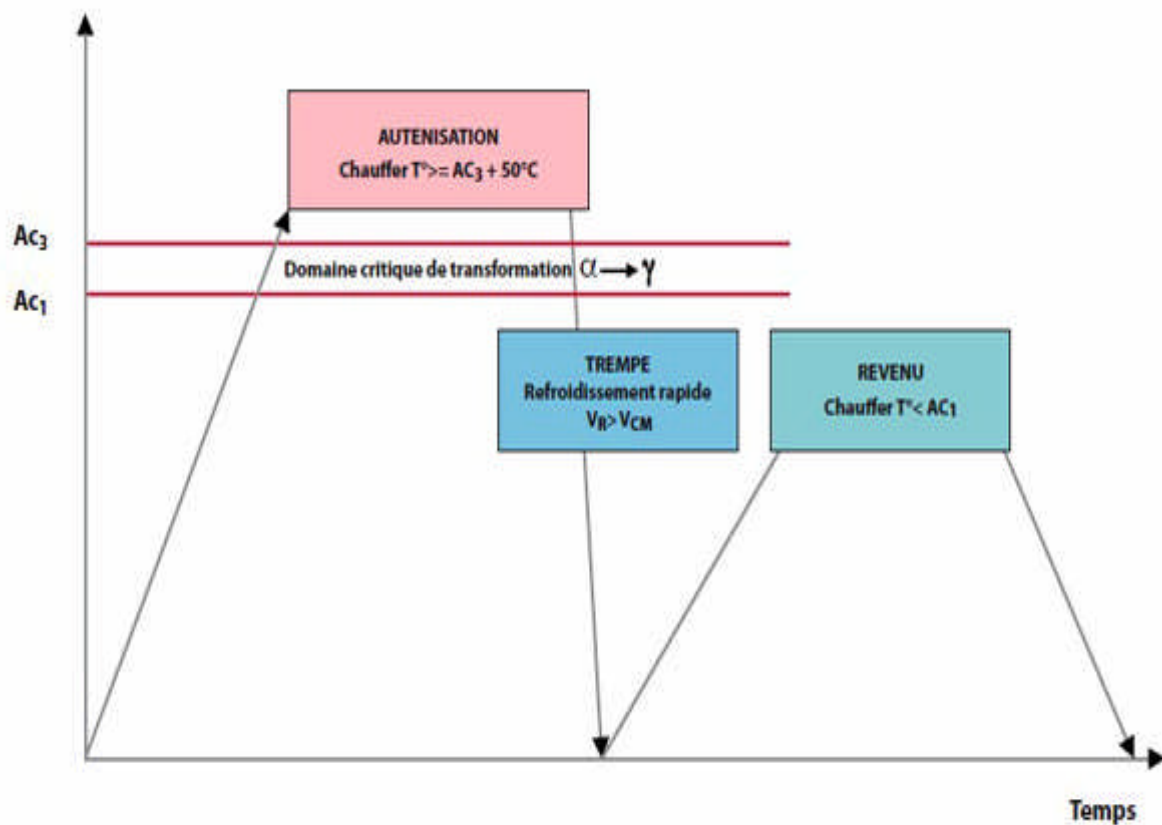


SAID BENZAADA

TRAITEMENTS THERMIQUES, CLASSIFICATION ET DESIGNATION DES ACIERS ET FONTES



SOMMAIRE

1. TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS.....	4
1 .1. Définitions et procédés des traitements thermiques.....	4
1.2. Transformations isothermes.....	11
1.3. Variation de la grosseur du grain d'austénite en fonction de la température.....	17
1.4. Gammes des traitements thermiques de l'acier.....	22
1.5. Défauts des traitements thermiques de l'acier.....	77
1.6. Traitements thermochimiques de l'acier.....	78
1.7. Principaux types de traitements thermochimiques de l'acier.....	83
1.8. Durcissement superficiel par écrouissage.....	99
2. CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES.....	103
2.1. Classification des aciers.....	103
2.2. Aciers à outils.....	126
2.3. Aciers et alliages spéciaux.....	137
2.4. Classification des fontes.....	141
3. DESIGNATION NORMALISEE DES ACIERS ET DES FONTES.....	155
3.1. Désignation des aciers.....	155
3.2. Désignation normalisée des fontes	164

PREFACE

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 subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

Cet ouvrage traite les fondements technologiques des traitements thermiques des aciers ainsi que leurs classifications, leurs désignations et leurs utilisations.

Il expose en détail les aspects purement métallurgiques des traitements thermiques. L'étudiant aura à s'imprégner de l'ensemble des techniques et modes des traitements thermiques ainsi que les transformations structurales et modification des caractéristiques qui les accompagnent.

L'auteur.

1. TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS

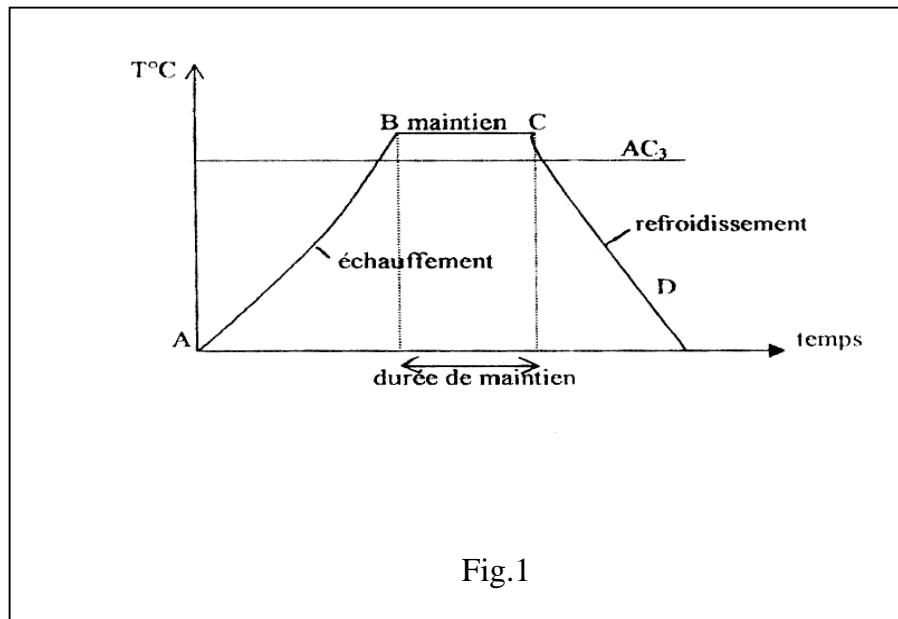
Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- d. 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.
- e. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- f. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subi 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.

1.1. 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. 1).



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

1.1.1. 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.

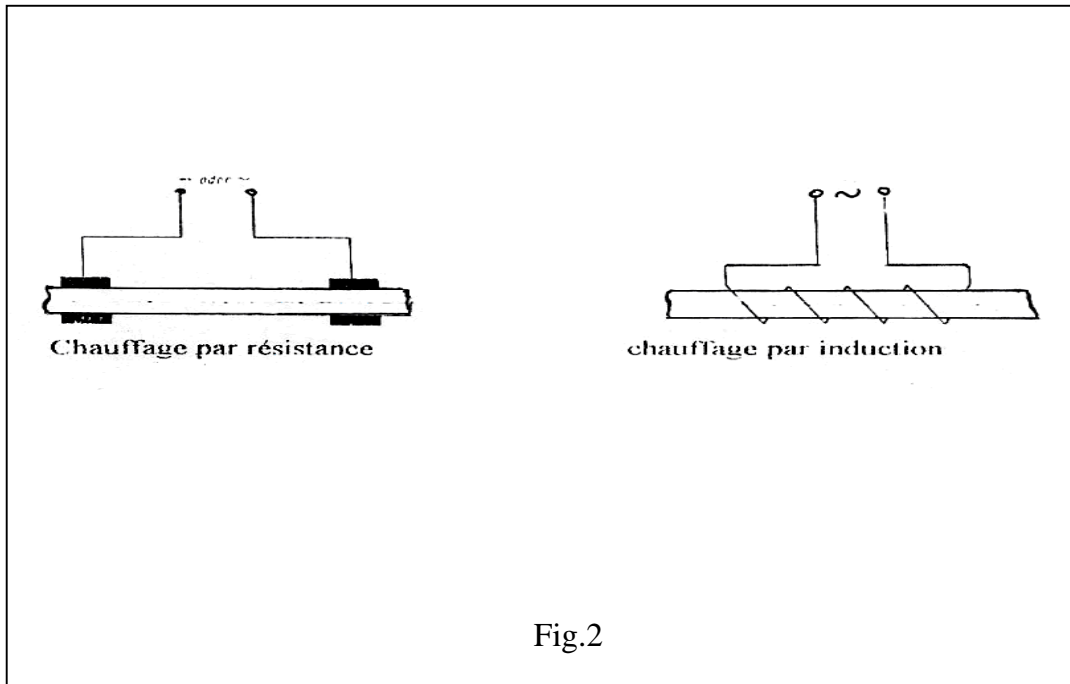
- **Par convection :** Dans ce cas, la pièce est chauffée par contact avec un fluide chaud (gaz ou liquide) qui se déplace et lèche la pièce en lui cédant une grande partie de la chaleur dépensée.

