisation (répartition non uniforme du carbide) et après homogénéisation répartition uniforme du carbide).

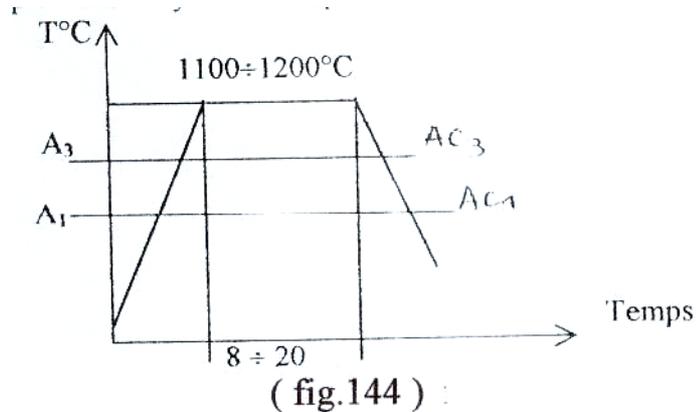


(fig. 142)



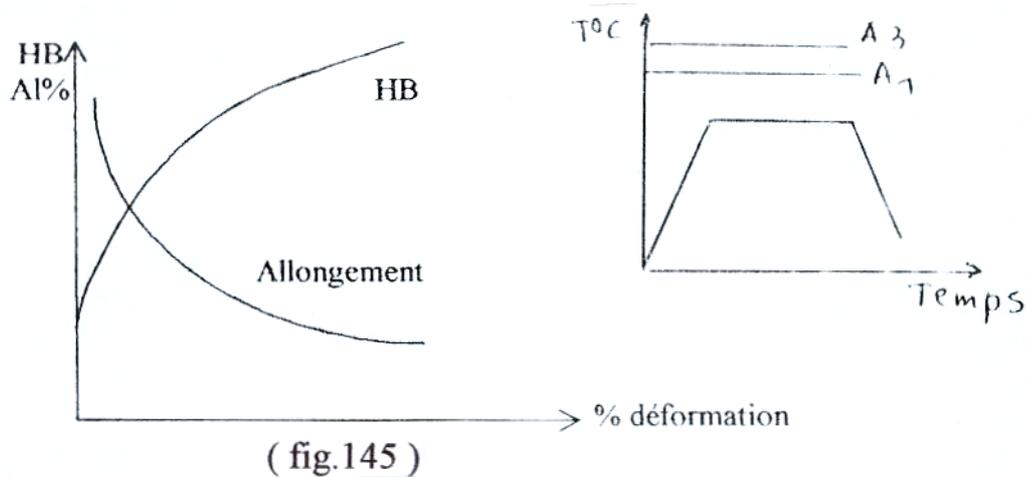
(fig. 143)

La figure 144 représente le cycle thermique d'un recuit d'homogénéisation.



5.4.1.3. Recuit de recristallisation

Pendant la déformation plastique à froid, le métal subit un écrouissage, c'est à dire, la dureté et la résistance du métal augmentent et sa plasticité diminue (fig. 145). Ce qui rend difficile le travail du matériel par déformation. Dans la structure du métal, la déformation à froid provoque les lignes de glissement, étirage des grains, désintégration des différents types de cristaux fragiles tels que la cémentite lamellaire de la perlite et les impuretés de la scorie.



Par l'intermédiaire du recuit de recristallisation à une température supérieure, à la température de recristallisation, l'état de contrainte est éliminé et l'acier acquiert sa plasticité et ductilité grâce à la formation de nouveaux cristaux. La température de recristallisation n'est pas une constante matérielle, mais elle dépend de plusieurs facteurs. Les facteurs les plus influant sont la teneur en éléments d'alliages et le degré de déformation.

La température de recristallisation diminue avec l'augmentation du degré de déformation et de la teneur en éléments d'alliages. Pour les aciers non alliés, la température de recristallisation est de 450 à 600°C et de 600 à 800°C pour les aciers faiblement et fortement alliés.

Dans les cas des aciers (0,08 à 0,2 %C), les plus utilisés dans le travail à froid, la température de recuit est de 680 à 700°C.

Le recuit de recristallisation d'un acier ayant subi une déformation plastique avec un degré de déformation critique, donne une structure à gros grains. Ce type de structure est très utilisé en électrotechnique pour la fabrication des tôles de dynamos et de transformateurs.

5.4.1.4. Recuit de détente (ou de stabilisation, ou de relaxation) :

Cette forme de recuit est appliquée aux pièces moulées, usinées et soudées dans lesquelles les gammes de fabrication précédentes, dues au refroidissement irrégulier, donne une déformation plastique à froid aux différentes transformation.

Donc cette forme de recuit est destinée à supprimer ou diminuer les contraintes résiduelles qui peuvent se diviser en trois types :

- Contraintes du premier genre :

Elles peuvent se propager dans de grands espaces de la pièce.

- Contraintes du deuxième genre :

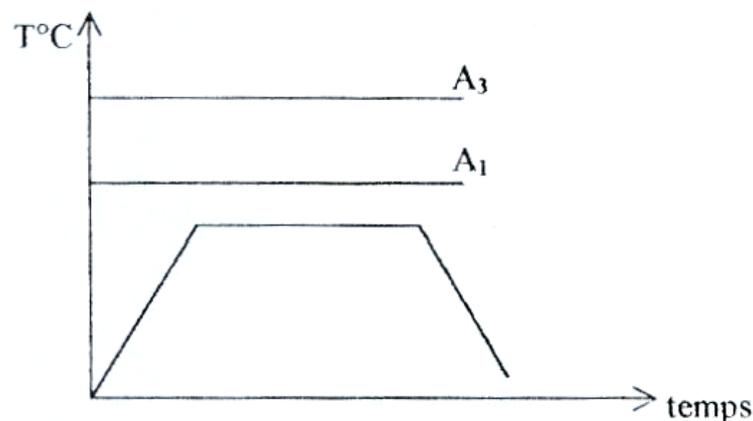
Elles peuvent s'étendre sur des dimensions microscopiques.

- Contraintes du troisième genre :

Elles peuvent s'étendre sur les dimension atomiques

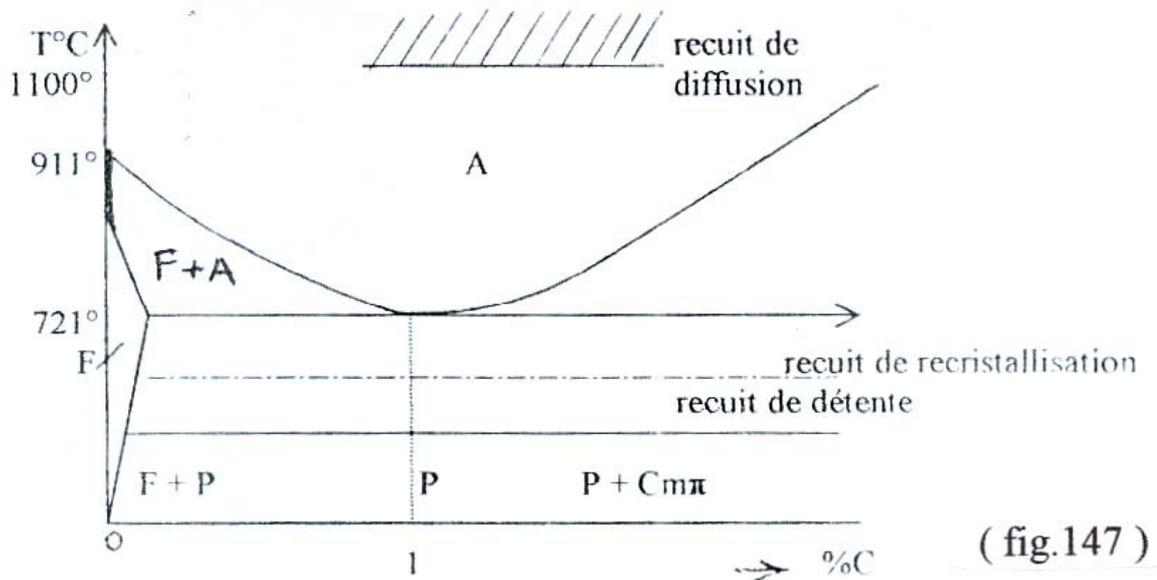
La température de ce recuit est choisie entre 350 à 650°C et s'effectue pendant quelques heures et suivie d'un refroidissement lent. Les contraintes résiduelles sont également supprimées par d'autres formes de recuits.

Par exemple, le recuit de recristallisation avec recristallisation de phase, ainsi que par le revenu, surtout par le revenu à haute température, de l'acier trempé. La figure 146 représente le cycle thermique d'un tel recuit.



(fig.146) :

La figure 147 représente le domaine de température des différents recuits du premier genre.



5.4.1.5. Recuits du deuxième genre

Le cycle thermique de ce recuit est le chauffage de l'acier aux températures supérieures à AC_3 ou AC_1 , le maintien à cette température et le refroidissement lent. Les transformations de phases accompagnant ce recuit permettent d'obtenir pratiquement un état d'équilibre structural.

Par conséquent, le recuit d'un acier au carbone produit les structures données par le diagramme fer-cémentite, pour les aciers hypoeutectoïdes (perlite + ferrite) pour les aciers eutectoïdes (perlite) et pour les aciers hypereutectoïdes (perlite - cémentite II).

Un acier recuit possède une faible dureté et une basse résistance mais sa plasticité est très élevée. La recristallisation de phase due au recuit affine les grains et élimine les structures défavorables.

Dans la plupart des cas industriels, le recuit est un traitement thermique préalable. Il est appliqué aux pièces moulées, forgées, laminées. En diminuant la résistance à la dureté, le recuit améliore l'usinabilité des aciers à haut et à moyen carbone.

En affinant les grains, en supprimant les contraintes internes, et uniformisant l'homogénéité structurale, le recuit contribue à l'amélioration de la plasticité et de la ductilité par rapport aux propriétés produites par le moulage, forgeage et laminage. Dans certains cas, par exemple, celui de nombreuses pièces de fonderie, le recuit est un traitement thermique terminal, du fait que dans ces conditions, les contraintes résiduelles n'existent pratiquement pas et la déformation qu'elles peuvent produire est minimale. Les modalités de cette forme de recuit sont le recuit complet, isotherme et incomplet, celui d'adoucissement etc.

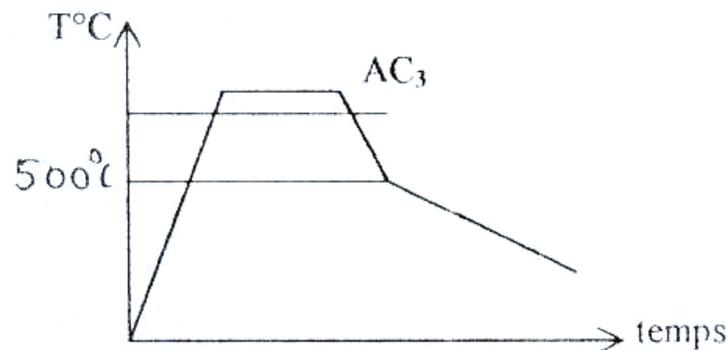
5.4.1.6. Le recuit complet

Il est destiné pour les aciers hypoeutectoïdes, qui sont chauffés jusqu'à une température $AC_3 + (30 \text{ à } 50^\circ\text{C})$ et maintenu à cette température jusqu'au chauffage complet et achèvement des transformations de phases dans le volume du métal et le refroidir lentement. Le refroidissement s'effectue lentement dans le four jusqu'à la température de 500°C ensuite à l'air.

Cette forme de recuit entraîne une recristallisation de phase complète. Le chauffage jusqu'à une température supérieure à $(30 \text{ à } 50^\circ\text{C})$ au point AC_3 déclenche la formation de l'austénite caractérisée par un grain fin qui définit la constitution après refroidissement d'une structure à grain fin permettant d'obtenir une ductilité et une plasticité élevée et assurant après traitement thermique définitif de très bonnes propriétés.

Un chauffage qui dépasse nettement le point AC_3 déclenche la croissance du grain d'austénite et dégrade ainsi la qualité de l'acier. Le séjour peut varier de 0,5 à 1,0 heure par tonne de métal chauffé.

Le recuit complet est généralement appliqué aux pièces ayant subies des traitements mécaniques et thermiques variés aux (fer en barres, pièces forgées, moulage de forme), généralement pour supprimer les contraintes. La figure 148 représente le cycle thermique du recuit complet.



(fig. 148)

5.4.1.7. Recuit de régénération (affinage structural)

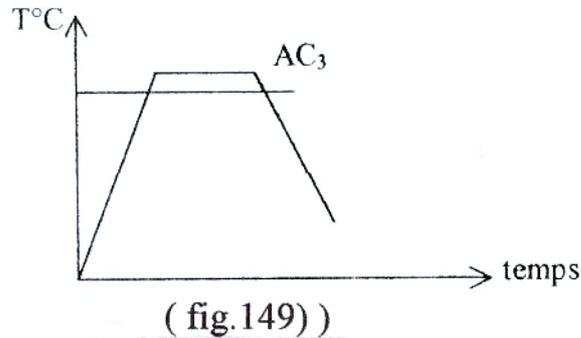
Ce type de recuit est appliqué aux pièces qui ont souvent des structures surchauffées telles que :

- Celles ayant subi un traitement d'homogénéisation par diffusion. Les pièces moulées.
- Les zones voisines des joints de soudures.
- Les pièces forgées à haute température etc.. .

Le recuit de régénération comprend :

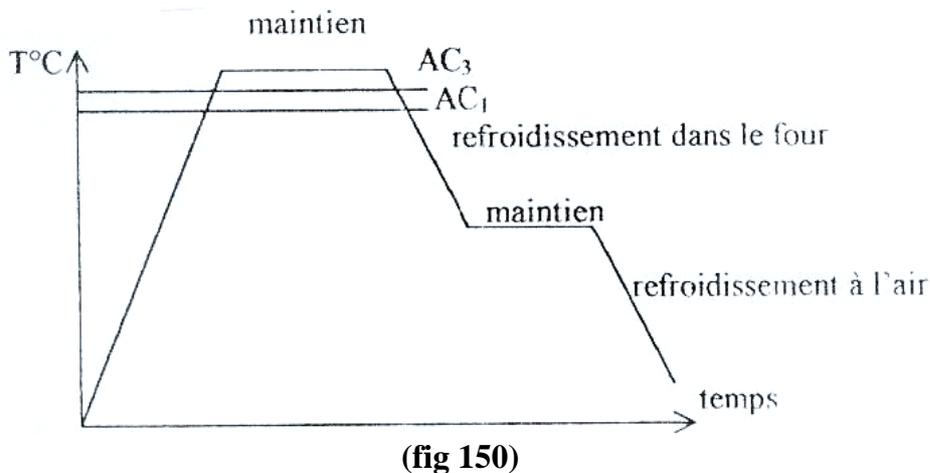
- Un chauffage sans maintien prolongé à une température légèrement supérieure à AC_3 de manière à obtenir une austénite à grains fins.

- Un refroidissement à une vitesse convenable conduisant à une structure ferrito-perlitique fine (cas des aciers hypoeutectoïdes). Le cycle thermique d'un tel recuit est représenté sur la figure 149.



5.4.1.8. Recuit isotherme

L'acier est chauffé, de même que pour le recuit complet ($AC_3 + 50^\circ C$) et refroidi relativement vite (en général par le transfert dans un autre four) jusqu'à une température plus basse que A_1 (de 100 à $150^\circ C$) généralement en fonction de l'allure de la courbe de transformation isotherme de l'austénite. A cette température, on effectue un maintien isotherme, nécessaire pour assurer la décomposition complète de l'austénite, suivie d'un refroidissement à l'air (fig. 150).



L'avantage que présente le recuit isotherme consiste dans la diminution de la durée du processus, surtout dans le cas des aciers alliés, qu'il faut refroidir très lentement pour assurer la réduction nécessaire de la dureté. Le recuit est accéléré en choisissant la température du séjour isotherme au voisinage de la température de stabilité minimale de l'austénite surfusionnée dans le domaine perlitique.

Un autre avantage de recuit isotherme est l'obtention d'une structure plus homogène, le séjour isotherme régularisant la température suivant la section de la pièce et la transformation marchant dans le volume tout entier avec le même degré de surfusion.

Le recuit isotherme améliore l'usinabilité, le fini de la surface et diminue les déformations produites par la trempe ultérieure. Ce traitement thermique s'emploie pour les pièces forgées et autres ébauches de petites dimensions. Dans le cas de grosses charges (20 à 30 t et plus), le refroidissement rapide et régulier jusqu'à la température du séjour isotherme est impossible. Dans les divers volumes de la charge, la transformation se produit aux températures différentes, ce qui rend irrégulières la structure et la dureté au sein de la même charge. C'est ce qui fait que dans les cas courants, pour de telles charges, le recuit isotherme ne s'emploie pas.

5.4.1.9. Recuit incomplet (ou coalescence, ou globulisation, ou sphéroïdisation)

Il se distingue du recuit complet par le fait que l'acier est porté à une température plus basse, un peu supérieure à AC_1 (650 à 680°C) suivi d'un refroidissement lent d'environ 10°C/h.

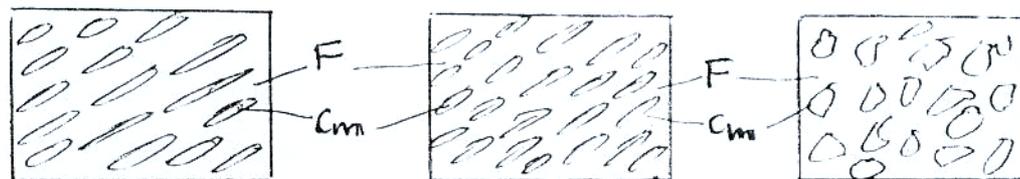
Ce traitement est utilisé pour améliorer l'aptitude à la déformation à froid de l'acier (filage par exemple) et où on cherche en général à obtenir une structure globalisée de la cémentite. Il a pour but aussi d'améliorer l'usinabilité des aciers en rendant possible l'application de grandes vitesses de coupe et en assurant un très bon état de surface.

Pour les aciers hypoeutectoïdes, le recuit incomplet améliore l'usinabilité en réduisant la dureté et la susceptibilité à la déformation à froid. Pour les aciers hypereutectoïdes le recuit incomplet remplace généralement le recuit complet, qui assure et contribue à la transformation de la perlite lamellaire en perlite globulaire.

Pour réaliser la sphéroïdisation, le refroidissement doit être lent. Il doit assurer (jusqu'à 620 à 680°C) la décomposition de l'austénite et la formation d'une structure ferrite-carbure ainsi que la sphéroïdisation et la coalescence des carbures ainsi formés. Le maintien à une température constante nécessaire pour la décomposition de l'austénite surfusionnée et la coalescence des carbures est de 1 à 3 h, en fonction de la masse du métal à recuire.

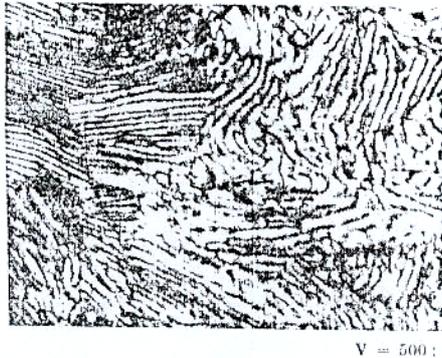
Les valeurs de la dureté et de la charge de rupture d'un acier à perlite globulaire sont plus faibles, alors que celles de l'allongement et de la striction sont plus élevées. La dureté d'un acier eutectoïde à perlite lamellaire est HB 228 et celle d'une perlite globulaire HB 163, la charge de rupture est respectivement 82 et 63 Kgt/mm² et l'allongement 15 à 20 %.

Donc comme il a été déjà mentionné, le recuit à perlite globulaire améliore l'usinabilité des aciers eutectoïdes et hypereutectoïdes, c'est à dire, rend possible l'application de grandes vitesses de coupe tout en assurant un très bon fini. La figure 151 montre le processus schématique de globulisation de la cémentite à partir d'une perlite lamellaire.



(fig.151)

Les figures 152 et 153 montrent respectivement un acier avec 0,9 % C normalisé présentant une structure de perlite lamellaire et le même acier après recuit à 700°C pour un maintien de 10 heures présentant une structure à perlite globulaire.

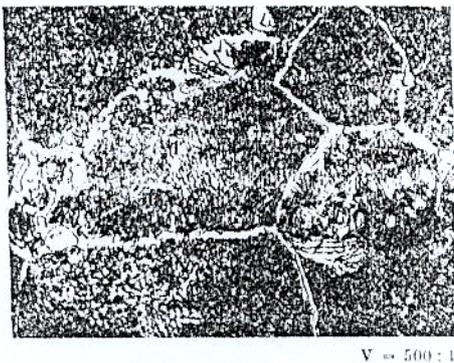


(fig.152)

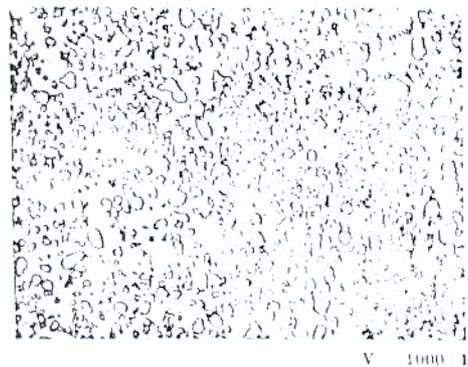


(fig.153)

De même, les figures 154 et 155 présentent respectivement un acier avec 1,2 % C avec une structure de perlite et de cémentite dans les joints de grains et le même acier après recuit présentant une structure à cémentite globulaire de grosseur non uniforme.



(fig.154)



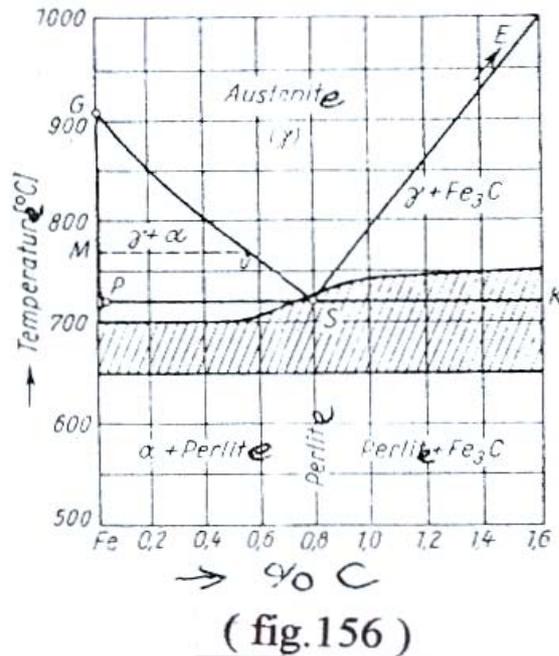
(fig.155)

5.4.1.10. Recuit d'adoucissement

Ce type de recuit consiste au chauffage de longue durée de l'acier aux températures près de AC_1 (650 -680°C) suivi d'un refroidissement lent d'environ 10°C/h. pour les aciers à carbone, la température de chauffage étant de 650 à 750°C (fig. 156).

Pour le domaine de phase $\gamma + Fe_3C$, si on refroidit lentement à partir de la température un peu plus supérieure à AC_1 , au point AR_1 , se cristallise le carbide précipité directement en grains globulaires, ce qui détourne la formation de la perlite lamellaire.

Le but du recuit d'adoucissement est de donner à l'acier une structure convenable à la trempe et de la transférer à un état usinable et ductile. Après le forgeage et la normalisation la structure des aciers à carbone est perlitique.



Les aciers à perlite lamellaire possèdent de mauvaises caractéristiques d'usinabilité car lors de la déformation plastique à froid les lamelles de cémentite se brisent, ce qui donne à l'acier des fissures. Par l'intermédiaire d'un long séjour à des températures au dessous de AC_1 , les lamelles de cémentite se transforment en cémentite globulaire.

5.4.2. La normalisation

C'est un traitement thermique qui consiste à :

- Un chauffage de l'acier hypoeutectoïde à $(AC_3 + 50^\circ C)$.
- Un chauffage de l'acier hypereutectoïde à $(A_{cm} + 50^\circ C)$.

C'est à dire un chauffage jusqu'au domaine austénitique :

- Un maintien (assez court) à cette température jusqu'à son échauffement complet.
- Un refroidissement à l'air libre.

La normalisation provoque la recristallisation aussi de l'acier et affine donc la structure à gros grains obtenue par coulée ou laminage (forgeage estampage). Ce traitement s'emploie largement en remplacement de la trempe et du revenu pour améliorer les propriétés des pièces moulées en acier.

Un refroidissement accéléré à l'air conduit à la décomposition de l'austénite aux températures plus basses et augmente ainsi la dispersion de la structure ferrite-cémentite ainsi que la quantité de la perlite ou plus précisément, de quasi eutectoïde du type sorbite ou troostite. Ceci augmente de 10 à 15 % la résistance et la dureté de l'acier normalisé à haut et moyen carbone par rapport à l'acier recuit. Le but de la normalisation varie en fonction de la composition de l'acier.

Pour les aciers à bas carbone, la normalisation étant une opération bien plus simple, elle s'emploie au lieu du recuit en augmentant quelque peu la dureté. La normalisation assure en coupe un meilleur état de surface.

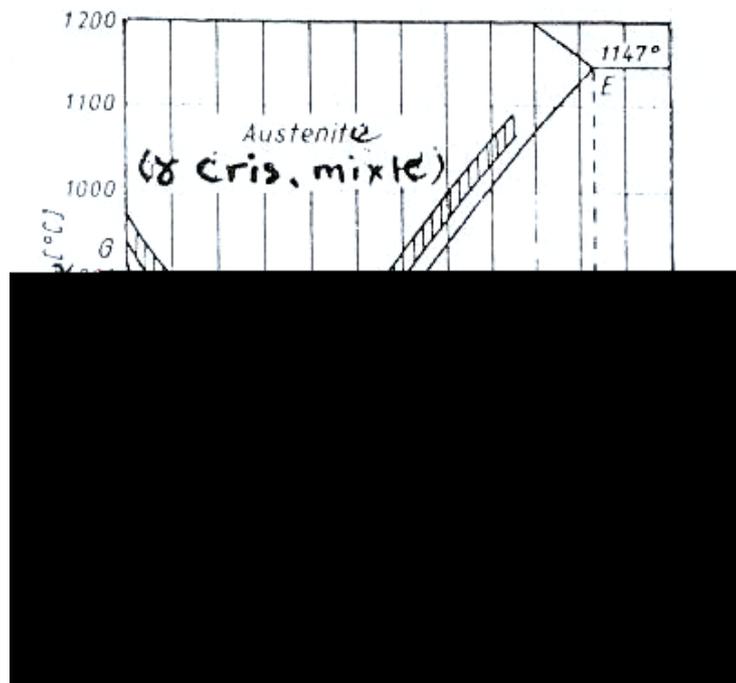
Pour un acier à teneur moyenne en carbone, la normalisation remplace la trempe et le revenu à haute température. Les propriétés mécaniques obtenues sont plus faibles, mais l'opération produit une déformation bien moindre que celle due à la trempe et la probabilité d'apparition des formes n'existe pratiquement pas.

Dans le cas d'un acier à haut carbone (hypereutectoïde), la normalisation est appliquée pour éliminer le réseau de cémentite qui peut apparaître lors d'un refroidissement lent dans l'intervalle de température entre AC_m , et A_1 .

La normalisation suivie de recuit d'adoucissement (600 à 650°C) est appliquée souvent au lieu du recuit complet pour corriger la structure des aciers alliés, la productivité de ces deux opérations étant plus élevée que celle du recuit tout seul. Donc la normalisation est destinée non seulement à la régénération d'un acier surchauffé (affinage du grain, homogénéisation de la structure), mais aussi à :

- Supprimer les effets de la trempe.
- Supprimer l'écrouissage et les tensions internes.

La figure 157 représente le domaine de température de la normalisation.



(fig. 157)

La température de normalisation est toujours supérieure à celle de la trempe qui la précède et le refroidissement doit être lent (à l'abri de l'air). Après la normalisation les aciers trempés retrouvent les caractéristiques qu'ils avaient avant la trempe.

5.4.3. La trempe

La trempe consiste à un chauffage de l'acier à une température de 30 à 50°C au dessus de la ligne GSK supérieure à celle de AC₃, pour les aciers hypoeutectoides et supérieure à AC₁, pour les aciers hypereutectoides.

A cette température l'acier est maintenu jusqu'à l'achèvement du chauffage complet c'est à dire jusqu'à la transformation des phases, ensuite l'acier subit un refroidissement rapide avec une vitesse supérieure à la vitesse critique de la trempe (pour les aciers au carbone le plus souvent dans l'eau et pour les aciers alliés dans l'huile ou dans un bain de trempe d'autre nature).

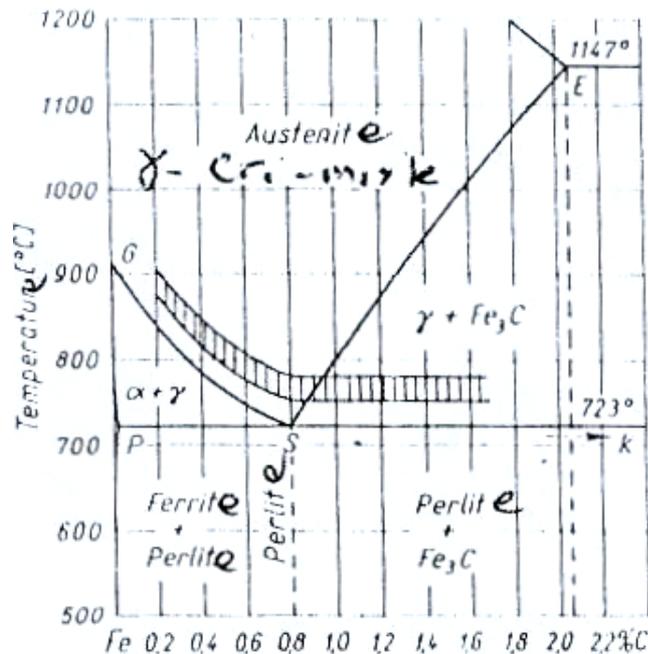
Le but du refroidissement rapide et d'obtenir une structure martensitique, donc éviter une transformation perlitique. La transformation de l'austénite doit commencer et se termine dans le domaine de la martensite.

Donc la trempe permet de donner un maximum de dureté à l'acier HV = 700 à 800 Kp/mm² ou HRC = 60 à 65, ce qui donne une structure convenable pour le traitement de revenu.

La trempe n'est pas un traitement thermique définitif, le plus souvent elle est suivie d'un revenu destiné à diminuer la fragilité et les contraintes internes afin de donner à l'acier les propriétés mécaniques appropriées.

5.4.3.1. Choix de la température d'austénisation

Les aciers hypoeutectoides doivent être chauffés de 30 à 50°C au dessus de AC₃.



(fig. 158)

Un acier à structure initiale (perlite + ferrite) acquiert, au bout d'un maintien dont la durée dépend de la nuance de l'acier et de ses dimensions une structure austénitique qui se transforme en martensite lorsqu'on refroidit à une vitesse plus grande que la vitesse critique de la trempe.

Un acier hypoeutectoïde chauffé dans l'intervalle AC_1 à AC_3 , garde après la trempe, en plus de la martensite, des plages de ferrite. La présence de ferrite diminue la dureté de l'acier après trempe et ses propriétés mécaniques après revenu. Aussi ce mode de trempe incomplète ne s'emploie pas généralement pour les aciers hypoeutectoïdes..

Les aciers hypereutectoïdes sont portés à $AC_1 + (50 \text{ à } 70^\circ\text{C})$, c'est la température à laquelle apparaît l'austénite, bien qu'une certaine quantité de cémentite secondaire reste encore. Il en résulte qu'après la trempe, la matrice martensitique compte des particules de cémentite non dissoutes lors du chauffage. Cette structure assure une dureté et une tenue à l'usure plus élevées.

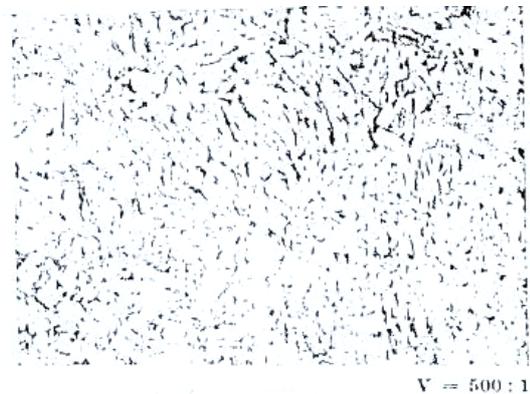
Pour de nouveaux aciers, la température d'austénitisation avant la trempe dépasse les limites mentionnées ci-dessus à cause de la faible dissolution des carbures contenant des éléments d'alliage. Dans ces cas, l'augmentation de la température d'austénitisation n'entraîne pas un grossissement perceptible du grain d'austénite car les carbures non dissous ralentissent la croissance du grain austénitique.

L'augmentation de la température de chauffe pour trempe (ou augmentation de séjour à cette température) entraîne la dissolution des carbures, le grossissement du grain et l'homogénéisation de l'austénite. L'austénite surfusionnée se trouve aussi stabilisée surtout dans l'intervalle de température de la transformation perlitique, la vitesse critique de trempe diminue et la pénétration de trempe de l'acier s'améliore. La martensite obtenue à partir de ces conditions de trempe à la forme d'aiguilles fines et relativement ductile.