- **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 2.



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.

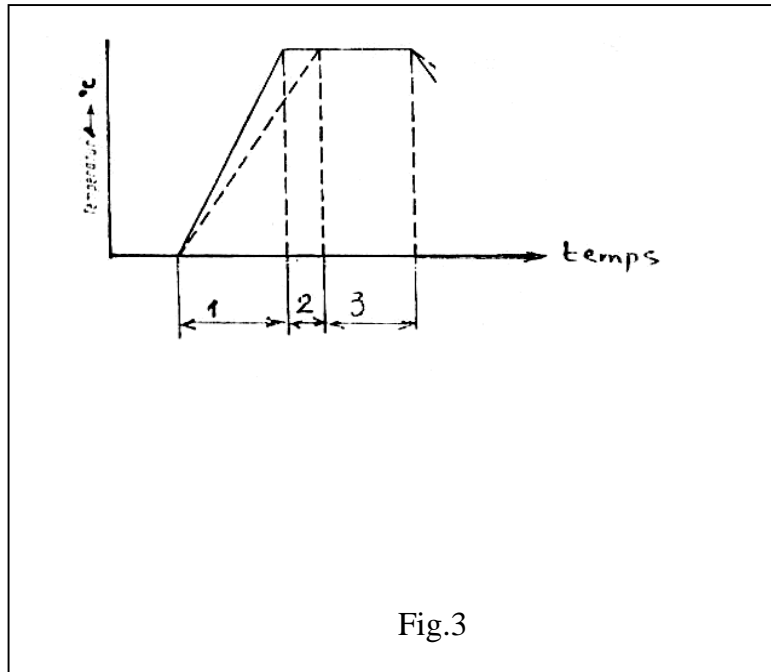
Cette méthode est rentable seulement pour des sections inférieures à 150 mm.

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 3 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 :



- a. **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.
- b. **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.
- c. **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.

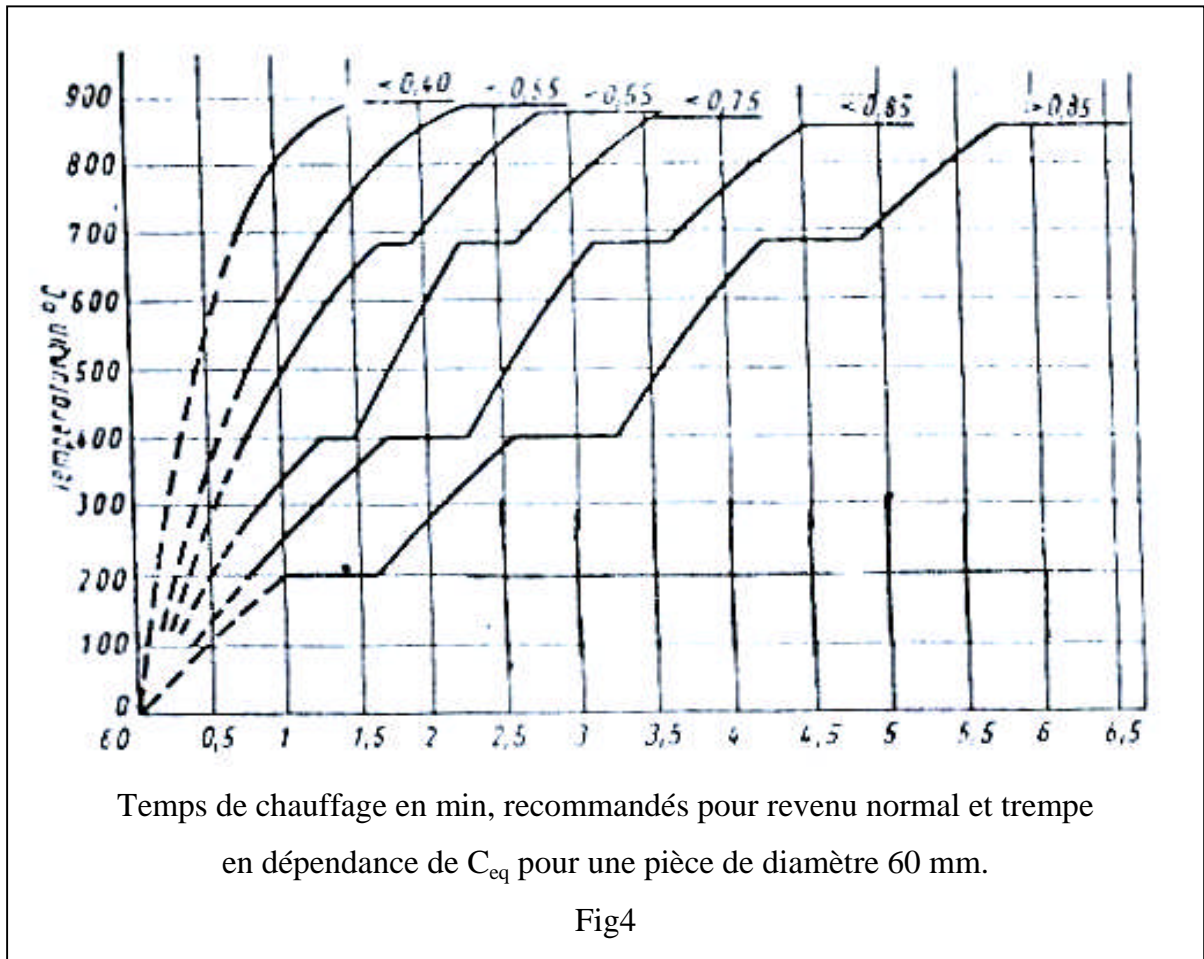
Les facteurs principaux, qui influent sur le chauffage de la pièce sont le diamètre (épaisseur), conductibilité, température du four, etc. En général le régime de chauffage pour les aciers est déterminé selon le diamètre de la pièce et les caractéristiques qui sont définis

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. 4) 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.



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.

1.1.2. 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

1.1.3. 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

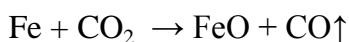
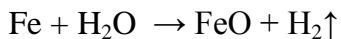
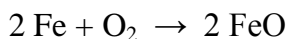
c. Fours électriques :

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 :

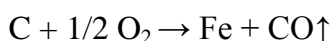
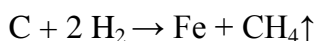
Lorsque les pièces sont chauffées jusqu'aux hautes températures dans ces fours à flammes ou dans les fours électriques, les gaz entrent en réaction avec la surface du métal, ce qui entraîne l'oxydation ou la décarburation des couches superficielles des pièces.

- 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 \leftrightarrow réduction

Décarburation \leftrightarrow 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.

1.1.4. 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.

1.2. 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.5).