La figure 159, ci-dessous, représente la structure de martensite d'un acier à 0,86 % C chauffé à 760°C et refroidi dans l'eau, la martensite à structure à aiguilles fines est difficile à reconnaître. Ce même acier est chauffé à des températures encore supérieures 1000°C (surchauffé), on aura un développement rapide des cristaux d'austénite, ce qui donne après refroidissement une martensite à structure d'aiguilles mais plus épaisses (fig. 160).



(fig.159)



(fig.160)

Ce type de martensite est sensiblement fragile que le premier type à aiguilles fines et il est préférable d'éviter la structure à aiguilles épaisses durant le traitement thermique.

La surchauffe durant la trempe produit une grande quantité du reste d'austénite et avec l'augmentation de la température la quantité d'austénite augmente effectivement, ce qui provoque une diminution de la dureté de l'acier (surtrempé).

Sur le tableau ci-dessous on peut remarquer que la dureté HV d'un acier à 0,86 % C est croissante avec l'augmentation de la température, mais à partir des températures de surchauffe, d'environ 950°C, HV diminue.

Température de trempe en °C	750	800	850	900	950	1000	1100	1200
HV	740	790	810	800	750	650	425	320

Les aciers trempés avec une grande quantité de reste d'austénite produisent des changements de dimensions et doivent subir avant le travail de finition, un refroidissement profond (T = - 60°C) afin de transformer le reste de l'austénite en martensite.

5.4.3.2. Choix du temps de maintien (durée de chauffage)

Le maintien, à la température nécessaire de trempe doit assurer le chauffage de la pièce jusqu'au cœur et l'achèvement des transformations de phases, sans être trop long pour ne pas provoquer le grossissement du grain et la décarburation des couches superficielles de l'air.

La durée totale de chauffage ($t_{tot} = t_{ec} + t_{si}$) dépend donc de :

- t_{ec} : durée d'échauffement à cœur jusqu'à la température demandée. Elle dépend de la forme des pièces et des dimensions, de la nuance de l'acier, du type de four etc.
- t_{si} : durée de séjour isotherme qui dépend de la composition et de l'état initial de l'acier.

Dans la pratique pour déterminer t_{tot} , on se réfère aux données expérimentales.

Moyen de chauffage	Durée en [s/mm] d'épaisseur de pièce		
	ronde	carrée	Rectangulaire
Four électrique	40 – 50	50 – 60	60 – 75
Four à flamme	35 – 40	45 – 50	55 – 60
Bain de sel	12 – 15	15 – 18	18 – 22
Bain de plomb	6 – 8	8 – 10	10 – 12

La durée approchée du chauffage peut atteindre jusqu'à 800 ou 850°C dans des fours de différents types prévus pour la trempe des pièces (durée d'austénitisation).

5.4.3.3. Choix de la vitesse de refroidissement pour la trempe

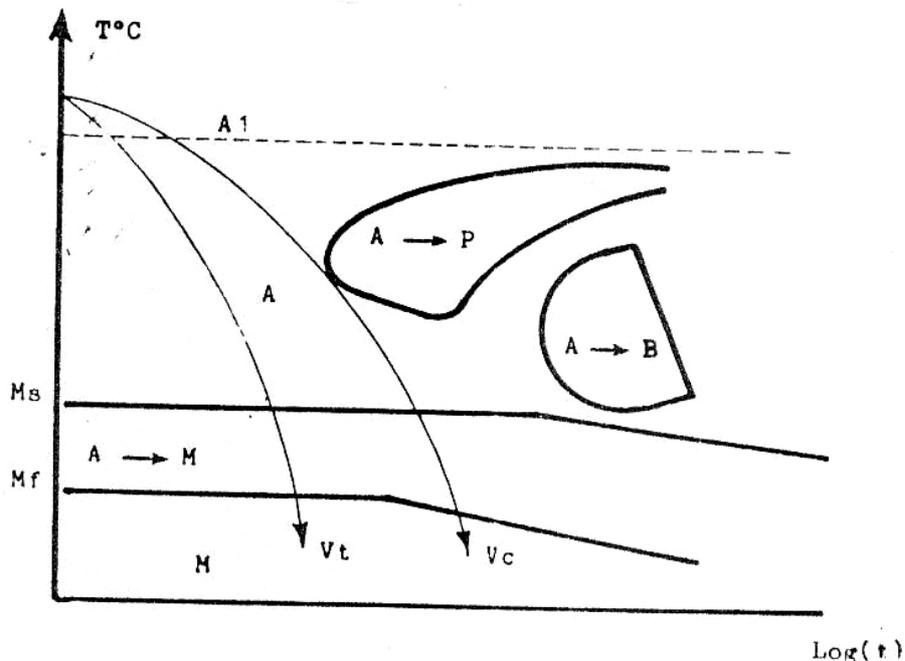
Pour estimer la vitesse de refroidissement, on utilise la relation entre la température et le temps : $T = f(\log t)$ représenté graphiquement. L'échelle logarithmique permet un étalement

convenable des courbes de refroidissement rapide. La vitesse critique de trempe martensitique est soit :

- mesurée à 700°C (V_{r700}),
- exprimée dans un gradient de température généralement compris entre 700 et 300°C (\bar{V}_{700}^{300})

Le refroidissement doit se réaliser à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe. Celle-ci étant la vitesse limite qui assure la transformation totale de l'austénite en martensite.

La figure 161 représente les courbes TTT de la transformation de l'austénite, surfusionnée avec indication de la vitesse critique de trempe V_c qui effleure le domaine de transformation austénite → perlite. Chaque vitesse de trempe $V_t \geq V_c$, assure donc la transformation austénite → martensite, c'est à dire qu'elle assure la trempe martensitique.



(fig. 161)

5.4.3.4. Choix du milieu de trempe

Le milieu de trempe doit assurer le refroidissement dans toute la section des pièces, et l'obtention d'une structure martensitique sans produire de défauts tels que : tapures, déformations, gauchissement, contraintes résiduelles etc.

Le meilleur refroidissement est celui qui se fait à grande vitesse dans l'intervalle de température A_1 - M_s . Ceci permet d'étouffer la décomposition de l'austénite surfusionnée dans le domaine des transformations : perlitique et intermédiaire. Ce refroidissement est ralenti vers les basses températures dans le domaine de la transformation martensitique M_s - M_f .

Une grande vitesse de refroidissement dans l'intervalle martensitique est indésirable car elle accroît les contraintes résiduelles et produit des tapures.

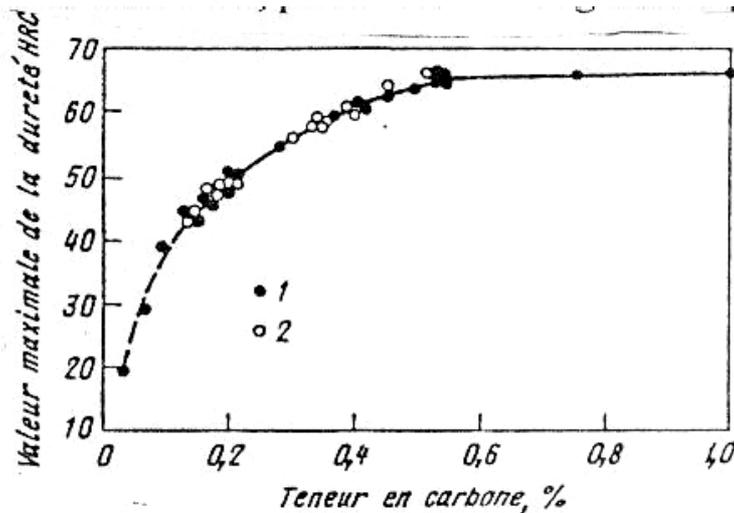
Généralement, on utilise pour les bains de trempe, des liquides qui peuvent bouillir tels que l'eau, les solutions aqueuses de sels et d'alcalins, les huiles. La trempe par ces agents passe par une étape de refroidissement pelliculaire (ou caléfaction) où une gaine de vapeur protège les pièces et empêche le refroidissement. Une fois que l'agent refroidissant se met en ébullition, la gaine se rompt et l'évacuation de la chaleur s'accélère.

Pour les aciers au carbone, on utilise le plus souvent de l'eau comme milieu de trempe, alors que pour les aciers alliés, on utilise soit de l'huile, soit un bain de sel.

5.4.3.5. Trempabilité et pénétration

La trempabilité d'un acier est son aptitude à accroître sa dureté sous l'effet de la trempe. Elle est liée directement à la pénétration de trempe. Celle-ci désigne l'aptitude de l'acier à recevoir une couche trempée plus ou moins profonde. Comme limite de la couche trempée, on prend la profondeur dont la structure comprend 50% de martensite et 50 % de bainite.

La trempabilité est définie essentiellement par la teneur de l'acier en carbone. Plus cette teneur, dans la martensite est élevée, plus sa dureté est grande (fig. 162).



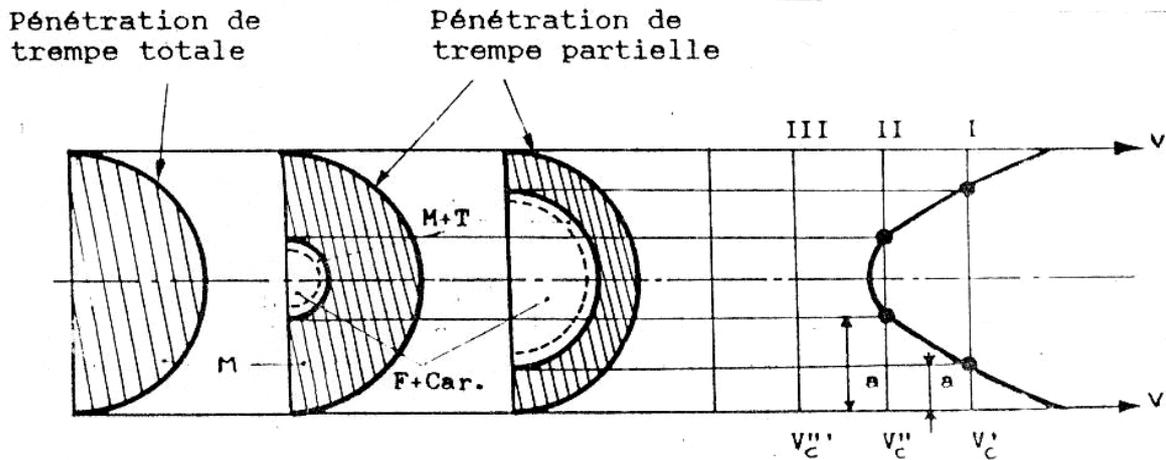
Dureté de la martensite en fonction de la teneur en carbone et en éléments d'alliage
1- acier au carbone et 2- acier allié.

(fig. 162)

Les éléments d'alliages influent peu sur la trempabilité. Sous le terme de pénétration de trempe, on comprend l'aptitude de l'acier à recevoir une couche trempée à structure martensitique ou troostite-martensite et une dureté élevée d'une profondeur plus ou moins grande. La pénétration de trempe est déterminée par la vitesse critique de refroidissement.

On constate, d'après la figure 163, que la vitesse réelle de refroidissement au cœur de la pièce (V_c'') est supérieure à la vitesse critique de trempe (V_c), l'acier reçoit une structure martensitique sur toute la section et la pénétration de trempe est totale. C'est le cas des aciers

fortement alliés. Si, par contre, la vitesse réelle à cœur est inférieure à V_c (par exemple V_c' et V_c''), la trempe ne pénètre pas jusqu'au cœur de la pièce et la pénétration est incomplète. Dans ce cas, la couche extérieure est martensitique, alors que le cœur acquiert une structure F + Cm sous forme de bainite, de troostite ou de perlite.



(fig.163) : différentes pénétration de trempe d'une section ronde à différentes vitesses critiques de trempe martensitique.

La pénétration de trempe est d'autant plus élevée que V_c est plus faible. C'est à dire que la stabilité de l'austénite surfusionnée est plus élevée. C'est pourquoi tous les facteurs qui diminuent V_c , améliorent la pénétration de trempe. Parmi les facteurs qui influencent sur V_c , un des plus importants est la composition chimique de l'acier : plusieurs éléments d'alliages, augmentent nettement la pénétration de trempe (ou la trempabilité), par exemple Cr, Ni,...

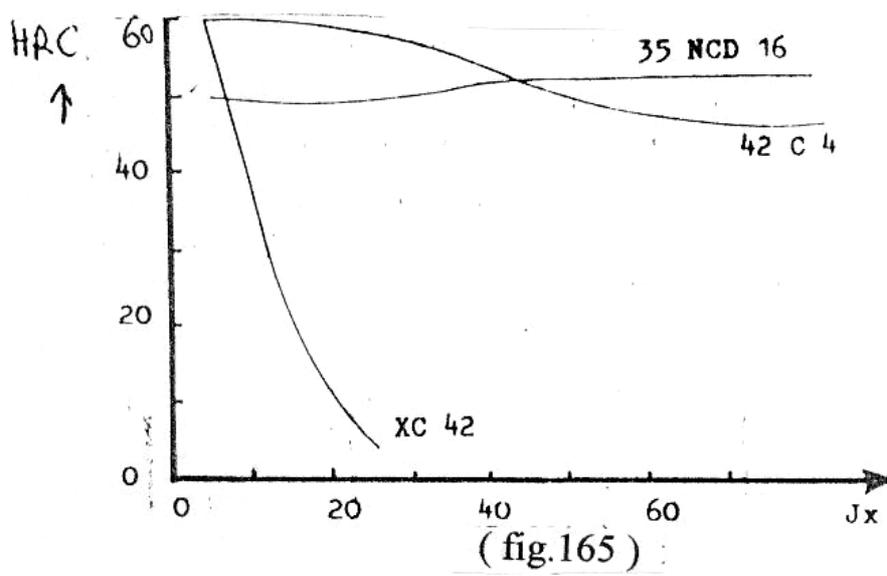
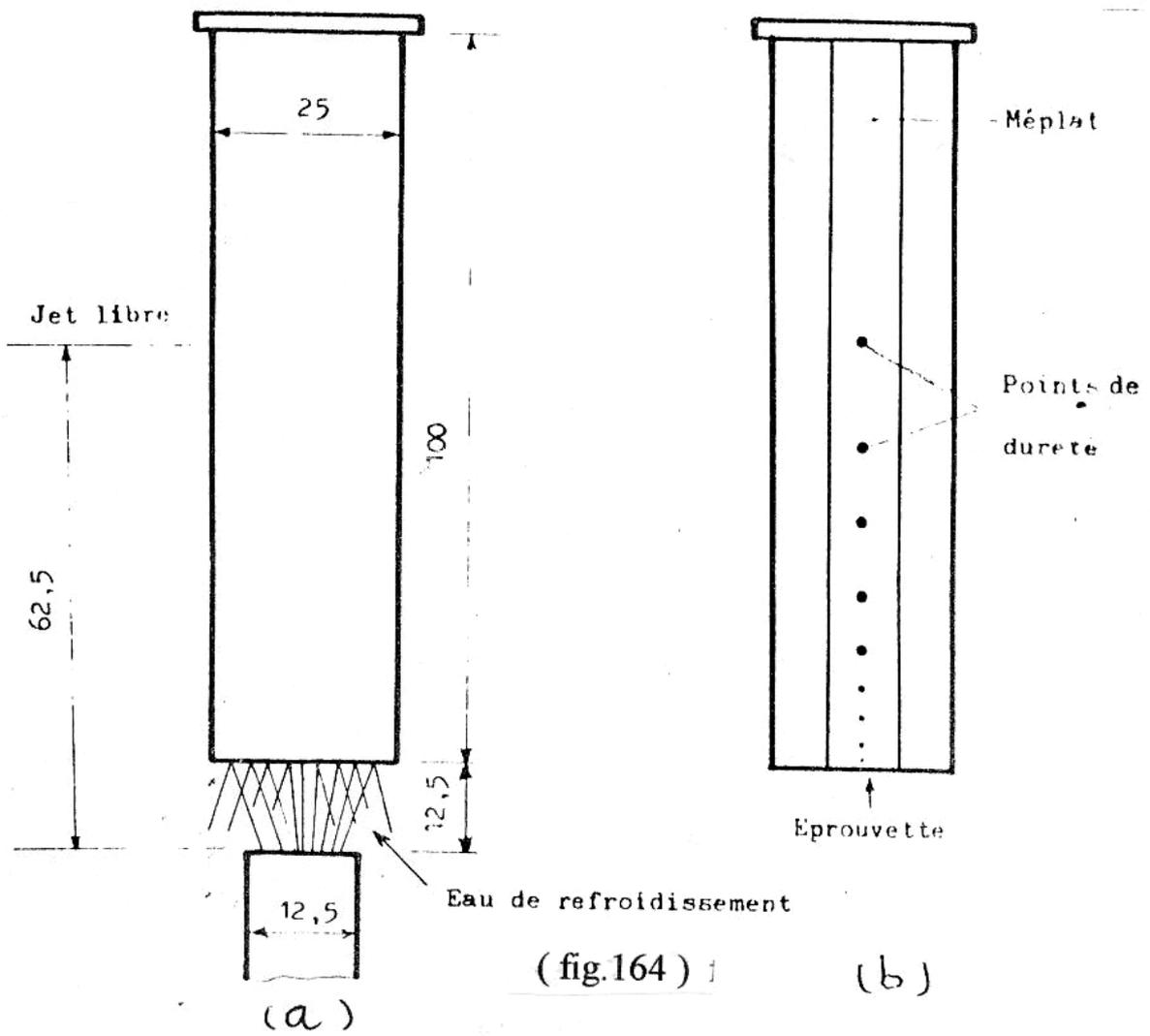
5.4.3.6. Essai Jominy

Il a pour but d'obtenir, en une seule opération sur une éprouvette normalisée (voir figure 164), des indications globales sur la trempabilité d'un acier, sous forme d'une courbe appelée courbe Jominy.

Cet essai est réalisé en trois étapes.

- L'austénitisation d'une éprouvette normalisée prélevée dans l'acier à tester.
- Le refroidissement en bout par un jet d'eau dans des conditions imposées.
- La mesure de dureté sur un méplat (fig. 230.b) le long d'une génératrice et dont l'usinage ne doit pas provoquer un échauffement excessif. Les points de mesure de la dureté sont situés à : 1,5 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 - 13 - 15 - 20 - 30 - 40 - 50 - 60 - 70 - 80 mm de l'extrémité arrosée et sont désignés par J1,5 - J3 - J5 - ... Jx ...

Les résultats sont représentés graphiquement par la courbe Jominy : $HRC = f(Jx)$. La connaissance de ces courbes pour différentes nuances permet de faire une comparaison rapide de leurs trempabilités relatives, voir figure 165.



5.4.3.7. Modalités de la trempe

Le procédé le plus usité est celui de la trempe dans un milieu refroidissant unique ou trempe continue. Mais on utilise également d'autres modes de trempes dans les cas où la forme des pièces est complexes où il faut diminuer les déformations.

a. Trempe à deux bains :

On refroidit d'abord à l'eau jusqu'à 300 ou 400°C (un peu au dessus de Ms), ensuite rapidement on place la pièce dans un milieu à sévérité de trempe plus faible, par exemple l'huile ou l'air où elle se refroidit jusqu'à la température ambiante. Le transfert de la pièce dans un agent refroidisseur différent affaiblit les contraintes internes qui apparaissent avec le refroidissement rapide dans un seul agent refroidisseur.

b. Trempe suivie d'autorevenu :

Ce mode est destiné à obtenir une dureté plus faible au cœur de la pièce qu'à sa surface. Dans ce cas, le refroidissement de la pièce dans un bain de trempe est interrompu lorsqu'elle garde encore quelque chaleur à l'intérieur.

En se dégageant, cette chaleur élève la température des couches superficielles plus refroidies et produit ainsi l'autorevenu. Lorsque la température atteint la valeur requise, la pièce est de nouveau plongée dans le bain de trempe. Ce mode de trempe est très employé pour les pièces qui supportent des charges dynamiques et qui doivent combiner une dureté superficielle élevée à ductilité accrue au cœur, telles que burins, massettes, marteaux d'ajusteur, pointeaux.

c. Trempe isotherme (étagée) martensitique :

La pièce prévue pour être trempée par ce procédé est chauffée jusqu'à la température de trempe, puis refroidie dans un bain dont la température est légèrement supérieure au point Ms (fig.166), généralement de l'ordre de 180 à 250°C), et maintenue à cette température un temps relativement court. Ensuite la pièce est refroidie à l'air jusqu'à l'ambiante. Le séjour dans le bain de trempe assure le nivellement de la température suivant toute la section de la pièce sans provoquer la décomposition de l'austénite avec formation de la bainite.

La transformation martensitique assurée par un refroidissement à l'air est moins complète que celle produite par la trempe continue. L'acier garde donc un peu plus d'austénite résiduelle. La trempe martensitique diminue :

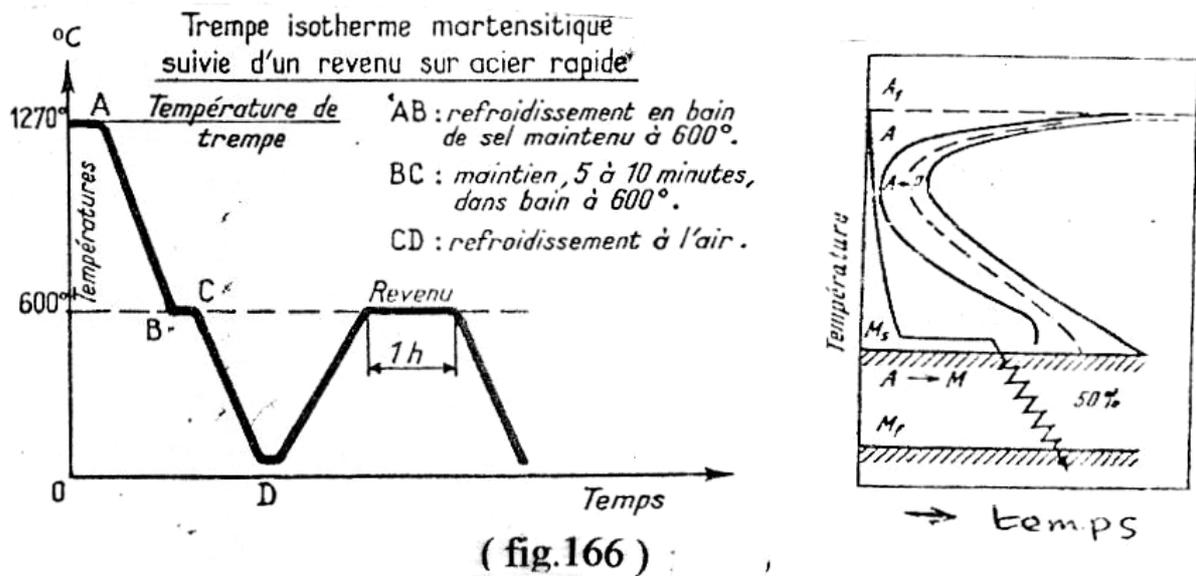
- Les modifications volumiques produites par la présence d'une grande quantité d'austénite résiduelle et la propension de la martensite à l'autorevenu.
- Le gauchissement, car la transformation martensitique se produit presque simultanément dans toutes les sections de la pièce.
- Le danger de la formation des tapures.

Les transformations structurales, y compris la transformation martensitique, s'accompagnent de la diminution de la résistance de l'acier, alors que sa plasticité augmente. Cette déconsolidation particulière qui ne s'observe qu'au moment de la transformation

(martensitique dans le cas considéré), est utilisée en trempe étagée pour réaliser le dressage des pièces susceptibles de subir un gauchissement. Le dressage se fait surtout à la presse lorsque la pièce est retirée du bain de trempe pour être refroidie à l'air.

La trempe martensitique des aciers au carbone ne peut s'employer que pour des pièces relativement petites (d'un diamètre ne dépassant pas 8 à 10 mm). La vitesse de refroidissement des pièces plus grosses dans un bain porté à une température supérieure à M_s est plus faible que la vitesse critique de trempe, et l'austénite se décompose à des températures plus élevées.

Des pièces plus grosses (15 à 40 mm de diamètre), doivent être trempées dans un bain dont la température est inférieure au point M_s (160 à 170°C), ce qui assure une vitesse de refroidissement plus grande. La pièce est alors moins déformée par la trempe, mais son dressage est rendu plus difficile, car le refroidissement jusqu'à la température du bain donne lieu à la formation d'une quantité importante de martensite. Pour de grosses pièces en aciers alliés, cette diminution de la température du bain n'est pas nécessaire.



d. La tempe isotherme (étagée) bainitique :

Ce type de trempe, (fig. 167), s'effectue en principe, de la même façon que la trempe martensitique, mais elle impose un séjour plus long au dessus du point M_s . Un tel séjour assure la décomposition de l'austénite avec la formation de bainite inférieure. La trempe bainitique des aciers au carbone n'améliore pas sensiblement les caractéristiques mécaniques par rapport à celles obtenues par trempe usuelle et revenu.

Dans la majorité des aciers alliés, l'austénite ne se décompose pas complètement dans le domaine bainitique. Si l'austénite qui ne s'est pas décomposée lors du maintien isotherme ne subit pas de transformation martensitique pendant le refroidissement ultérieur, l'acier reçoit une structure constituée de bainite et de 10 à 20 % d'austénite résiduelle (enrichie en carbone). Une telle structure assure une résistance très élevée et une ductilité suffisante.

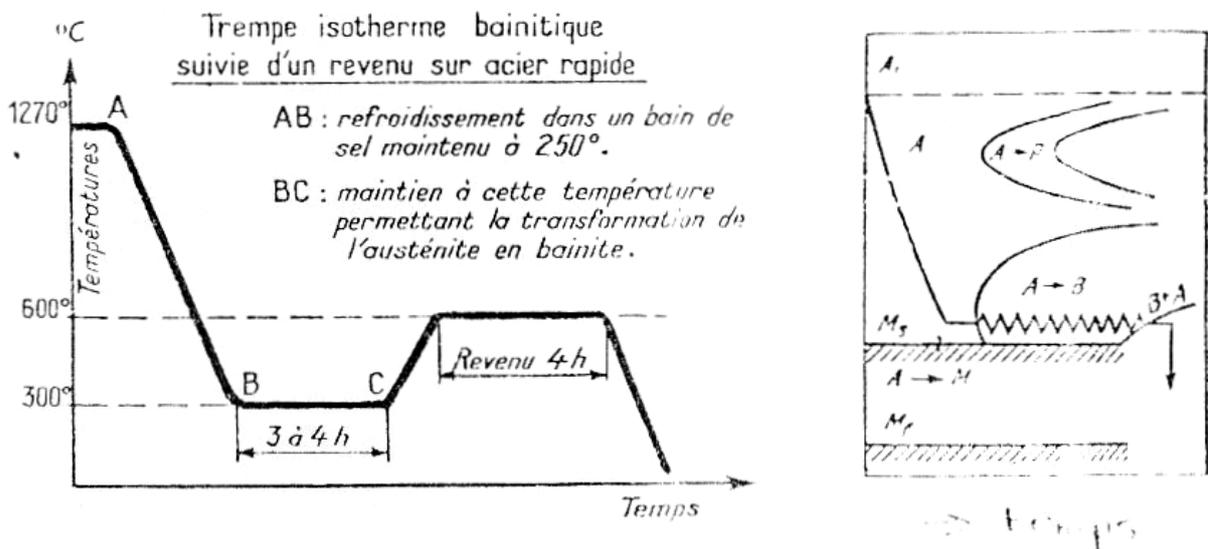
Pour de nombreux aciers, la trempe bainitique augmente nettement la résistance fonctionnelle, c'est à dire, la résistance des éprouvettes de forme complexe.

Comparée à la trempe et au revenu usuels à 250 ou 400 °C, la trempe bainitique augmente de 1,5 à 2 fois la plasticité de l'entaille. Mais si la quasi totale de l'austénite qui ne s'est pas décomposée après transformation bainitique subit, lors du refroidissement ultérieur, la transformation martensitique, les propriétés mécaniques obtenues par trempe suivie de revenu, la plasticité se trouve alors diminuée.

Pour donner aux aciers alliés de construction (0,3 à 0,5 % C), des propriétés mécaniques optimales, la trempe bainitique doit prévoir un séjour dans la partie inférieure du domaine bainitique de la décomposition isotherme de l'austénite (quelque peu au dessus de Ms).

L'augmentation de la température de maintien (et de décomposition de l'austénite), dans le domaine bainitique, diminue la plasticité et la ductilité. La durée du maintien dans le bain de trempe est fonction de la stabilité de l'austénite aux températures supérieures à Ms, définies en partant du diagramme de décomposition isotherme de l'austénite de l'acier considéré.

Le milieu employé pour les trempes martensitique et bainitique est constitué, le plus souvent, de saumures dont l'intervalle thermique varie de 150 à 500°C (par exemple, 55% KNO₃ + 45 % NaNO₂ ou NaNO₃ ou bien 20 % NaOH + 80 % KOH). Plus la température de la saumure est basse, plus la vitesse de refroidissement des pièces plongées dans ce sel est grande. Les sels fondus ne refroidissent que par le dégagement de chaleur, aussi leur aptitude à refroidir augmente-t-elle avec l'agitation.



(fig.167)

L'addition de l'eau (3 à 5 %) à un bain d'alcalis caustique en fusion, provoque l'ébullition et accélère ainsi le refroidissement dans la gamme des températures de la

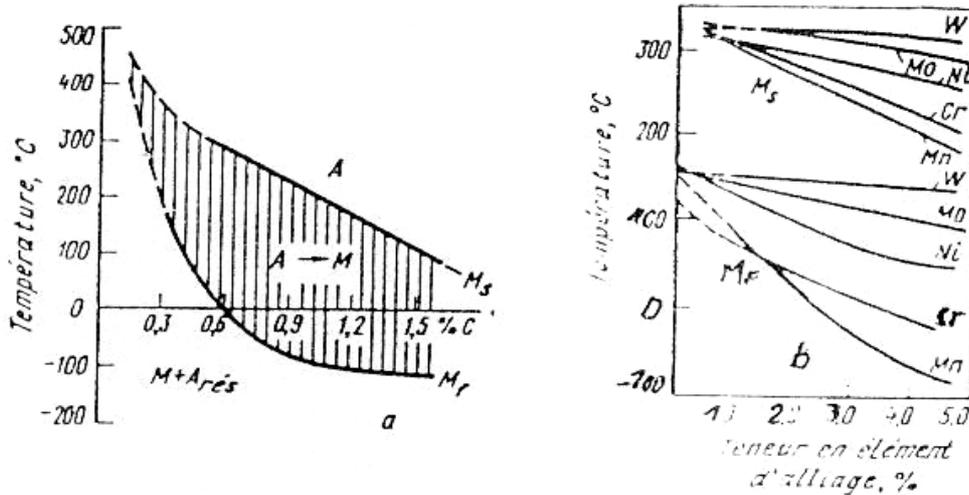
transformation perlitique. A 400 ou 500°C, le refroidissement devient 4 à 5 fois plus rapide, et à 300°C, deux fois plus rapide.

Le refroidissement dans un bain d'alcalis caustique fondus, les pièces chauffées au préalable dans un bain de sels chlorurés liquides (c'est à dire de sels qui ne provoquent pas l'oxydation), permet d'obtenir une surface nette d'une couleur grise claire. Cette modalité de trempe est dite blanche.

e. Traitement à froid de l'acier :

Un acier trempé à 0,4 ou 0,5 % C, contient de l'austénite résiduelle. Cette dernière diminue la dureté, la tenue à l'usure et provoque souvent la modification des dimensions des pièces travaillant aux basses températures par suite de la transformation spontanée de l'austénite en martensite. Cette transformation peut se produire également sous l'action des contraintes de contact qui peuvent provoquer des ruptures.

La quantité d'austénite résiduelle d'un acier trempé peut être diminuée par un traitement à froid (méthode proposée par A.Goulaev en 1937). Il consiste en un refroidissement de l'acier trempé jusqu'à une température inférieure à zéro. Le traitement à froid s'emploie pour des aciers dont la température de fin de transformation martensitique M_t se trouve au dessous de zéro, (fig. 168).



Température des points martensitiques M_s et M_f
a- Influence de la teneur en carbone.
b- Influence de la teneur en éléments d'alliage.

(fig. 168)

L'abaissement de la température à M_t (pour la plupart des aciers elle est de l'ordre -30 à -70°C), provoque la transformation de l'austénite résiduelle en martensite, ce qui augmente de 1 à 3 HRC la dureté des aciers à 0,8 ou 1,1 % C. Mais les contraintes augmentent également, c'est pourquoi le refroidissement des pièces doit être ralenti et le traitement à froid doit être immédiatement suivi de revenu.

Après la trempe, le maintien de l'acier à l'ambiante pendant 3 à 6 heures, stabilise l'austénite qui, lors du refroidissement ultérieur, se transforme d'une façon moins complète en martensite et réduit l'effet du traitement à froid. C'est pourquoi, le traitement à froid est effectué directement après la trempe.

Le traitement à froid s'emploie essentiellement pour des instruments de mesure et des pièces en aciers cémentés à teneur élevée en éléments d'alliage qui, après trempe, gardent en grande proportion l'austénite.

5.4.3.8. Trempe superficielle

La trempe normale a pour but de transformer l'acier en un état martensitique après son refroidissement à partir de la température de trempe. Mais il existe beaucoup d'éléments de construction ou de pièces mécaniques qui ne subissent l'usure qu'à la surface tels que les arbres, les pignons etc. D'où ces éléments exigent une dureté superficielle et un cœur ductile résistant aux charges dynamiques. La trempe superficielle est un traitement local qui ne trempe qu'une mince couche superficielle, tout en laissant intacte la couche sous-jacente.