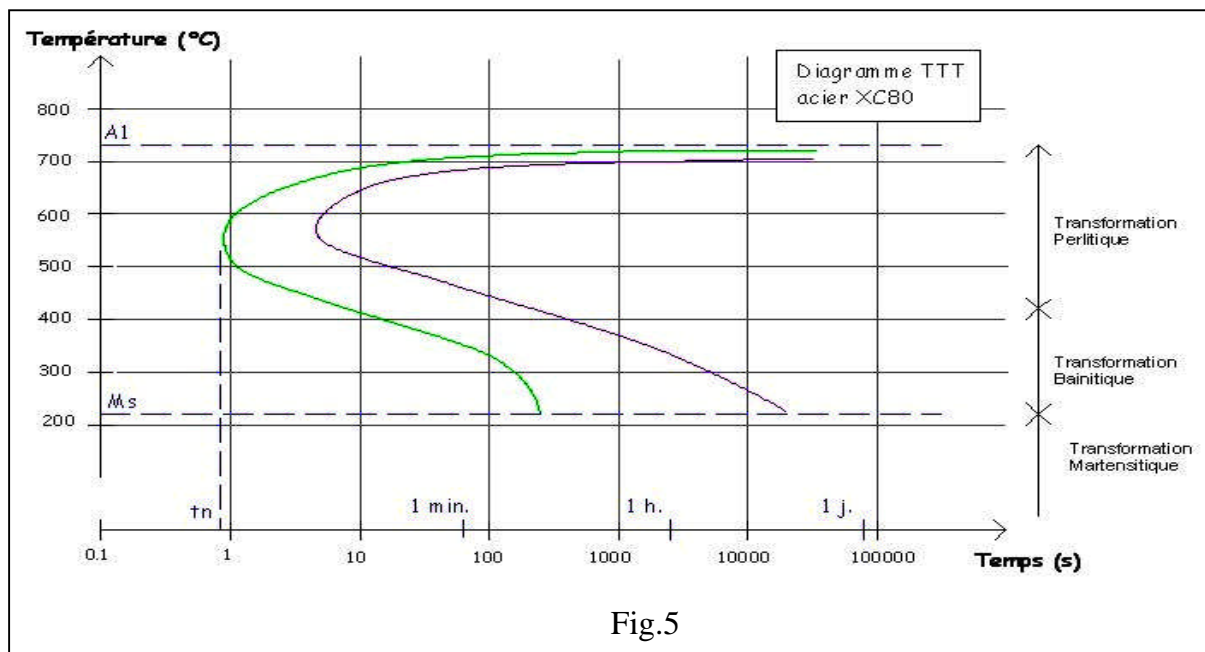


Fig.5

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 préeutectoïde, 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.

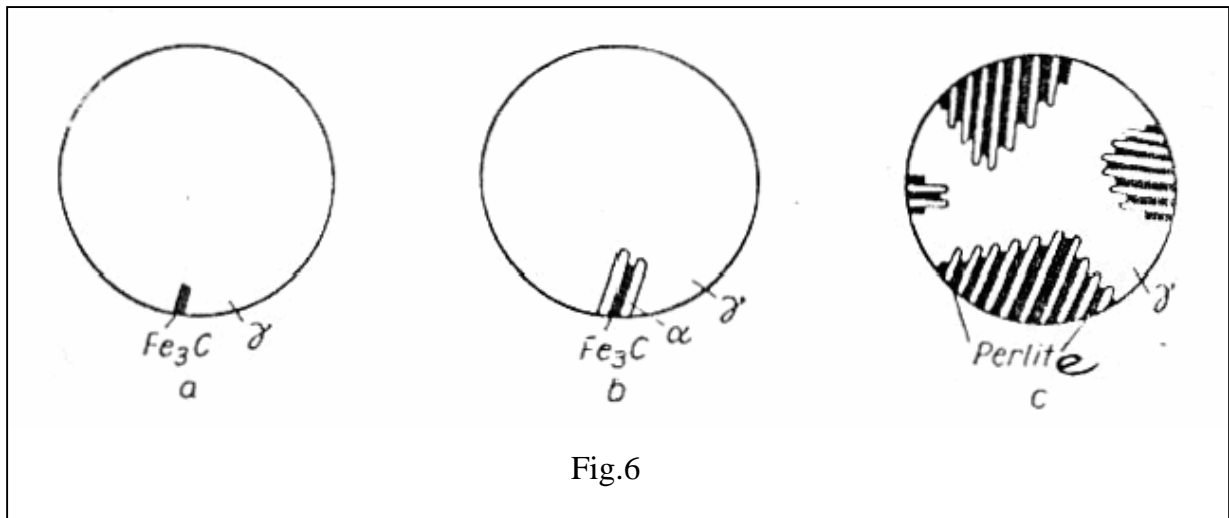
Un acier porté à une température supérieure à A_3 devient austénitique et par refroidissement à une vitesse suffisante, on obtient de la martensite qui correspond au maximum de dureté.

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.

1.2.1. 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 ($Fe\alpha +$ cémentite). La figure 6 donne les différentes étapes de la formation de la perlite (transformation austénite en perlite).



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).

1.2.2. 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 7.

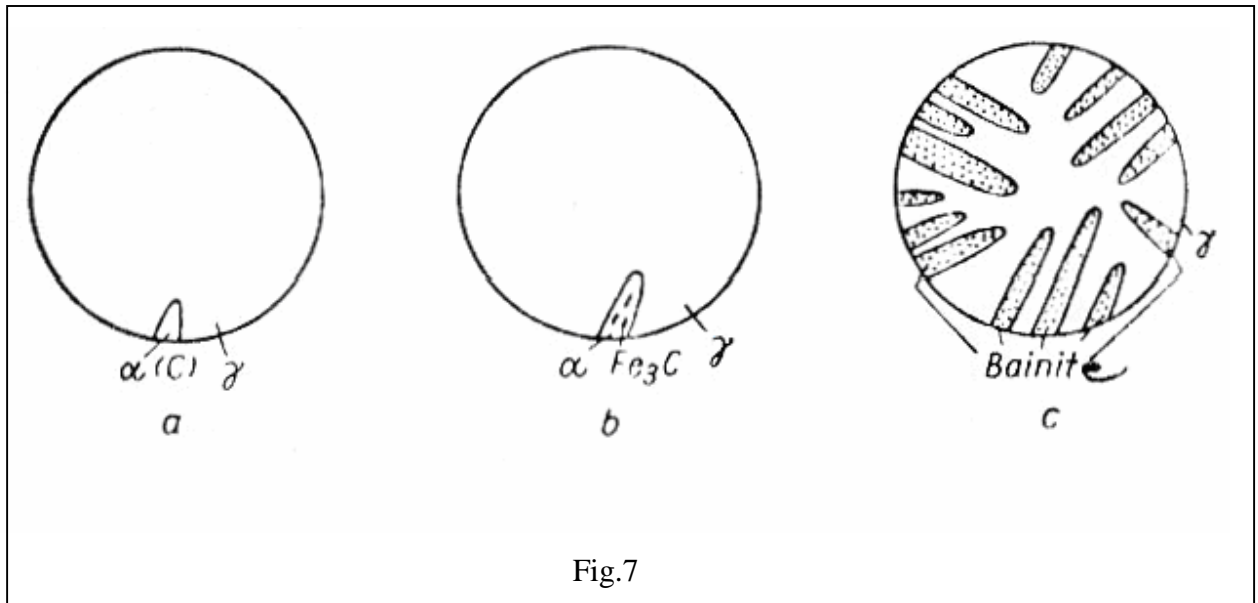


Fig.7

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.

1.2.3. 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 refroidissements continus, les diagrammes TTT ne correspondent plus à cette réalité, mais il existe d'autres types de diagramme appelés diagramme de surfusion. La figure 8 nous donne une idée de l'influence de la vitesse de refroidissement sur les différentes transformations de l'austénite.