La possibilité de tremper un acier superficiellement, c'est à dire, obtenir une surface dure et un noyau ductile, c'est de chauffer la pièce jusqu'à l'obtention d'une température de trempe à la surface, c'est une transformation martensitique uniquement à la surface de la pièce, la température étant inférieure à celle de la surface, donc ne subissant pas une telle transformation. Lors du chauffage, on doit diminuer la durée de maintien pur éviter une pénétration de la trempe.

Les avantages essentiels que présente la trempe superficielle sont l'augmentation de la dureté, de l'amélioration de la tenue à l'usure, de la résistance, de la limite de fatigue des couches superficielles des pièces.

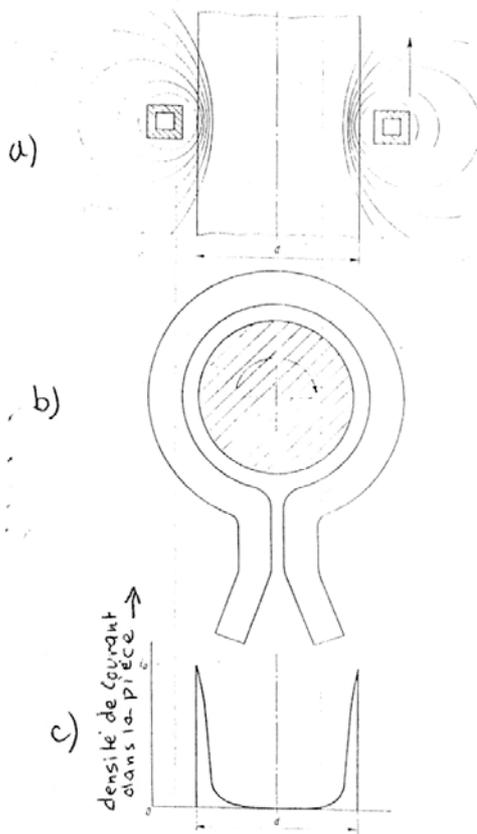
Il existe plusieurs modes de trempe superficielle :

- Trempe superficielle par induction (la plus utilisée).
- Trempe superficielle au chalumeau.
- Trempe par immersion dans un bain de trempage.

a. Trempe superficielle par induction :

Le chauffage aux courants d'induction à haute fréquence est assuré par l'action thermique du courant induit dans la pièce placée à cet effet dans un champ magnétique alternatif (fig. 169).

La pièce est placée à l'intérieur d'un inducteur composé d'une ou de plusieurs spires. Le courant induit s'établit qu'en surface de la pièce et la densité du courant alternatif induit n'est pas la même suivant la section du conducteur (pièce chauffée). Le courant passe surtout par la surface du conducteur. Cet effet porte le nom d'effet de peau et il est d'autant moins profond que la fréquence est très élevée. Une grande intensité donne en surface l'élévation de la température désirée.



(fig. 169)

Dans le cas d'une trempe et d'un chauffage superficiels, la puissance unitaire appliquée est relativement grande (0,1 à 2,0 Kw/cm²), ce qui rend négligeable la durée de chauffage (2 à 50s).

Représentation schématique du chauffage par induction pour la trempe superficielle :

- a- Champ magnétique de l'inducteur avec la pièce.
- b- Induction et direction du courant.
- c- Répartition radiale du courant dans la pièce.

Les propriétés du métal varient avec la température et la profondeur augmente surtout au dessous de la température du point de curie. Les fréquences optimales en dépendances de l'épaisseur de la couche à tremper sont données sur le tableau ci-dessous.

Epaisseur en mm	1,0	2,0	3,0	6,0	10
Fréquence en Hz	60 000	15 000	7 000	1 500	500

La profondeur de pénétration du courant est donnée par la formule suivante :

$$y = K \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}$$

- K = 5 000 : constante.
- ρ : résistivité de l'acier en Ω.mm²/m.
- μ : perméabilité magnétique de l'acier Gs/Oe.
- f : fréquence du courant en Hz

Le choix de l'épaisseur optimale d'une couche à consolider est déterminé par les conditions du service de la pièce, lorsque celle-ci est sollicitée seulement à l'usure ou à la fatigue, l'épaisseur de la couche trempée est le plus souvent prise de 1,5 à 3,0 mm et de 4 à 5 mm dans les conditions des charges de contact élevées et de la répétition éventuelle de a rectification. Dans le cas des charges de contact particulièrement grandes, par exemple, dans

celui des cylindres des laminoirs à froid, l'épaisseur d'une couche trempée doit atteindre 10 à 15 mm et plus.

Pour de grandes vitesses de chauffage, la transformation de la perlite en austénite se déplace dans le domaine des températures élevées. C'est pourquoi la température de trempe par induction est supérieure à celle du chauffage dans les fours, où la vitesse de chauffage ne dépasse pas 1,5 à 3,0°C/s. Plus la vitesse de chauffage est grande dans la région des transformations de phase, plus la température doit être élevée pour assurer une austénisation suffisamment complète et obtenir au refroidissement la structure optimale (martensite à grain fin) et la dureté maximale.

Pour le refroidissement, on utilise un agent refroidisseur (eau, émulsion) qui est généralement amené par un dispositif de pulvérisation. Les modalités de trempe par induction sont les suivantes.

- Chauffage et refroidissement simultanés (trempe sur place) de toute la surface, ce procédé s'emploie pour des pièces de petites surfaces (axes, manetons, outils).
- Chauffage et refroidissement successifs des secteurs isolés, ce procédé est utilisé pour le durcissement des tourillons, des vilebrequins, des cames des arbres à cames, des pignons à module supérieur à 6.
- Chauffage et refroidissement successifs continus (la trempe au défilé). Ce procédé sert pour la trempe de longs arbres, axes etc. Il consiste à déplacer la pièce par rapport à l'inducteur et au dispositif refroidisseur fixe ou inversement.

Pour obtenir une profondeur de trempe uniforme, il faut que la distance entre l'inducteur et la pièce soit partout égale, la forme de l'inducteur étant symétrique à la surface chauffée. De bons résultats sont obtenus en faisant tourner la pièce dans l'inducteur.

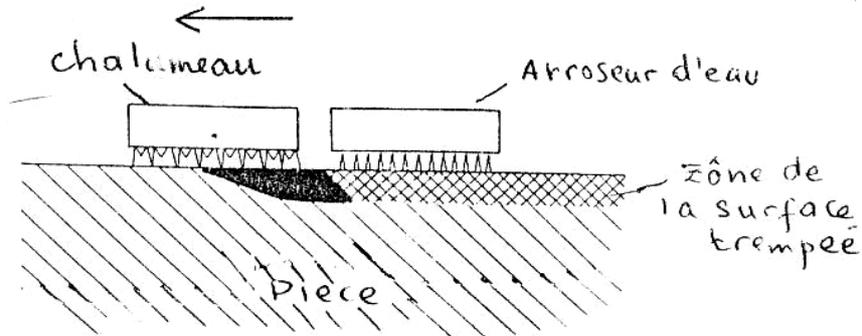
La trempe par induction est suivie de revenu à basse température de 160 à 220°C et souvent d'autorevenu, car en réalisant la trempe, le refroidissement n'est pas complet et la pièce garde ainsi une certaine quantité de chaleur. Cette chaleur résiduelle fait remonter la température de la couche trempée jusqu'aux températures de revenu. Pour la trempe superficielle par induction, on emploie le plus souvent, les aciers au carbone de 0,4 ou 0,5 % C, qui après trempe, ont une dureté élevée (HRC 55 à 60), présentent une bonne tenue à l'usure et ne sont pas susceptibles de rupture fragile.

b. Trempe au chalumeau :

Ce mode de trempe est employé pour de grosses pièces (cylindres de laminoirs, arbres etc.). La surface de la pièce est chauffée à la flamme de gaz dont la température est très élevée (2400 à 3150°C). L'apport de chaleur à la pièce étant important, la surface de cette dernière s'échauffe rapidement jusqu'à la température de trempe, alors que son cœur reste froid. Un refroidissement rapide ultérieur assure la trempe de la couche superficielle. Le chauffage est assuré par des brûleurs à acétylène, gaz normal, etc.

Une mince couche superficielle acquiert une structure martensitique, alors que les

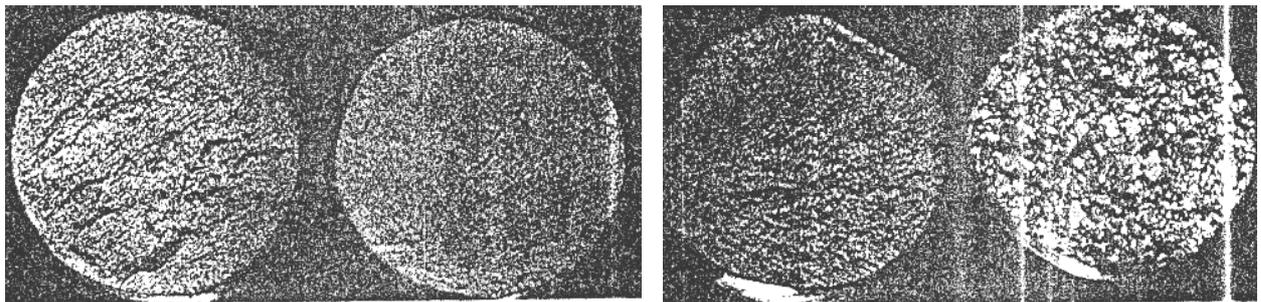
couches sous-jacentes, une structure troostite + martensite. La trempe au chalumeau se prête aisément à l'automatisation et s'insère sans difficultés dans une ligne continue (fig. 170). Souvent, pour de grosses pièces, cette méthode est plus avantageuse que la trempe par induction. L'inconvénient de ce mode de trempe est la surchauffe qui peut conduire à la formation de l'austénite à gros grains à la surface superficielle.



(fig. 170)

Trempe de l'acier à 0,9 % C :

a. Structure d'après la cassure en fonction de la température de trempe, refroidissement dans l'eau à 20°C.



(fig. 171)

b. Les mêmes structures que précédemment, vues au microscope avec grossissement (A = 500 : 1), milieu d'attaque HNO₃ à 1 % d'alcool.



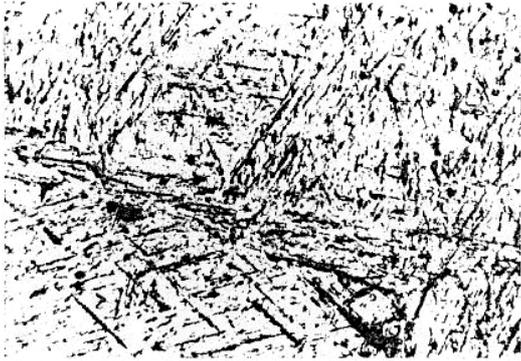
T = 600 °C;

(fig.172)



T = 800 °C

(fig.173)



T = 1000°C

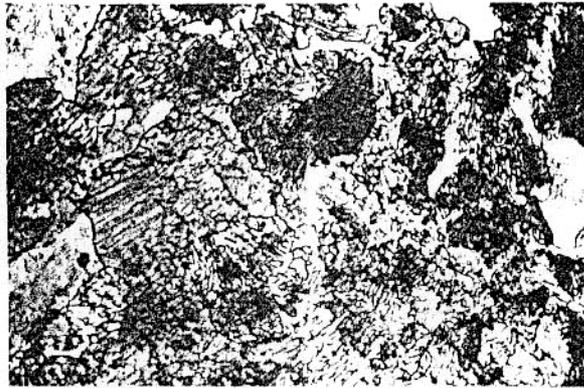
(fig.174)



T = 1200°C

(fig.175)

c. Acier à 0,9 % C, T = 800°C , t =30 min, refroidissement dans le four, (A= 500 : 1), perlite.



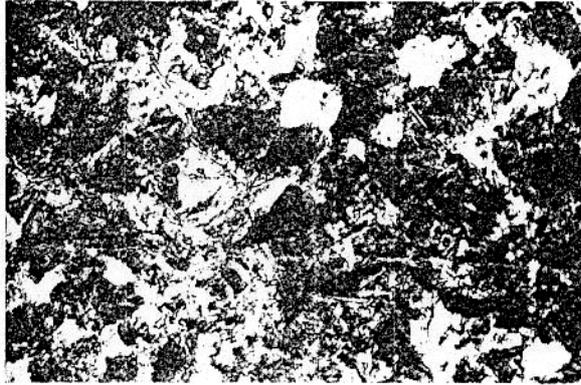
Perlite
(fig.176)

d. Acier à 0,9 % C, T = 800°C , t =30 min, refroidissement à l'air, (A= 500 : 1), ferrite + bainite.



(fig. 177)

e. Acier à 0,9 % C, T = 800°C, t 30 min, refroidissement dans l'huile à 20°C, (A = 500 : 1), Bainite.



Bainite
(fig. 178)

f. Acier à 0,9 % C, T = 800°C, t = 30 min, refroidissement à l'eau, (A = 500 : 1), martensite + troostite.



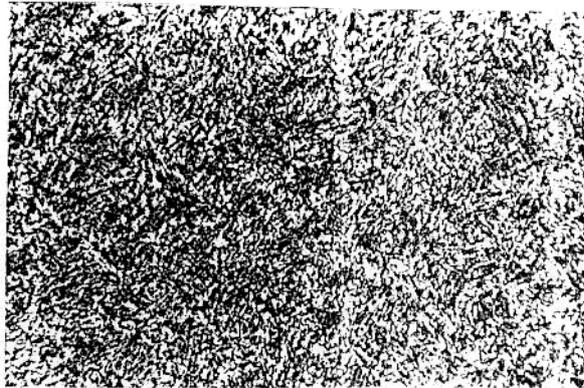
Martensite + troostite
(fig. 179)

g. Acier à 1,6 % C, T = 100°C, refroidissement dans la glace (A = 500 : 1), Martensite + reste de l'austénite.



Martensite + reste de l'austénite
(fig. 180)

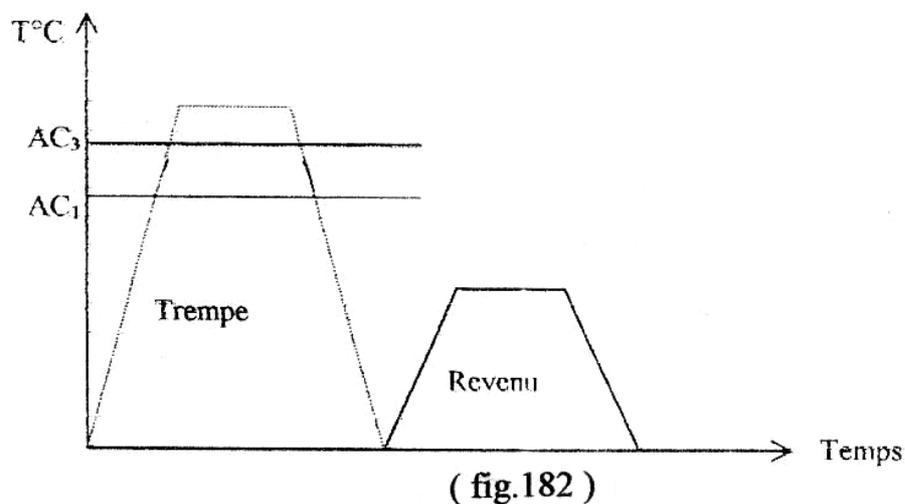
h. Acier à 0,9 % C, $T = 800^{\circ}\text{C}$, $t = 30$ min, refroidissement à l' eau, revenu à $T = 250^{\circ}\text{C}$ pendant 1 heure, refroidissement à l'air, ($A = 500 : 1$), structure de revenu.



Structure de revenu
(fig.181)

5.4.4. Le revenu

Le revenu est un traitement thermique pratique, généralement après trempe, et qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe d'un acier (contraintes internes et fragilités). Le chauffage de l'acier trempé est effectué à une température inférieure à AC_1 , (selon la résistance exigée), suivi d'un maintien à cette température et au refroidissement jusqu'à la température ambiante (fig. 182).



Le revenu est destiné à provoquer un retour plus ou moins marqué vers l'état stable à froid, donc d'obtenir les propriétés mécaniques requises, c'est à dire la martensite se transforme en de nouveaux constituants (sorbite, bainite).

Donc le revenu permet de supprimer les contraintes internes provoquées par la trempe, de diminuer la fragilité des pièces trempées tout en conservant une dureté suffisante. Cette suppression de contraintes est d'autant plus complète que la température du revenu est plus

élevée, c'est à dire, l'affaiblissement des contraintes est le plus intense lorsque le maintien atteint 15 à 30 min à 550°C.