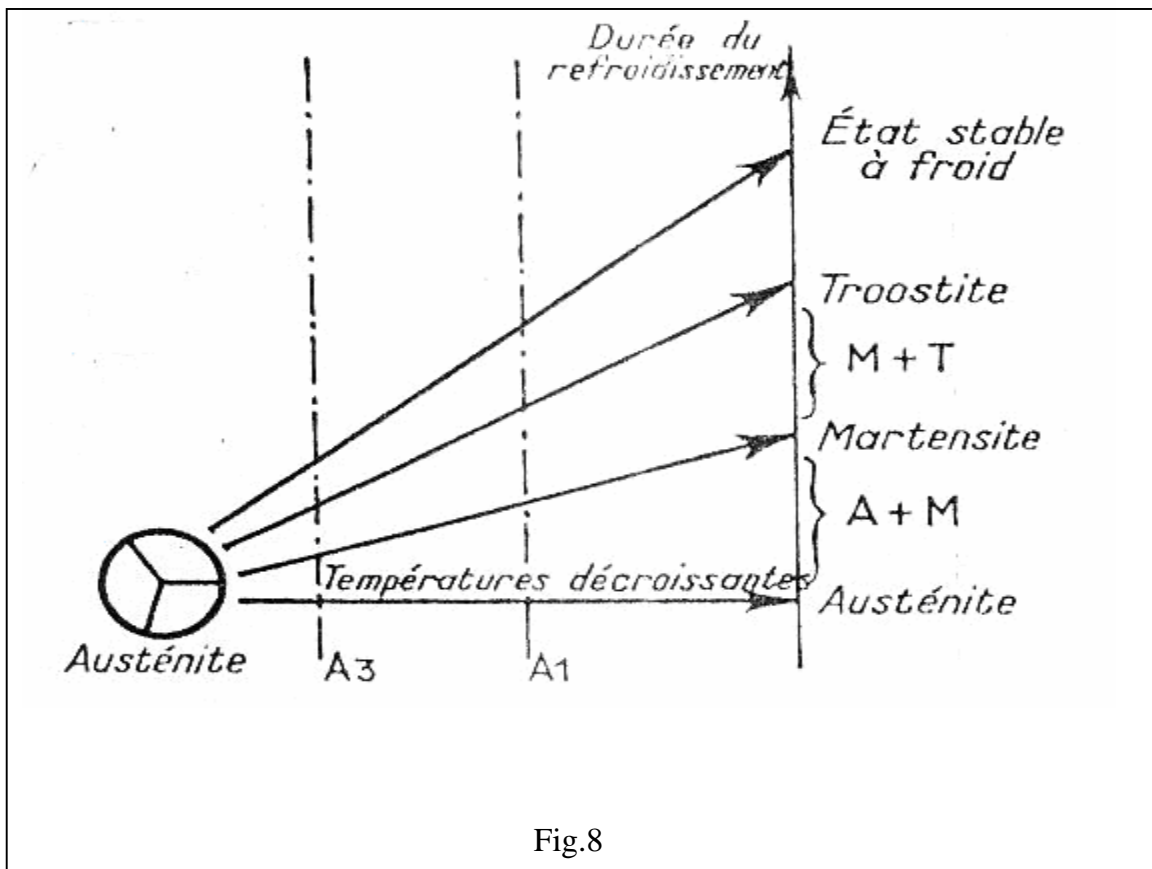


Fig.8

Quand la température du milieu de trempe 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).

1.3. 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 stables.

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

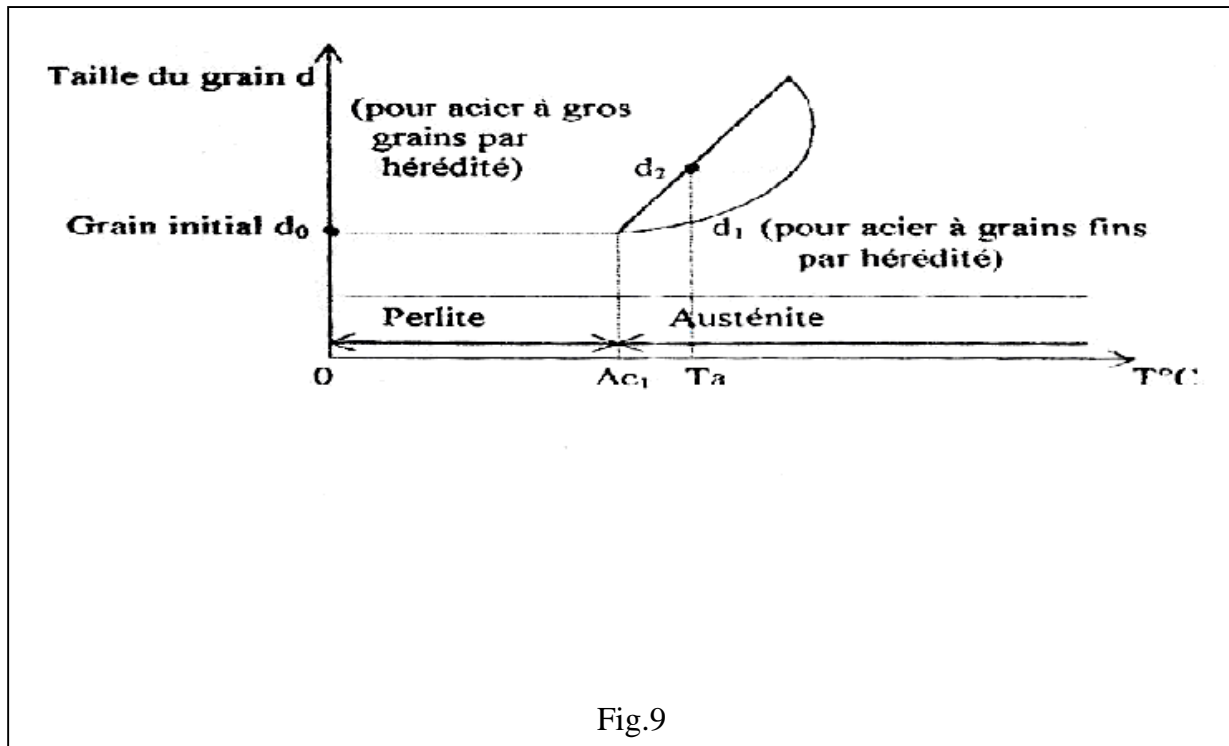
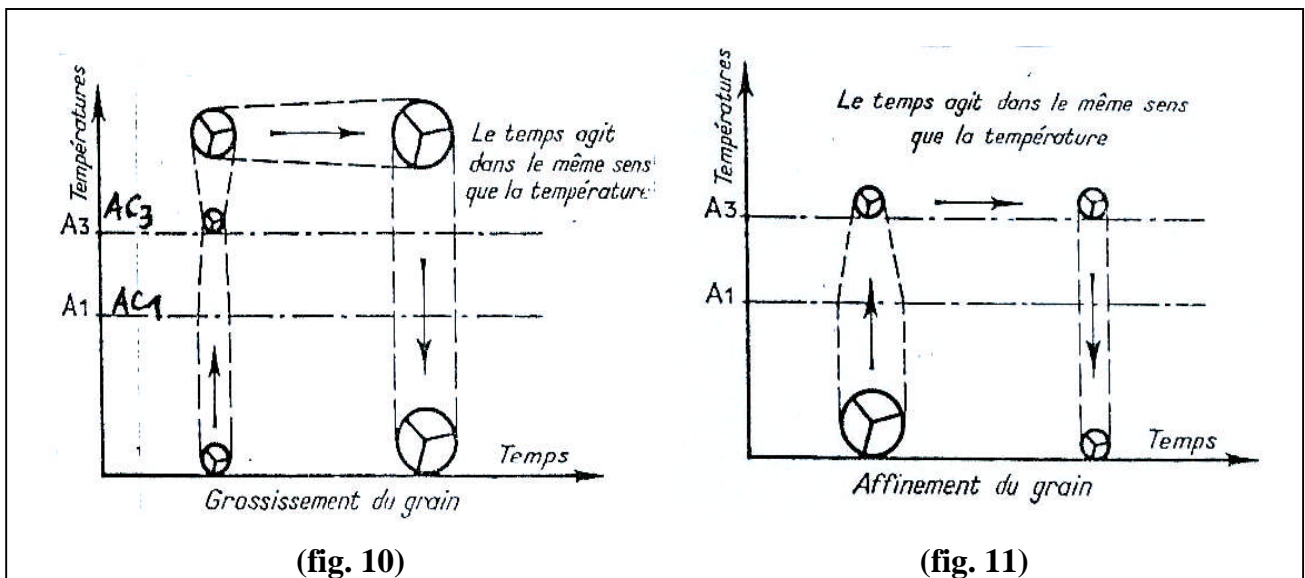


Fig.9

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 10 et 11 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.