La vitesse de refroidissement après revenu, a une influence faible sur l'état des contraintes résiduelles. Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles. Un refroidissement rapide dans l'eau à partir de 600°C produit des contraintes thermiques nouvelles.

Pour éviter un gauchissement après revenu, surtout pour les pièces de formes complexes, il faut refroidir lentement. Les aciers alliés sont refroidis rapidement. Les propriétés d'un acier obtenu par revenu dépendent surtout de la température. Il existe trois modalités de revenus.

a. Revenu à basse température :

Le revenu à basse température s'effectue avec un chauffage vers 250°C et permet de diminuer les contraintes internes. Il transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Ce revenu augmente la résistance et améliore la ductilité sans altérer sensiblement la dureté (58 à 63 HRC), d'où une bonne tenue à l'usure.

Il s'applique aux outils de coupe et aux instruments de mesure en aciers au carbone et faiblement alliés. La durée de ce revenu varie de 1 à 3 heures.

b. Revenu à température intermédiaire :

Le revenu à température intermédiaire se réalise entre 350 et 500°C et s'emploie pour les ressorts variés et les estampes. Il permet d'obtenir une limite élastique et une résistance à la fatigue élevées. La structure est de type troostite de revenu ou troostite - martensite dont les duretés varient de 40 à 50 HRC.

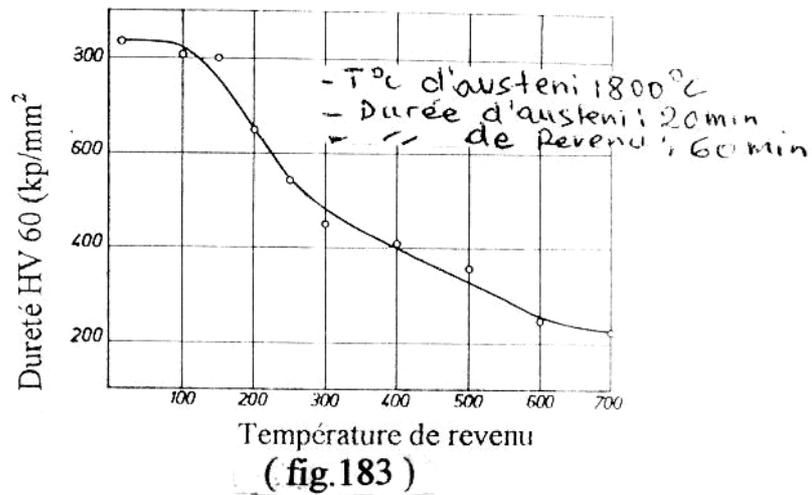
Le refroidissement après revenu à 400 ou 450°C se fait à l'eau, ce qui contribue à la formation en surface de contraintes de compression résiduelles qui élèvent la limite de fatigue des ressorts.

c. Revenu à haute température :

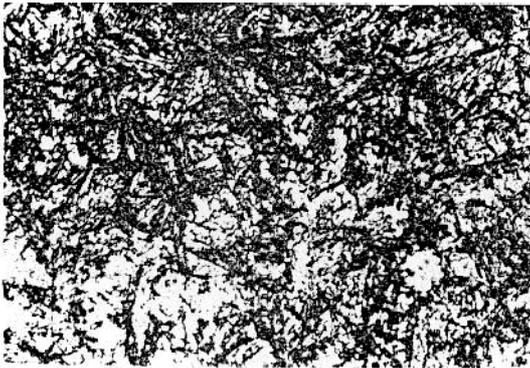
Le revenu à haute température se fait entre 500 et 680°C, il donne à l'acier la structure sorbite de revenu. Ce type de revenu crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier.

La trempe suivie de revenu à haute température (ce traitement double est appelé amélioration) améliore, par rapport à l'état normalisé, ou recuit, les limites de rupture et d'élasticité, la striction et surtout la résilience. L'amélioration est appliquée surtout aux aciers de construction à moyen carbone (0,3 à 0,5%).

La figure 183 montre l'évolution de la dureté HV 60 en fonction de la température de revenu.



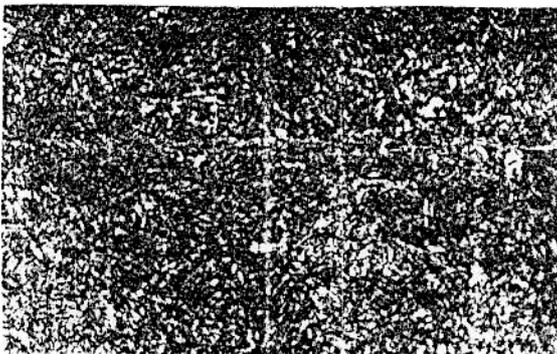
Les figures, ci-dessous, montrent la structure de l'acier à 0,6 % C pour différentes températures de revenu.. La solution d'attaque étant HNO₃ à 3 % d'alcool avec un grossissement (A = 500 : 1) .



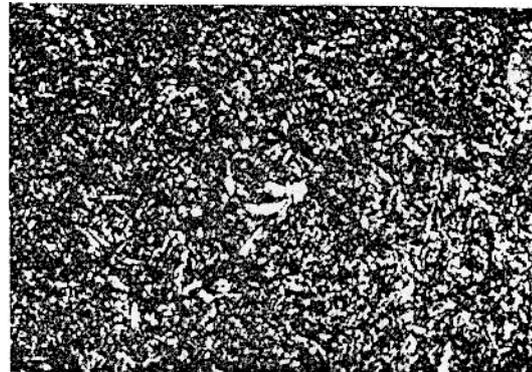
Refroidissement à l'eau
(fig. 184)



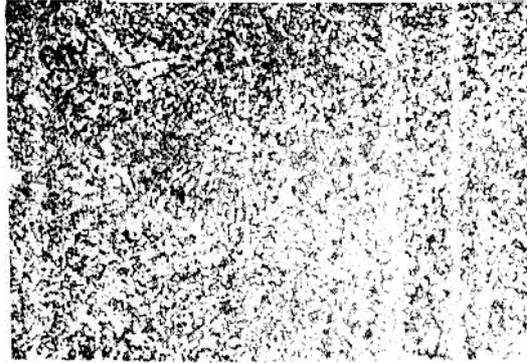
température de revenu 150°C
(fig. 185)



Température de revenu : 300°C
(fig. 186)



Température de revenu 500°C
(fig. 187)



température de revenu 700°C
(fig. 188)

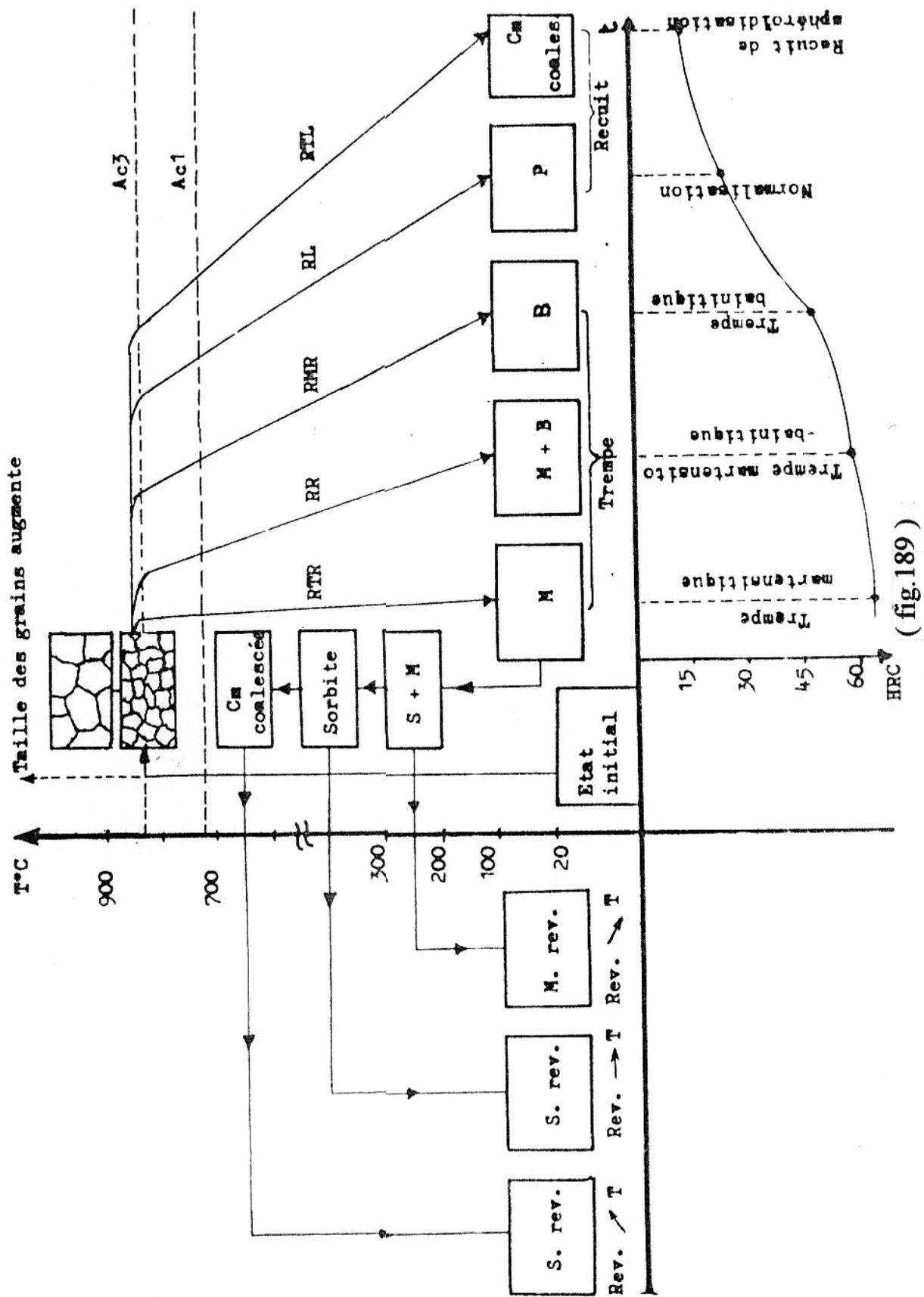
Après avoir étudié les différents types de traitement thermique de l'acier, résumons ces derniers sur La figure 189 par adoption des désignations suivantes :

- RTL : refroidissement très lent.
- RL : refroidissement lent.
- RMR : refroidissement moyennement rapide.
- RR : refroidissement rapide.
- RTR : refroidissement très rapide.

- Cm : cémentite.
- P : perlite.
- B : bainite.
- M : Martensite.
- S : sorbite.

- Rev : revenu.
- Rev \uparrow T : revenu à haute température.
- Rev. \rightarrow T : revenu à moyenne température.
- Rev. \downarrow T : revenu à basse température.

- S. Rev. : sorbite de revenu.
- M Rev : martensite de revenu.

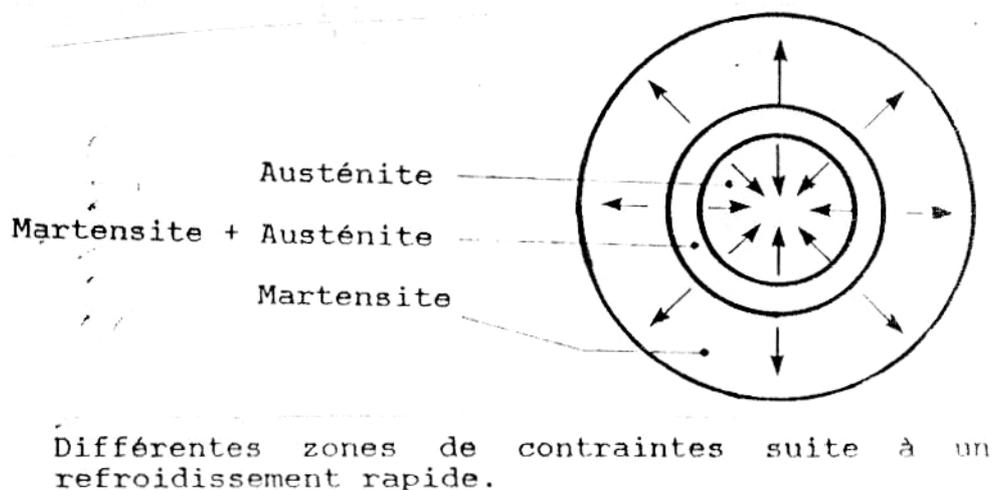


(fig.189)

5.5. Défauts des traitements thermiques de l'acier

Les principaux défauts provoqués par les traitements thermiques des pièces peuvent être résumés en trois points :

- **Contraintes propres** : provoquées par les gradients de température au chauffage et au refroidissement entre les divers points de la pièce. Pour le chauffage, il faudrait que la montée en température dans le four soit faible. Pour le refroidissement, il faudrait que la vitesse soit faible pour réduire le gradient de température, mais pas trop afin d'éviter toute transformation indésirable.
- **Tapures (fissures)** : elles se forment le plus souvent au cours de la trempe. Pour parer à ce défaut incorrigible, on recommande lors du projet des pièces, d'éviter les saillies, les angles vifs, les raccords brusques etc., de refroidir modérément en utilisant une trempe à deux bains.
- **Déformations et gauchissements** : concernent surtout les pièces trempées à cause du refroidissement qui n'est pas homogène. Au début, seules les couches externes se refroidissent et donc se transforment en martensite, ce qui provoque des contraintes de traction sur le cœur de la pièce qui est encore plastique. Puis les couches internes se transforment à leur tour, la dilatation correspondante, peut exercer sur les couches superficielles plus froides, donc peu plastiques, un effort de traction, le cœur étant en état de compression, voir figure 190.



(fig. 190)

Les contraintes propres peuvent dépasser la limite élastique et induire des déformations permanentes qui se traduisent par des déformations externes des pièces.

5.6. Traitements thermochimiques de l'acier

Le nom de traitement thermochimique est donné à la saturation superficielle de l'acier en tel ou tel élément (par exemple : carbone, azote, aluminium, chrome etc.), par sa diffusion à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur porté à une température élevée, c'est à dire,

dans le cas où l'on aura besoin d'une dureté superficielle encore plus élevée et une ductilité au cœur encore plus grande, on utilise les traitements thermochimiques.

Tous les traitements thermiques à envisager se déroulent sans changement de composition chimique. Tandis que les traitements thermochimiques s'effectuent avec changement de la composition chimique d'une certaine épaisseur de la couche superficielle.

Outre cela le changement de la composition chimique de la couche superficielle qui s'effectue à l'état solide n'est possible que par diffusion. Pour enrichir la couche superficielle d'un métal par des atomes d'un autre élément métallique, on doit créer des conditions à la surface du métal qui doivent assurer le transport de ces atomes à partir de cette surface ou bien vers cette surface.

Le problème d'enrichir la couche superficielle d'un métal A par un autre métal B, nécessite que certaines conditions doivent être remplies. Avant tout il est nécessaire que le métal B doit être soluble dans le métal A à l'état solide, c'est à dire, il y a formation de cristaux mixtes. Ensuite il faut que les atomes dissous dans les cristaux mixtes doivent effectuer des changements de places et cela dépendra du type de l'élément B, seulement les éléments avec des atomes de faible rayon, peuvent prendre une position interstitielle et avoir une mobilité élevée dans le réseau, même à des températures basses. A la température ambiante par exemple, l'hydrogène peut faiblement se diffuser en formant des cristaux mixtes d'insertion.

Les éléments qui forment des cristaux mixtes de substitution se diffusent difficilement et exigent des températures supérieures à la température de recristallisation. Par exemple la diffusion de l'aluminium et du chrome est beaucoup plus difficile que celle des éléments tels que : C, N. Généralement la diffusion augmente avec l'élévation de la température. Le pouvoir de diffusion d'un élément est caractérisé par son coefficient de diffusion et dépend essentiellement de la température :

$$D = D_0 \cdot e^{\frac{-Q}{R.T}}$$

- D : coefficient de diffusion.
- D_0 : facteur de fréquence (dépend du matériau).
- Q : énergie d'activation de diffusion de l'élément considéré.
- R : constante des gaz.
- T : température absolue.

La diffusion est assurée donc par la pénétration de l'atome B dans la surface périphérique de l'atome A. Le cas le plus simple, à imaginer, est celui de l'immersion de l'acier dans un bain métallique facilement fusible.

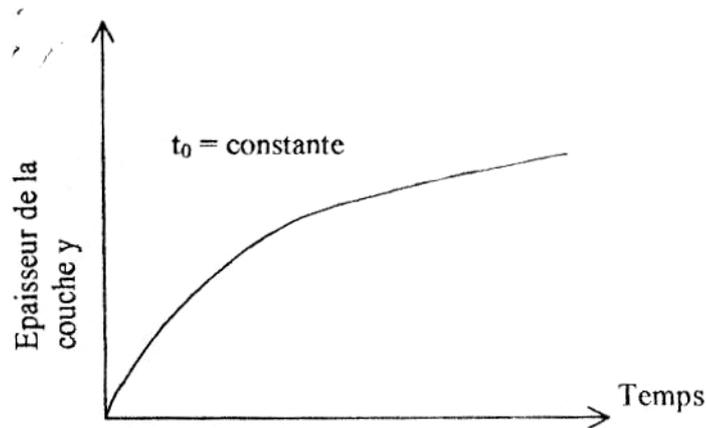
Dans certains cas, il y a transfert (diffusion) des atomes de l'élément ajouté non seulement à la couche superficielle, mais aussi en profondeur du métal, lorsqu'il y a saturation de la couche superficielle.