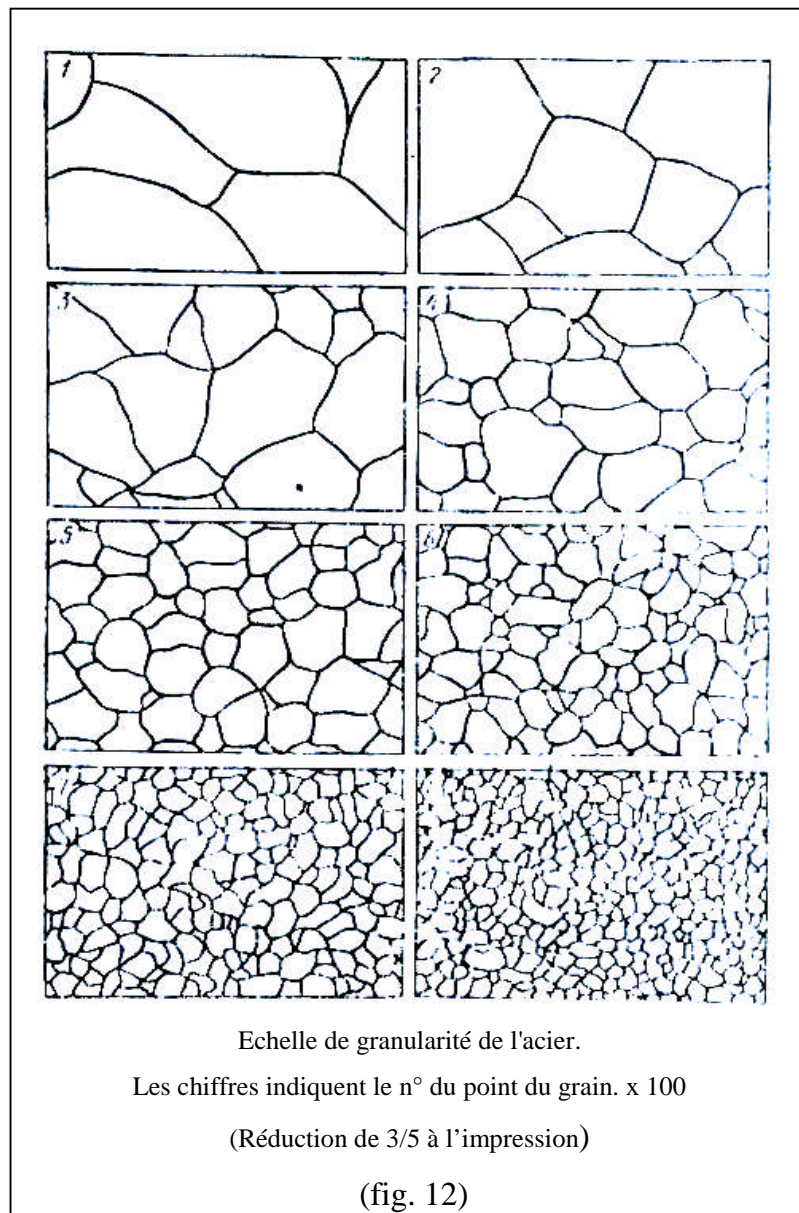


Sur la figure 10, entre AC_1 et AC_3 , les grains se divisent. de grains plus petits et en plus grands nombre se forme le phénomène qui sera au maximum à la température AC_3 . Au dessus de AC_3 , le phénomène inverse se produit, le grain grossit en fonction de la température atteinte et la durée de maintien 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 11, 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. 12).

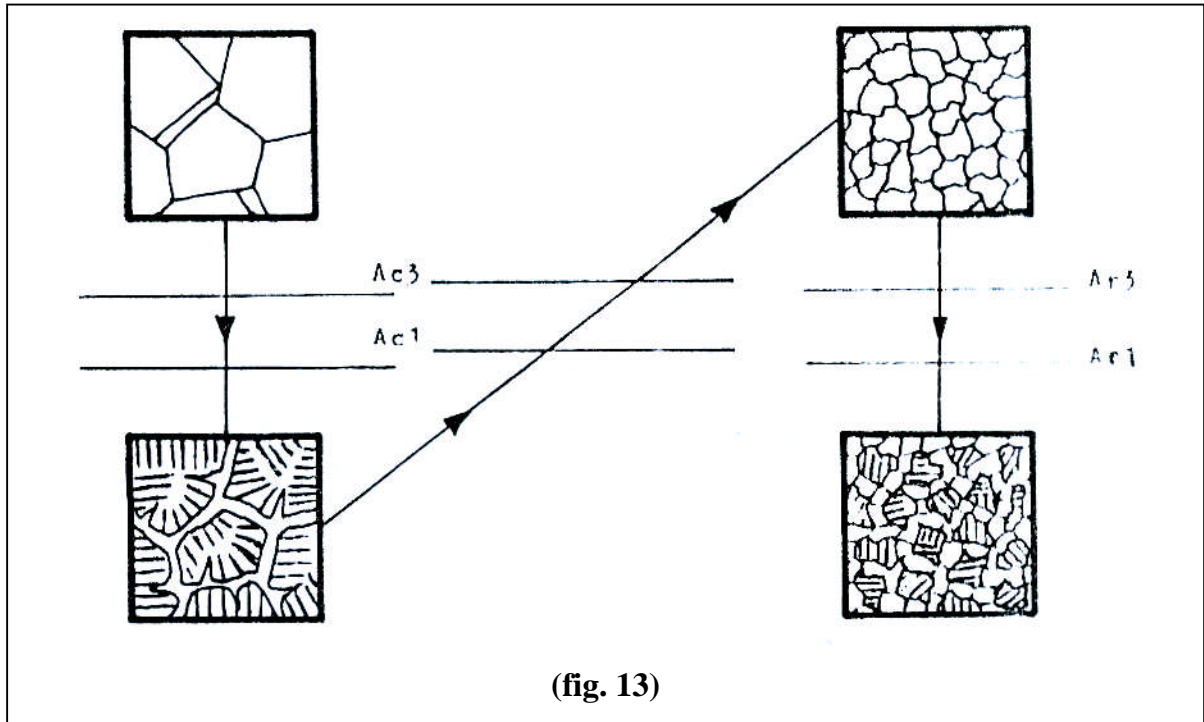


Donc la grosseur du grain d'austénite réel est déterminée par la température de chauffage, la durée de séjour à cette température et l'aptitude de l'acier à la croissance du grain pendant l'échauffement. Un acier est dit "surchauffé" lorsque son échauffement jusqu'à une température nettement supérieure 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. 13). Il est préférable d'éviter les surchauffes de l'acier en raison d'une éventuelle décarburation superficielle qui se produit.

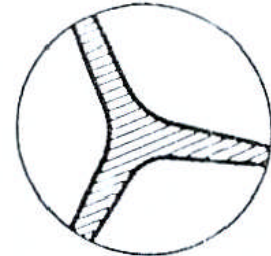
Un acier est dit "brûlé" lorsque la température de chauffage est plus poussée et l'atmosphère est oxydante. La brûlure est un défaut irréparable à cause de la formation des oxydes de fer aux joints de grains.

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.



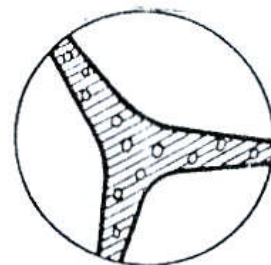
Les différents cas de brûlures sont représentés sur les figures 14, 15 et 16.

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



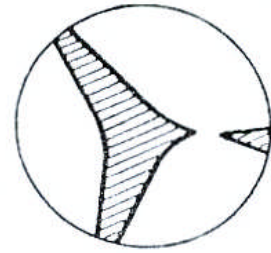
(fig. 14)

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



(fig. 15)

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



(fig. 16)

1.4. 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.

1.4.1. Le recuit

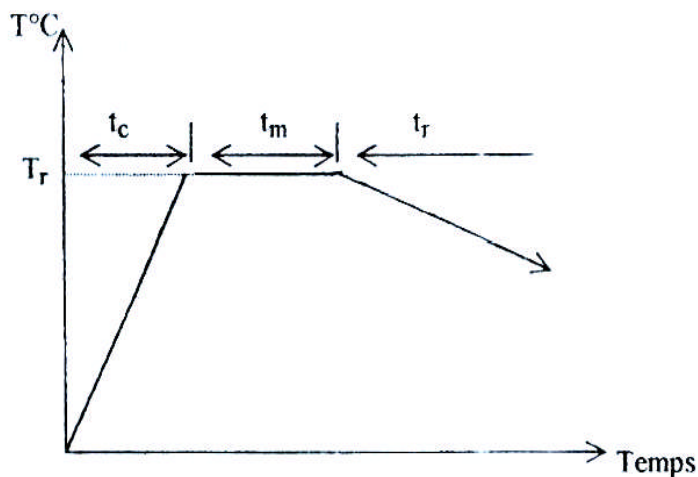
Les aciers possèdent un caractère apte d'acquérir grâce à des traitements thermiques variés, toute une gamme de propriétés très différentes. Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Ils tendent à réaliser l'équilibre structural en faisant disparaître les 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.17).



T_r : température de recuit.
 t_c : temps de chauffage.
 t_m : temps de maintien
 t_r temps de refroidissement.

(fig. 17)

1.4.1.1. 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.

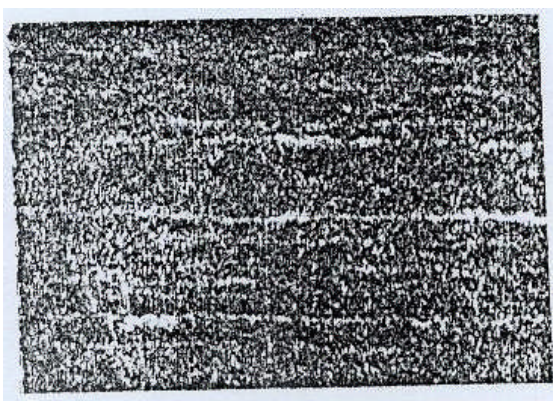
1.4.1.2. Recuit d'homogénéisation (diffusion)

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.

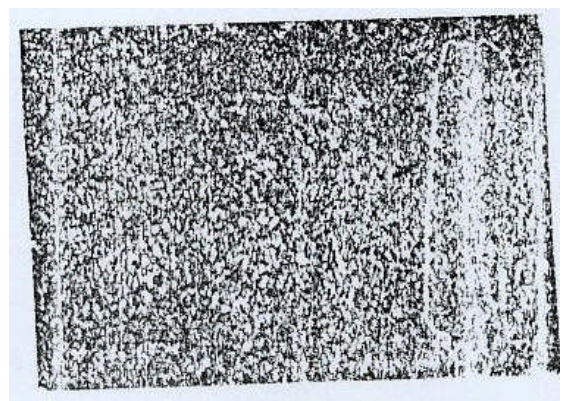
L'élimination ou l'affaiblissement de ce défaut est possible seulement lors du chauffage poussé 1100 à 1200°C, sans toutefois atteindre le domaine de surchauffe du métal qui provoque un grossissement indésirable du grain. Donc ce n'est qu'à ces températures que peut être assurée la diffusion la plus 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 18 et 19 présentent respectivement l'état de structure d'un acier avant l'homogénéisation (répartition non uniforme du carbide) et après homogénéisation répartition uniforme du carbide).

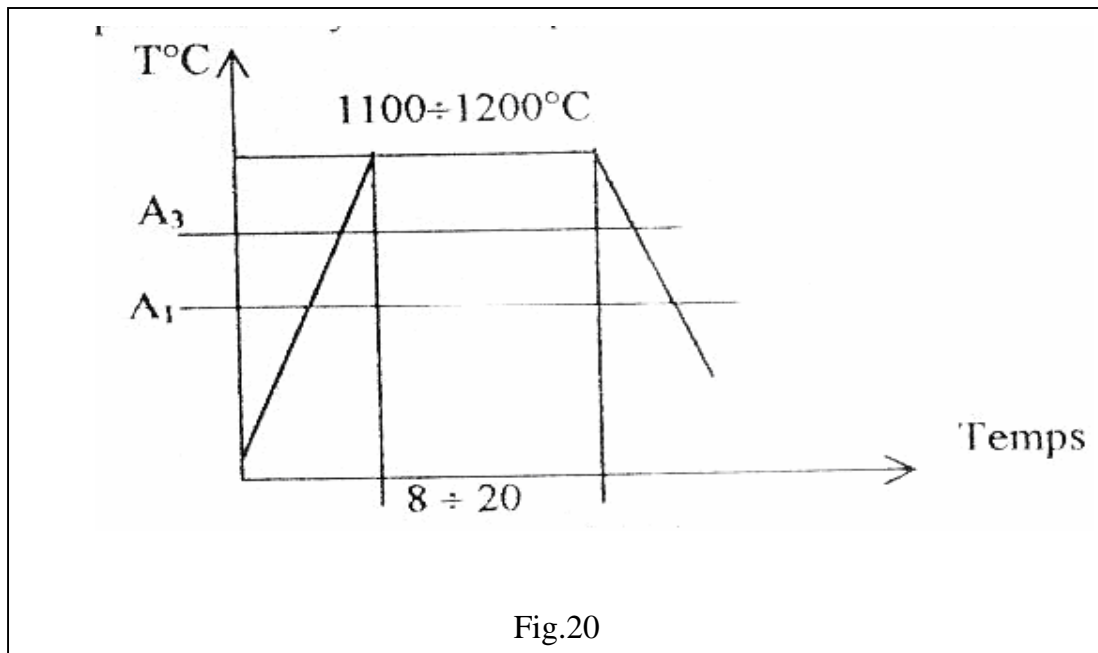


(fig. 18)



(fig. 19)

La figure 20 représente le cycle thermique d'un recuit d'homogénéisation.



1.4.1.3. 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. 21). Ce qui rend difficile le travail du matériel par déformation. Dans la structure du métal, à 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.

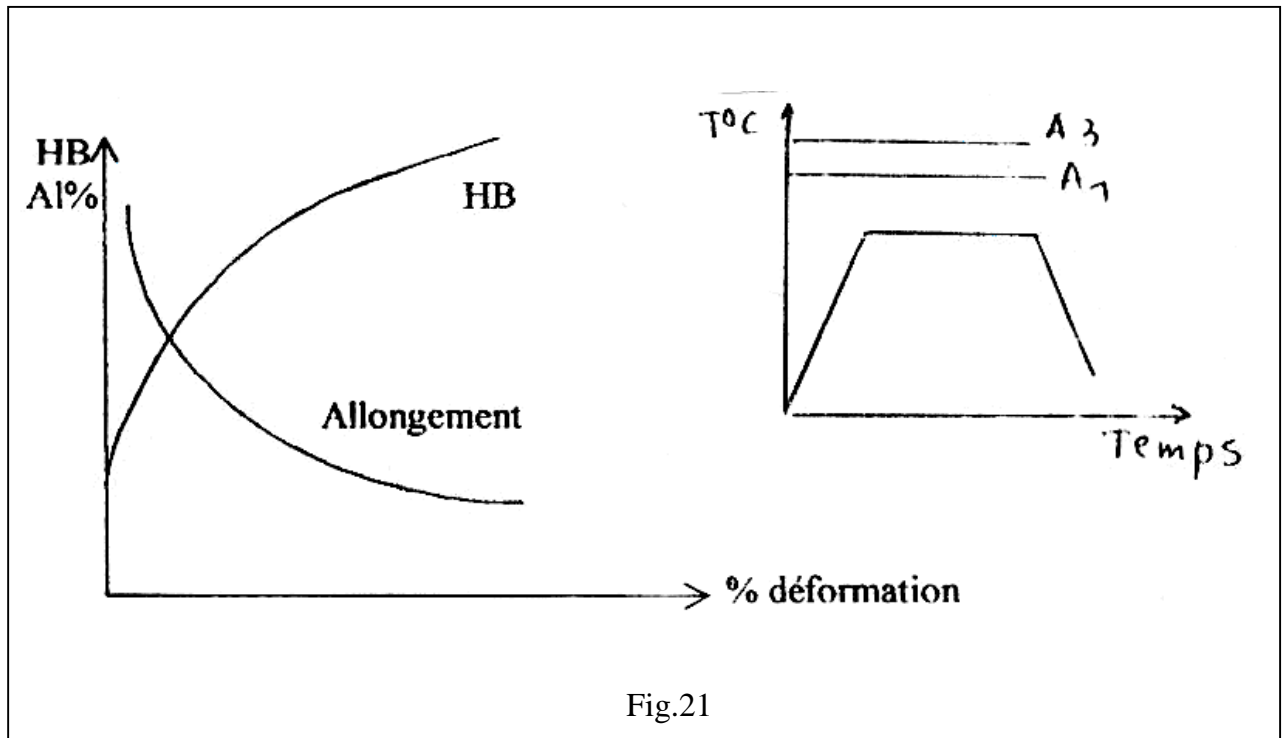


Fig.21

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.

1.4.1.4. 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 transformations.