En général il n'existe pas de matériaux purs, mais sous forme d'alliage, par exemple l'acier qui est un alliage de fer et de carbone et d'autres éléments. Dans le cas d'un système à plusieurs composants, il se forme plusieurs couches, dans lesquelles se forment durant la diffusion, plusieurs phases l'une avec l'autre. Le traitement thermochimique consiste à chauffer une pièce jusqu'à la température donnée dans un milieu solide, liquide ou gazeux, qui dégage facilement l'élément de diffusion à l'état atomique, à maintenir à cette température, puis à le refroidir. Donc à la différence d'un traitement thermique, un traitement thermochimique change non seulement la structure de l'acier, mais aussi la composition chimique des couches superficielles, ce qui permet de modifier dans de plus larges limites ses propriétés.

Un traitement thermochimique compte trois stades élémentaires :

1. Processus dont le siège est le milieu extérieur et qui assure le dégagement de l'élément diffusant à l'état atomique.
2. Contact des atomes d'élément diffusant avec la surface de la pièce en acier et formation des liaisons chimiques avec les atomes de fer (absorption).
3. Pénétration de l'élément saturant en profondeur dans le métal de base, c'est à dire, diffusion.

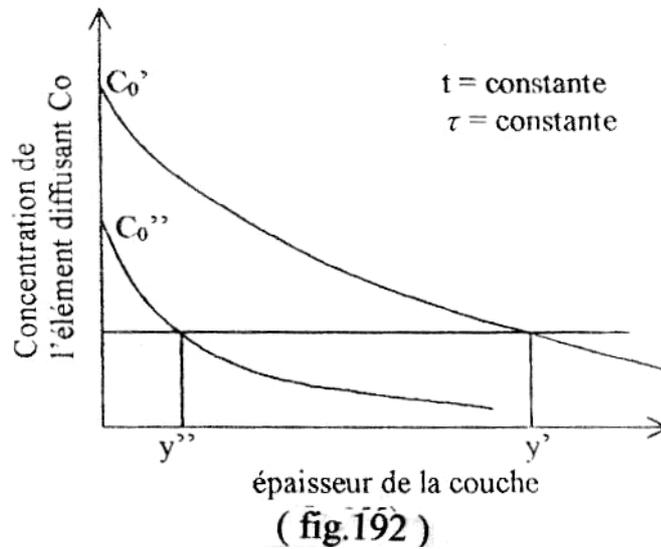
La saturation en carbone ou en azote, qui forment avec le fer des solutions solides d'insertion, rend la diffusion plus rapide que la saturation en métaux qui forment des solutions solides de substitution. La profondeur de pénétration est fonction de la température et de la durée de saturation, ainsi que de la concentration de l'élément diffusant à la surface. La figure 191 montre que la couche diffusée en fonction de la durée du phénomène, à la température considérée, est le plus souvent déterminée par une relation parabolique.



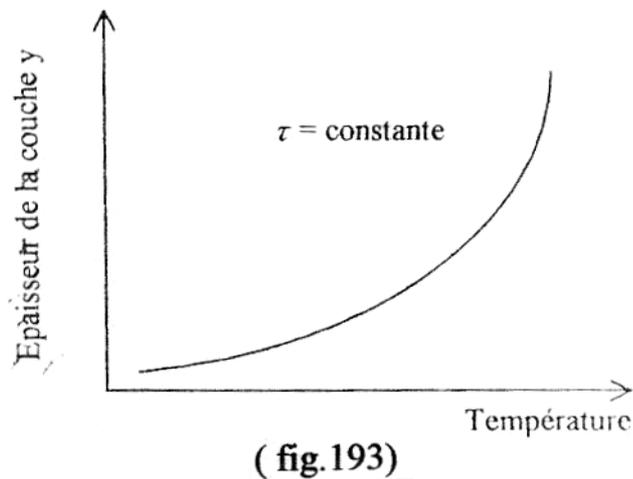
(fig.191)

Par conséquent, avec le temps la vitesse d'augmentation de l'épaisseur de la couche ne cesse de diminuer.

La figure 192 nous montre l'épaisseur de la couche diffusée, toutes conditions étant égales d'ailleurs, est d'autant plus grande que la concentration, de l'élément diffusant à la surface du métal est plus faible.



La profondeur de la couche diffusée formée, pendant la durée donnée, augmente fortement en fonction de la température du processus (fig. 193).



5.7. Principaux types de traitements thermochimiques de l'acier

Ces traitements thermochimiques sont :

- La cémentation.
- La nitruration.
- La cyanuration et carbonisation.
- La métallisation par cémentation.

5.7.1. La cémentation

La cémentation est un processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier et ayant pour but principal, l'obtention d'une surface dure et résistance à l'usure par enrichissement de la couche superficielle en carbone jusqu'à une concentration de 0,8 à 1,2

% C et par trempe ultérieure suivie d'un revenu à basse température. Ce procédé accroît également la limite de fatigue.

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 cœur 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).

5.7.1.1. 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.

Pendant la cémentation, les atomes de carbone diffusent dans le réseau du fer γ . Lorsque la limite de saturation de l'austénite en carbone, déterminée par la ligne SE du diagramme Fe-Fe₃C est atteinte, les conditions favorisent la formation à la surface d'une couche de cémentite continue.

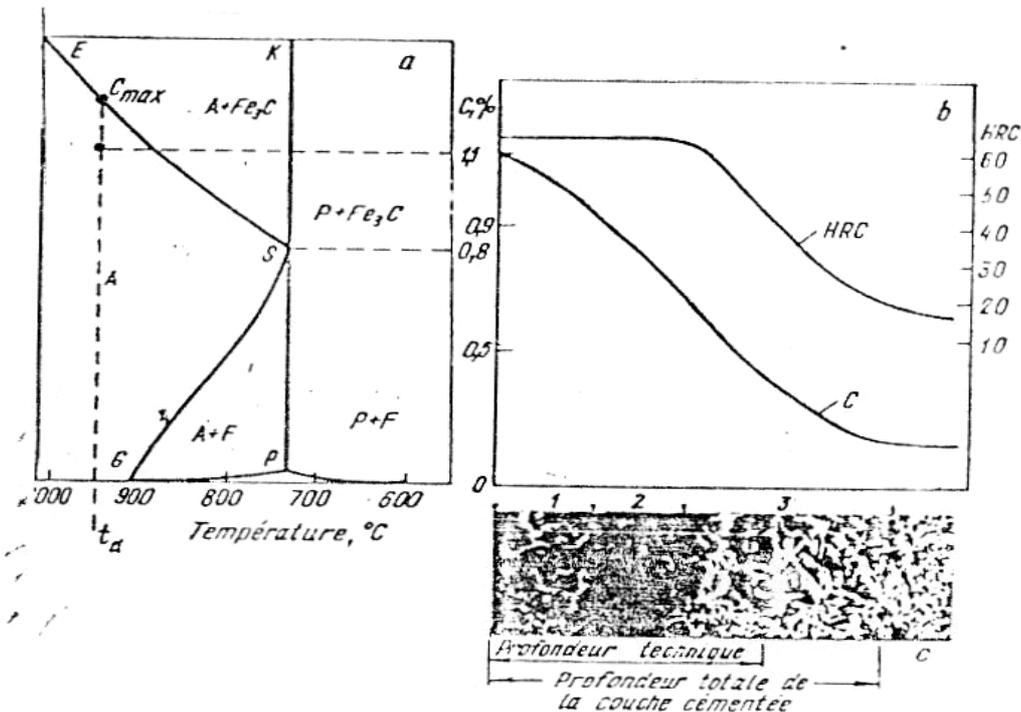
Dans les conditions réelles, il est rare qu'on observe la formation d'une couche de cémentite continue à la surface. Dans les conditions courantes, la cémentation au-dessus du point AC₃, ne forme que l'austénite qui se décompose après refroidissement lent en précipitant la ferrite et la cémentite. Dans ces conditions un refroidissement lent produit trois zones dans la structure de la couche cémentée (fig. 194).

1. Hypereutectoïde constituée de perlite et de cémentite secondaire formant un réseau suivant l'ancien grain d'austénite.

2. Eutectoïde constitué de perlite lamellaire.
3. Hypoeutectoïde constituée de perlite et de ferrite

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

Les éléments d'alliages influent fortement sur la structure de la couche cémentée, le mécanisme de sa formation et la vitesse de diffusion. Le chrome et le tungstène diminuent le coefficient de diffusion du carbone dans l'austénite, car ils augmentent l'énergie d'activation, mais en renforçant la concentration du carbone à la surface, augmente quelque peu, la profondeur de cémentation. Le nickel au contraire accroît la vitesse de diffusion mais diminue la concentration du carbone à la surface et donc la profondeur de cémentation. Le manganèse n'exerce presque aucune action sur le coefficient de diffusion, accroît la concentration du carbone à la surface et augmente donc quelque peu la profondeur de cémentation.



(fig. 194)

5.7.1.2. 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 baryum BaCO_3 et le carbonate de sodium Na_2CO_3 .

Le ciment solide, largement utilisée, se compose de charbon de bois, de 20 à 25 % de BaCO_3 et jusqu'à 3,5 % de CaCO_3 que l'on ajoute pour prévenir le filtrage.

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.

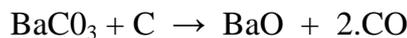
La caisse est placée dans un four où la température de cémentation varie de 910 à 930°C. Le maintien à la température de cémentation est de 7 à 9 min par centimètre de la dimension maximale de la caisse. Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400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

Durée en heures		Epaisseurs de la couche de cémentation en mm				
		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

Ce type de cémentation s'effectue avec du carbone atomique (Cat.), ce dernier est obtenu de la façon suivante. La caisse de cémentation contient de l'air dont l'oxygène réagit à une température élevée avec le carbone de ciment pour produire de l'oxyde de carbone, en présence du fer, l'oxyde de carbone se dissocie.



Le carbone ainsi obtenu est atomique au moment de sa formation. Il diffuse dans l'austénite, l'addition des carbonates rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'atmosphère carburante en oxyde de carbone.



Le ciment employé est à l'état granulé, ce qui favorise le déplacement des gaz et permet d'obtenir une vitesse de déplacement plus élevée.

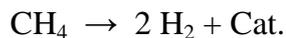
5.7.1.3. Cémentation gazeuse

Dans ce procédé, la pièce à cimenter 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.

La meilleure couche cémentée s'obtient en employant comme agent de cémentation le gaz naturel CH₄, ainsi que les mélanges de propane et de butane soumis à un traitement spécial.

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



Où : Cat. \rightarrow Fe γ = austénite Fe γ (C).

La cémentation gazeuse s'opère le plus souvent dans des fours à moufle et sans moufle, à marche continue, ainsi que dans les fours à cuve à marche discontinue.

La cémentation s'effectue à la température de 930 à 650°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, on peut accélérer l'opération en faisant circuler les gaz ou augmenter la température de cémentation jusqu'à 1000 à 1050°C à condition que les aciers employés soient à grains fins par hérédité. La cémentation est accélérée également si les pièces sont fabriquées par des méthodes de déformation plastique à froid.

5.7.1.4. Cémentation par des agents liquides

La cémentation liquide est effectuée dans des sels fondus contenant du Na₂CO₃, 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,

Les deux derniers sels jouent le rôle de modération, évitant une pénétration trop de carbone dans l'acier. Ils réduisent l'évaporation du cyanure qui fond à 560°C, cependant le bain s'appauvrit par oxydation au contact de l'air. L'agent actif est le cyanogène.

Ces bains diffusent en outre de l'azote dans le métal. 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.

5.7.1.5. Traitement thermique de l'acier après cémentation

Ce traitement thermique est destiné à :

- Corriger la structure et affiner le grain au cœur et dans la couche cémentée, qui augmente pendant le long séjour à une température de cémentation élevée.

- Obtenir une dureté élevée de la couche cémentée et de bonnes propriétés mécaniques du cœur.
- Eliminer le réseau de carbone dans la couche cémentée qui peut apparaître par suite de la sursaturation en carbone.

Dans la grande majorité des cas, surtout lors du traitement des aciers à grains par hérédité, on a recourt à la trempe à partir du domaine au dessus du point AC_1 , (depuis 820 ou 850°C), on arrive ainsi à affiner le grain de la couche cémentée et partiellement à recristalliser et à affiner le grain au cœur.

Un tel traitement ne permet pas de corriger la structure de la couche cémentée et du cœur. C'est pour cette raison que ce mode de trempe n'est utilisé que pour des pièces en aciers à grains fins par hérédité.

Pour éliminer la déformation des pièces cémentées, on emploie également la trempe dans l'huile chaude portée à 160 ou 180°C. Le traitement thermique produit dans la couche superficielle est une structure composée de martensite ou de martensite accompagnée d'une petite quantité de carbures en excès sous forme de globules. Quels que soit le cas, l'opération terminale des pièces ayant subies 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 supprimant les contraintes.

La dureté de la couche superficielle dans le cas des aciers au carbone est HRC 60 à 64, et dans celui de l'acier allié, HRC 58 à 61. La diminution de la dureté est due à la formation d'une quantité élevée d'austénite résiduelle. Pour décomposer l'austénite résiduelle, on emploie souvent, après cémentation, un revenu à haute température à 630 ou 640°C suivi de trempe à basse température et de revenu à basse température. Un tel traitement assure une dureté élevée de la couche cémentée.

La cémentation suivie d'un traitement thermique élève la limite de fatigue des pièces en acier par suite de la formation dans la couche superficielle des contraintes de compression résiduelles importantes (jusqu'à 40 ou 50 kgf/mm²) et diminue sensiblement l'aptitude aux concentrateurs de contraintes à condition que la couche consolidée soit continue suivant toute la surface de la pièce.

5.7.2. La nitruration

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 consiste à saturer en azote, la surface de l'acier dans le milieu ammoniacque. 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.

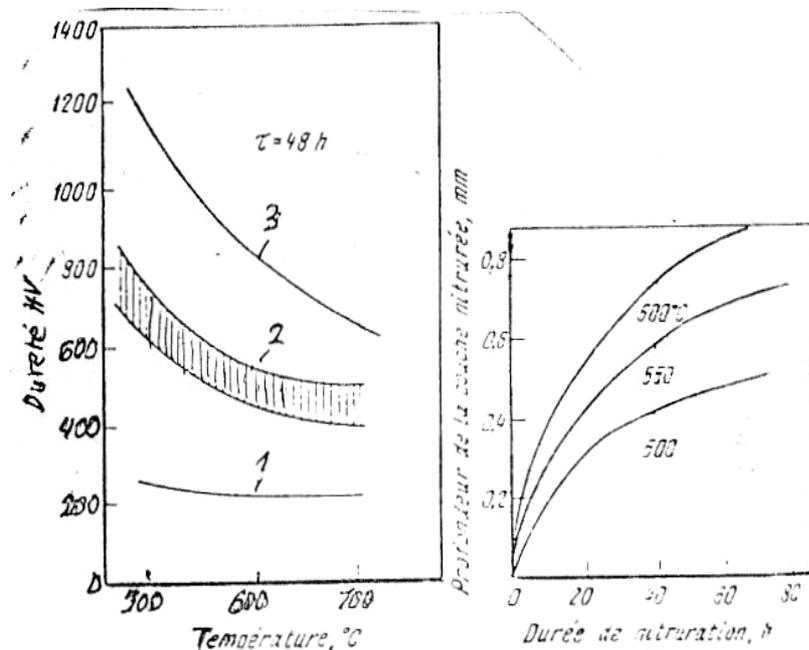
5.7.2.1. Mécanisme de la formation de la couche nitrurée

Les alliages fer-azote forment différentes phases et parmi elles, la phase F_4N (nitride de fer), avec une teneur en azote de 6,10 %, c'est un corps très dur mais fragile. La nitruration s'effectue dans une atmosphère d'ammoniac qui, au chauffage, se dissocie suivant la réaction suivante : $2 NH_3 \rightarrow 2 N + 6 H$

Donc c'est le gaz ammoniac qui 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 nitrides de ces éléments qui augmentent effectivement la dureté des pièces nitrurées jusqu'à 1200 HV. Les aciers pour nitruration contiennent généralement les éléments d'alliages Al (1,5 %), Cr (1,65 %), Ni (2 %), Mo (0,3 %) et du carbone (0,35 à 0,45 %). Les éléments d'alliages, s'ils augmentent la dureté, ils diminuent simultanément l'épaisseur de la couche nitrurée. Cette action est faite surtout dans le cas de l'addition de W, Ni, Cr, Mo.