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 :

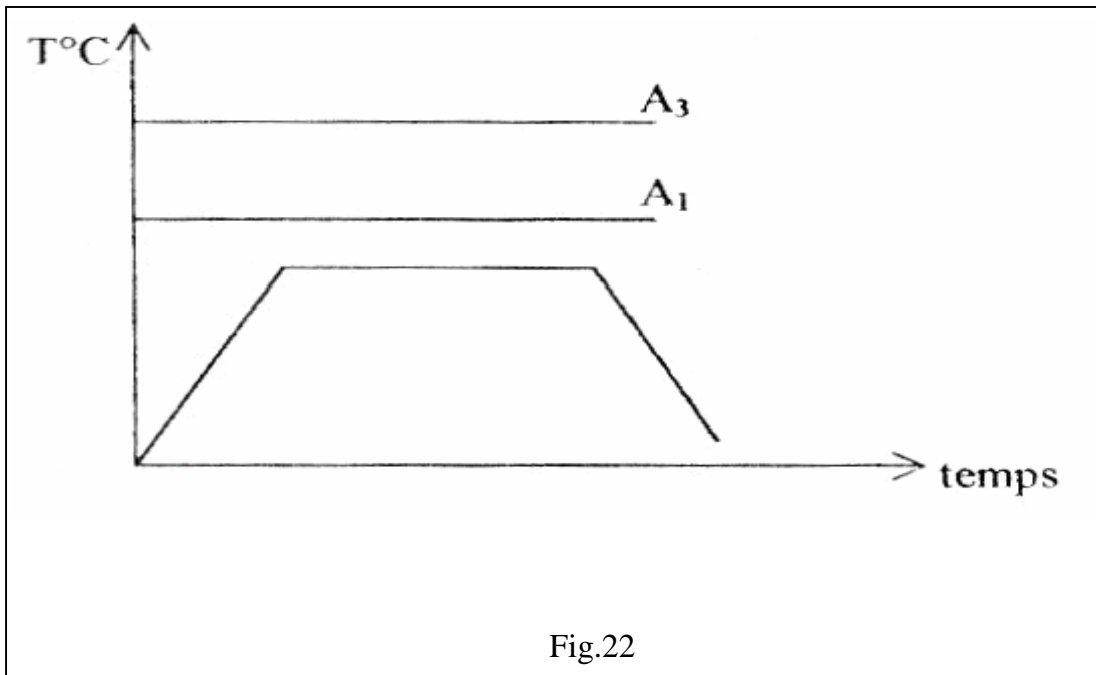
Elles peuvent s'étendre sur des dimensions microscopiques.

- Contraintes du troisième genre :

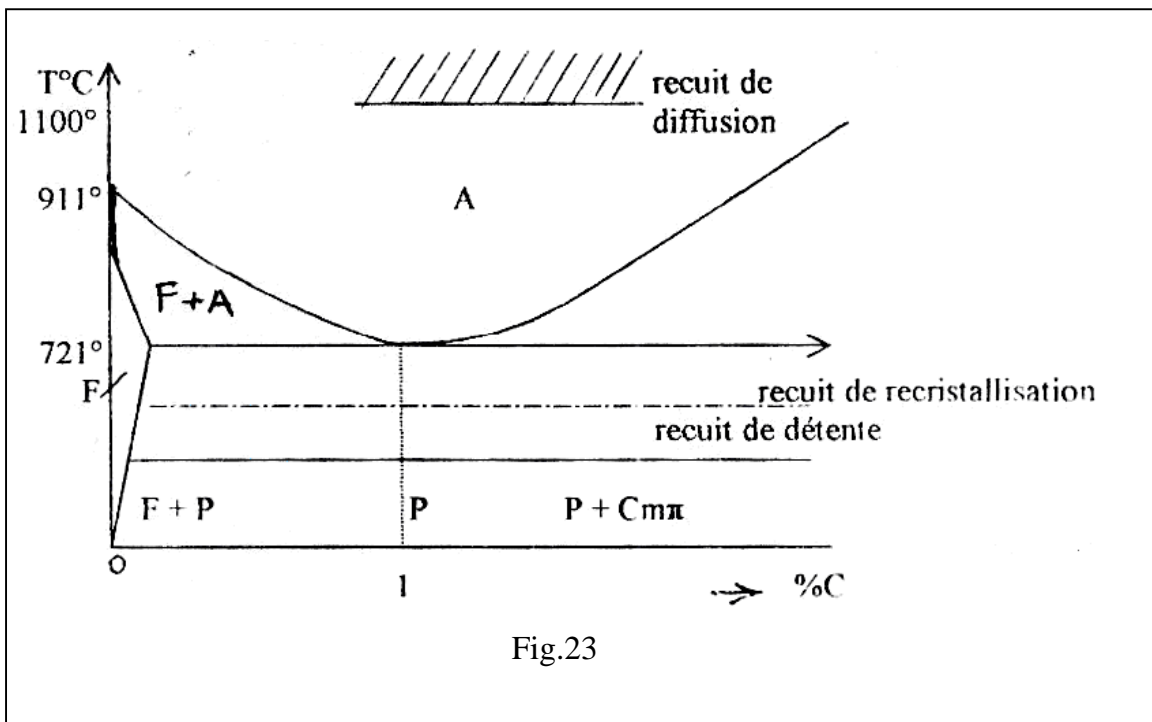
Elles peuvent s'étendre sur les dimensions atomiques

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 22 représente le cycle thermique d'un tel recuit.



La figure 23 représente le domaine de température des différents recuits du premier genre.



1.4.1.5. 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.

1.4.1.6. 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 à 50°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 24 représente le cycle thermique du recuit complet.

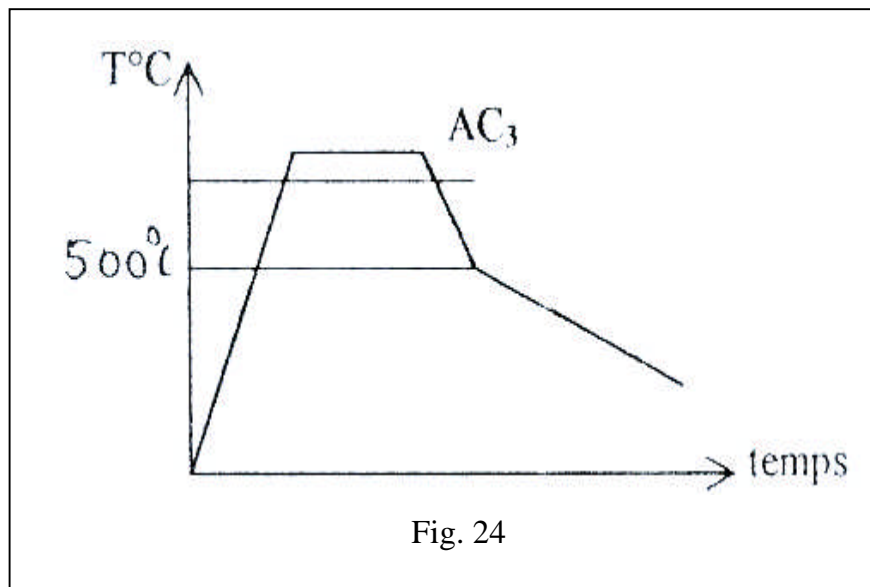


Fig. 24

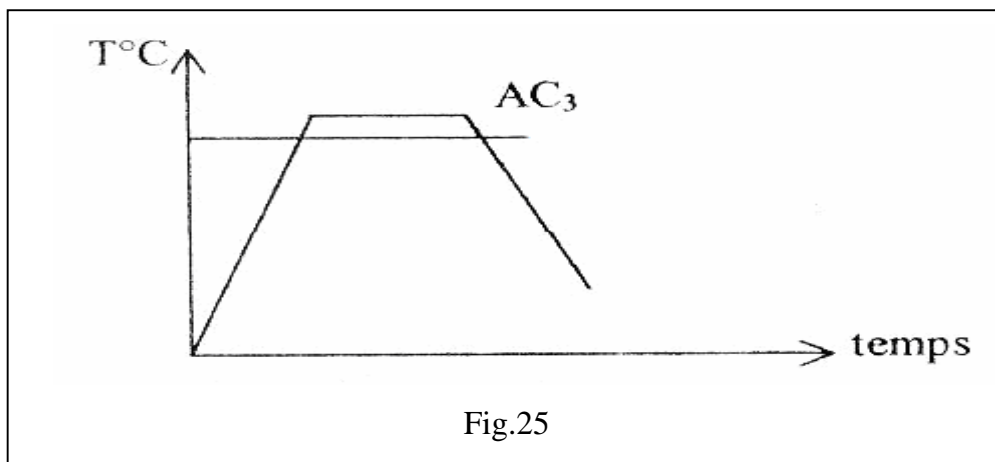
1.4.1.7. Recuit de régénération (affinage structural)

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 25.