La nitruration est destinée aussi à certaines fontes, qui contiennent également du Cr et Al. Les fontes subissent avant nitruration une trempe et un revenu pour leur donner une structure dure et tenace. La durée de nitruration varie en fonction de l'épaisseur de la couche à obtenir, par exemple 10 heures (0,1 mm) et 70 heures (0,5 mm). Plus la température de nitruration est élevée, plus la dureté de la couche nitrurée est faible et son épaisseur est grande (fig. 195) La diminution de la dureté de la couche nitrurée est liée à la coalescence des nitrides des éléments d'alliage.



(fig. 195)

Influence de la température et de la durée de la nitruration (48 heures) sur la dureté et la profondeur de la couche nitrurée des aciers :

1. au carbone (30, 40, 45, etc.) (1)
2. faiblement alliés : (40X, 30 XMA, 18 HBA, etc.) (2)
3. fortement alliés (3)

Il est avantageux d'obtenir une couche nitrurée de 0,3 à 0,6 mm d'épaisseur. La durée de nitruration dans ce cas est grande, elle varie de 24 à 90 heures et se fait à des températures de 500 ou 520°C.

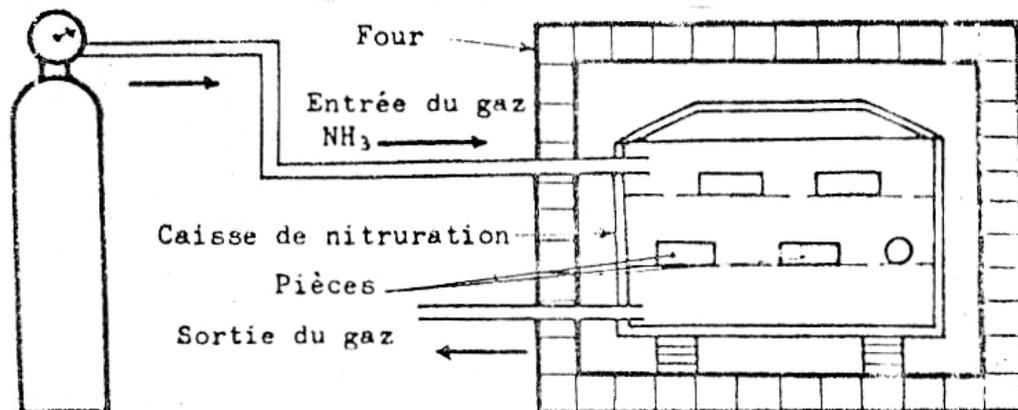
Pendant la nitruration en azote, l'augmentation du volume de la couche superficielle change quelque peu les dimensions de la pièce. La déformation devient plus importante avec l'élévation de la température de nitruration et de l'épaisseur de la couche. La nitruration n'est suivie d'aucun traitement thermique, ce qui permet d'éviter toute oxydation du métal et toute déformation des pièces.

La nitruration présente beaucoup d'avantages sur la cémentation (grande dureté, qui se conserve jusqu'à 500°C, 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.

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. 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 sûr, leur usinage doit être aussi effectué avant l'opération de nitruration ensuite, elles sont placées dans des caisses fermées hermétiquement (fig. 196).



(fig. 196)

Les caisses sont ensuite placées dans un four porté à 525°C pendant un temps nécessaire pour obtenir la couche nitrurée d'épaisseur satisfaisante. La vitesse d'augmentation de la couche nitrurée est de 0,04 mm/heure. L'opération peut durer plusieurs dizaines d'heures.

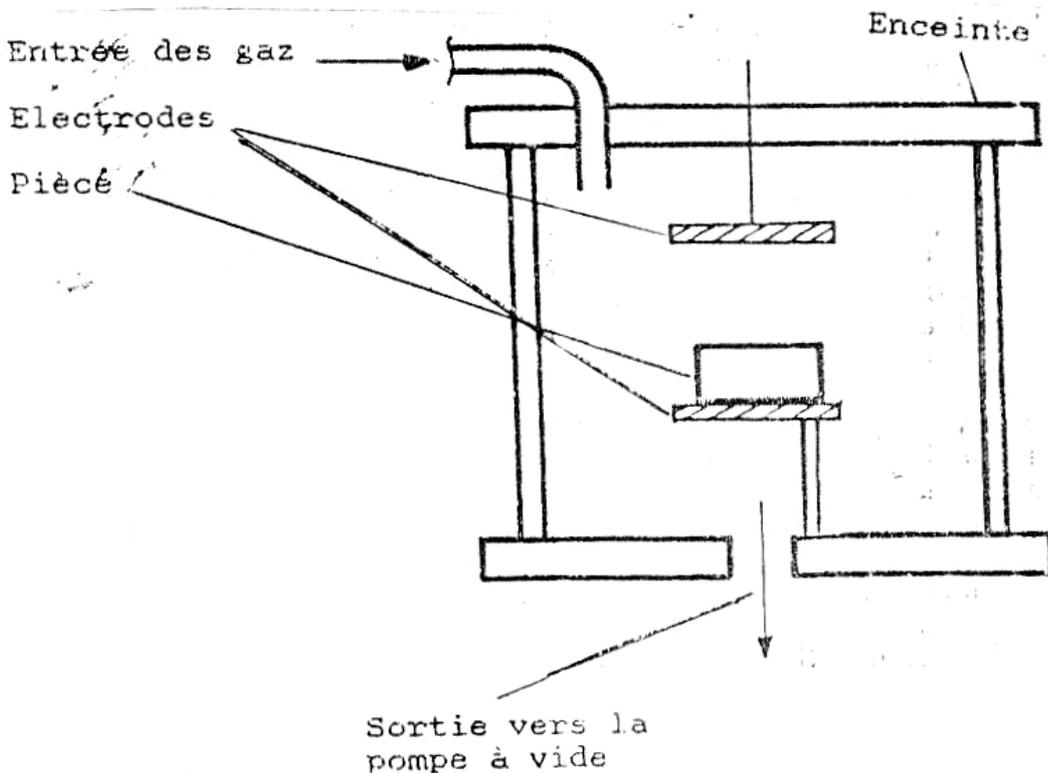
Le courant gazeux NH_3 , envoyé sous pression de 10 à 20 mbar, fait baigner les pièces. Les parties ne devant pas être nitrurées, sont préalablement traitées à l'étain. Après nitruration, la couleur des pièces tend vers le blanc à cause de la faible température, elles sont dépourvues de déformation.

5.7.2.2. La nitruration ionique

La nitruration ionique est obtenue dans une décharge lumineuse, 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 (fig. 197). La décharge lumineuse 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.



(fig. 197)

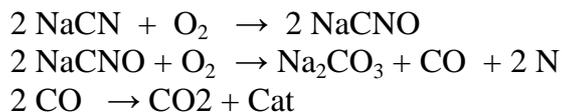
Le tableau, ci-dessous, indique quelques nuances d'aciers nitrurés avec les duretés HV.

Nuances	Dureté HV
XC 38	800
35 CD 4	900
30 CD 12	1000
30 CAD 6 – 12	1300
Z 6 CN 18 – 09	1200

5.7.3. La cyanuration et la carbonitruration

5.7.3.1. 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 ou 860°C, dans des bains contenant 20 à 25 % NaCN, 25 à 50 % NaCl et 25 à 50 % Na₂CO₃, 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 mm. 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, BaCl₂ 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.

5.7.3.2. La carbonitruration

La carbonitruration est un procédé de durcissement superficiel des pièces en acier que l'on chauffe dans une atmosphère gazeuse (CO + N₂ + C₃H₈), permettant au métal d'absorber simultanément du carbone et de l'azote. Ce traitement est suivi d'une trempe. 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 AC₃. 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 carbonituration 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.

5.7.4. La métallisation par cémentation

C'est un traitement thermochimique qui consiste à saturer la couche superficielle de l'acier en éléments tels que aluminium, chrome, bore etc. Après traitement, l'acier acquiert plusieurs propriétés importantes telles que la tenue à chaud et à l'usure accrue, la résistance à la corrosion et la dureté.

5.7.4.1. La chromisation

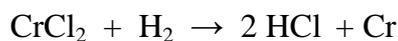
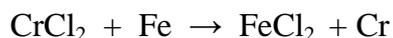
C'est la saturation en chrome de la couche superficielle des pièces de l'acier, par diffusion du chrome en milieu pulvérulent à une température supérieure à A_{C_3} , (1000 à 1050 °C). Généralement la chromisation augmente la tenue à la corrosion jusqu'à 800°C et celle des aciers à teneur élevée en carbone (> 0,3 à 0,4 % C) (chromisation dure) augmente la dureté et la tenue à l'usure.

La chromisation s'effectue dans des poudres formées essentiellement du ferro-chrome et d'une matière poreuse. Les pièces sont mises en caisses et entourées de ce mélange. Une circulation d'hydrogène est assurée de bas vers le haut.

A 1000°C, on introduit du chlorure d'hydrogène anhydre qui réagit avec le ferro-chrome selon la réaction :



Dont 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. La dureté de la couche formée par une chromisation douce (faible teneur en carbone) est de 250 à 300 HV, tandis que pour une chromisation dure (teneur 0,4 % C), peut atteindre de 1200 à 1300 HV, l'épaisseur est de 0,15 à 0,20 mm.

La chromisation est très employée pour les pièces constituants les machines à vapeur, soupapes, valves, tubulures, etc.

Il faut distinguer entre la chromisation et le chromage qui consiste à réaliser un dépôt électrolytique de chrome pour les aciers alliés, non alliés, trempés et non trempés. La couche obtenue est très dure (900 HV), mais assez fragile et peu résistante aux chocs thermiques.

5.7.4.2. 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 , qui assurent une dureté très élevée (1800 à 2000HV), 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°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 %) pulvéulents.

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.

5.7.4.3. La siliciuration

C'est la saturation en silicium de la surface de l'acier, ce qui donne à l'acier une bonne tenue à la corrosion, vis à vis des différents milieux, la siliciuration accroît quelque peu l'usure. L'opération s'effectue dans un mélange pulvérulent (75 % de ferro-silicium + 20 % de chamotte et le reste H_4Cl), ou le plus souvent, dans un milieu gazeux ($SiCl_4$), obtenue en faisant passer du chlore par un espace réactif contenant les pièces à traiter et du ferro-silicium ou du carbure de silicium.

La température de saturation est de 950 à 1000°C. La couche siliciurée se distingue particulièrement par une porosité accrue, sa profondeur est de 0,3 à 1 mm, mais caractérisée par une faible dureté (200 à 300 HV).

La siliciuration est appliquée aux pièces utilisées dans l'équipement chimique, du papier, du pétrole etc.

5.8. Durcissement superficiel par écrouissage

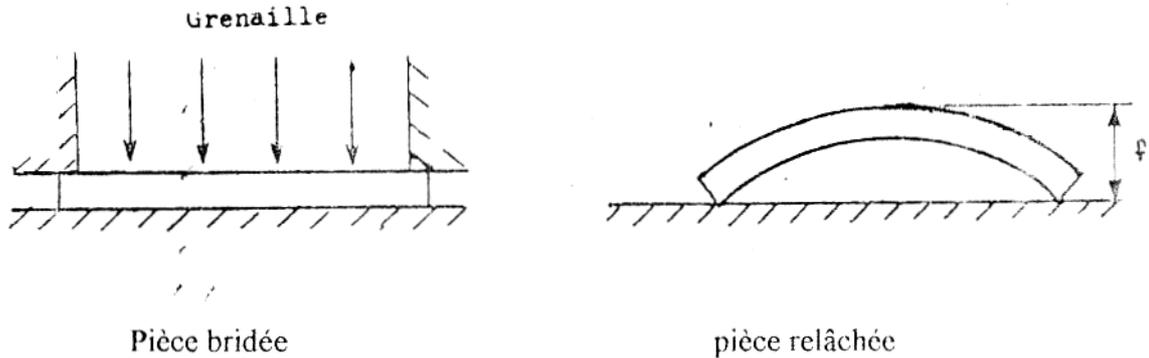
C'est un procédé mécanique qui consiste à créer des micro-déformations plastiques dans les couches superficielles des pièces, ce qui peut avoir deux effets :

- 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.

5.8.1. Le grenailage

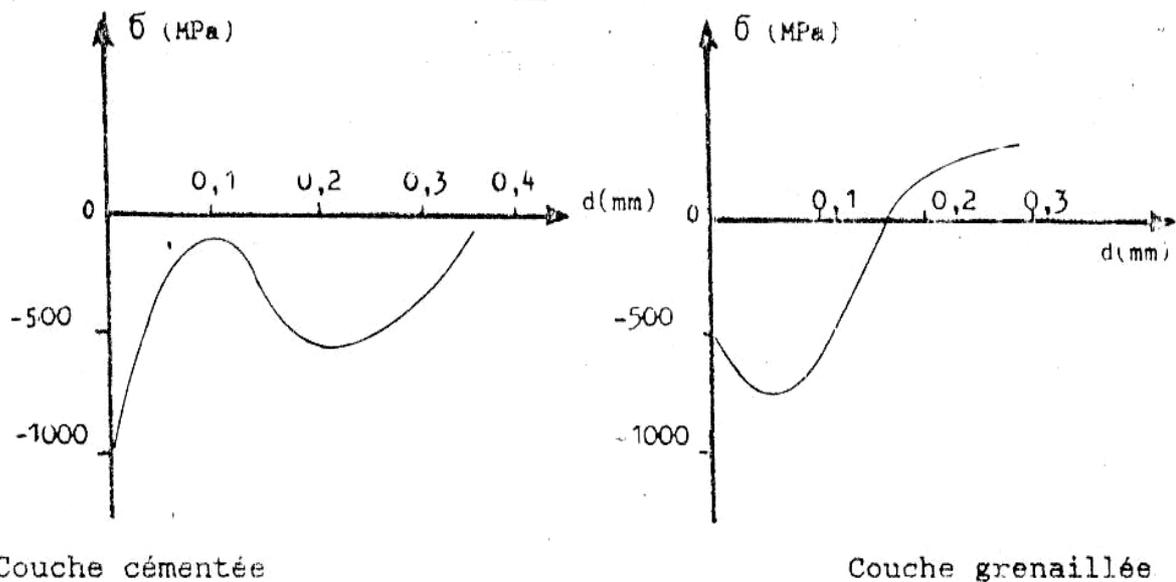
Le principe consiste à projeter à l'aide de turbines, de la grenaille en fonte ou en acier avec des vitesses de l'ordre de 80 m/s. Les impacts de la grenaille (généralement des billes de petit diamètre), créent sur la surface des micro-empreintes juxtaposées. On peut mettre en évidence, ces contraintes et montrer que ce sont des contraintes de compression par l'essai ALMEN. Cet essai consiste à grenailer une pièce bridée qu'on relâche ensuite, et on mesure la flèche f , voir figure 198.



Déformation d'une pièce par grenailage
(fig. 198)

Les contraintes peuvent être mesurées par deux méthodes :

- L'une destructive appelée méthode de SACHS, elle permet de tracer le profil des contraintes en fonction de l'épaisseur des pièces (fig. 199).
- L'autre non destructive utilise les rayon x et ne permet que la mesure des contraintes en surface.



Profil de répartition des contraintes normales à la surface en fonction de l'épaisseur d .

(fig. 199)

5.8.2. Le galetage

Sur les pièces de révolution, on applique un galet toroïdal en acier trempé. On écrouit ainsi les gorges, les congés de raccordement, etc.

5.8.3. Le brunissage

C'est une méthode qui consiste à mater le bord des trous par pression et rotation d'un outil conique. L'écrouissage superficiel a pour effet de relever l'endurance en fatigue et s'applique à de nombreuses pièces : ressorts de soupapes, ressorts de suspension, aubes de turbines, etc.

5.8.4. Autres procédés de durcissement

Rappelons qu'il existe aussi d'autres techniques de durcissement.

5.8.4.1. Durcissement par introduction d'atomes étrangers

Cette méthode consiste à introduire des atomes étrangers en substitution ou en insertion dans le réseau du métal de base. Elle est très utilisée dans le cas du titane non allié et des métaux purs comme l'aluminium et le cuivre.

5.8.4.2. Durcissement par transformation ordre-désordre

L'opération consiste à réarranger les atomes d'un alliage initialement réparti au hasard en deux réseaux distincts et qui s'interpénètrent

5.8.4.3. Durcissement par pression

Ce durcissement consiste à réaliser directement un mélange par frittage de particules métalliques ou non, très peu solubles dans la matrice métallique (utilisé surtout en métallurgie des poudres).

5.8.4.4. Durcissement structural ou par précipitation

Le principe consiste à faire précipiter uniformément dans l'alliage, une phase présentant un certain degré de cohérence avec la matrice. Cette méthode est très pratique pour les alliages légers tels que AU4G, AU4N, AZ6G, aciers maraging, etc.