1.4.1.8. 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. 26).

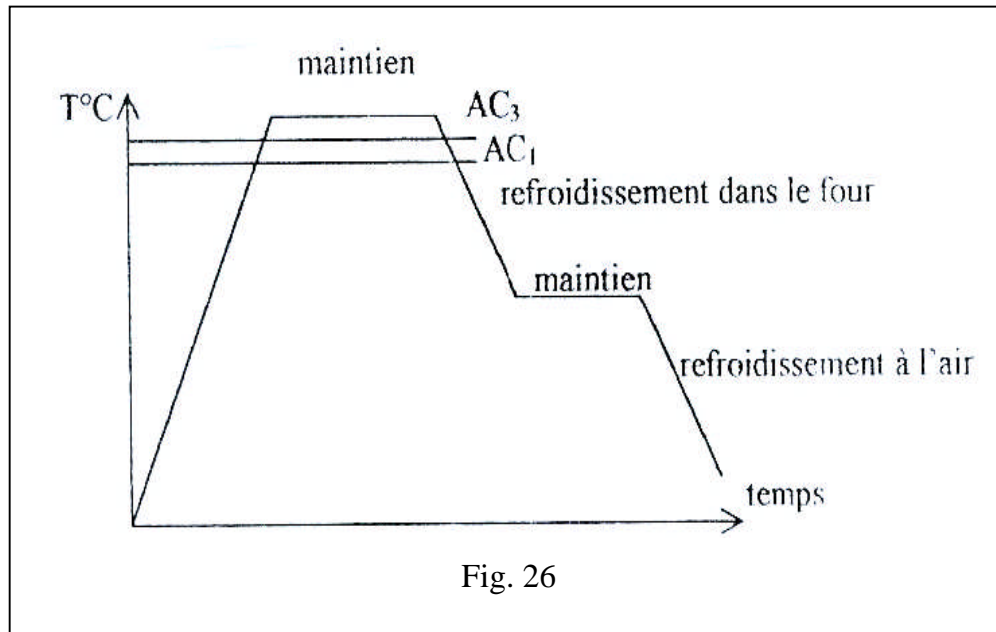


Fig. 26

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.

1.4.1.9. 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 eutectoides et hypereutectoides, c'est à dire, rend possible l'application de grandes vitesses de coupe tout en assurant un très bon fini. La figure 27 montre le processus schématique de globulisation de la cémentite à partir d'une perlite lamellaire.

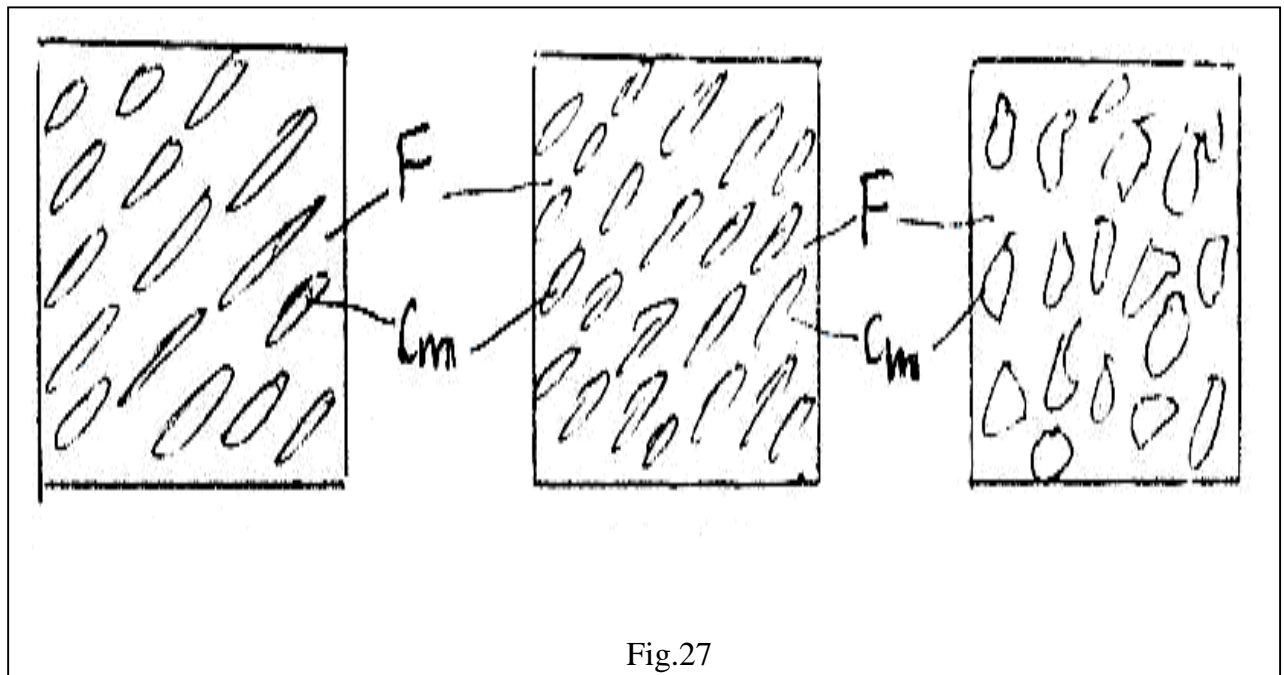


Fig.27

Les figures 28 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.

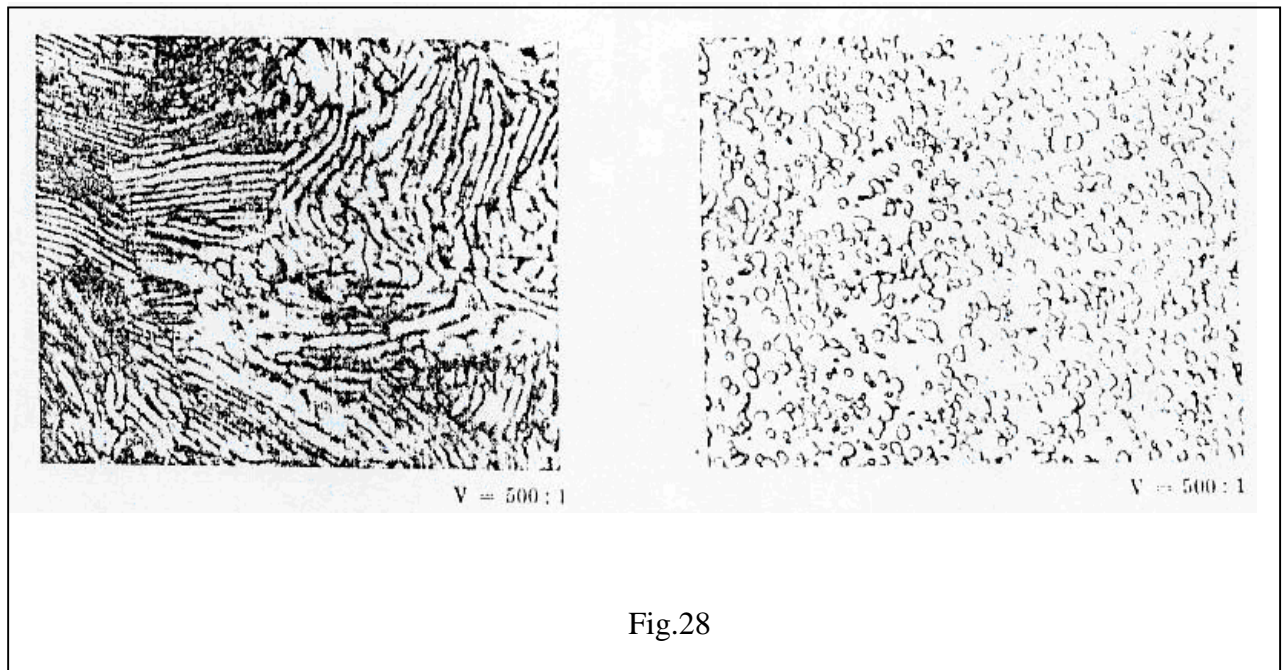


Fig.28

De même, les figures 29 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.

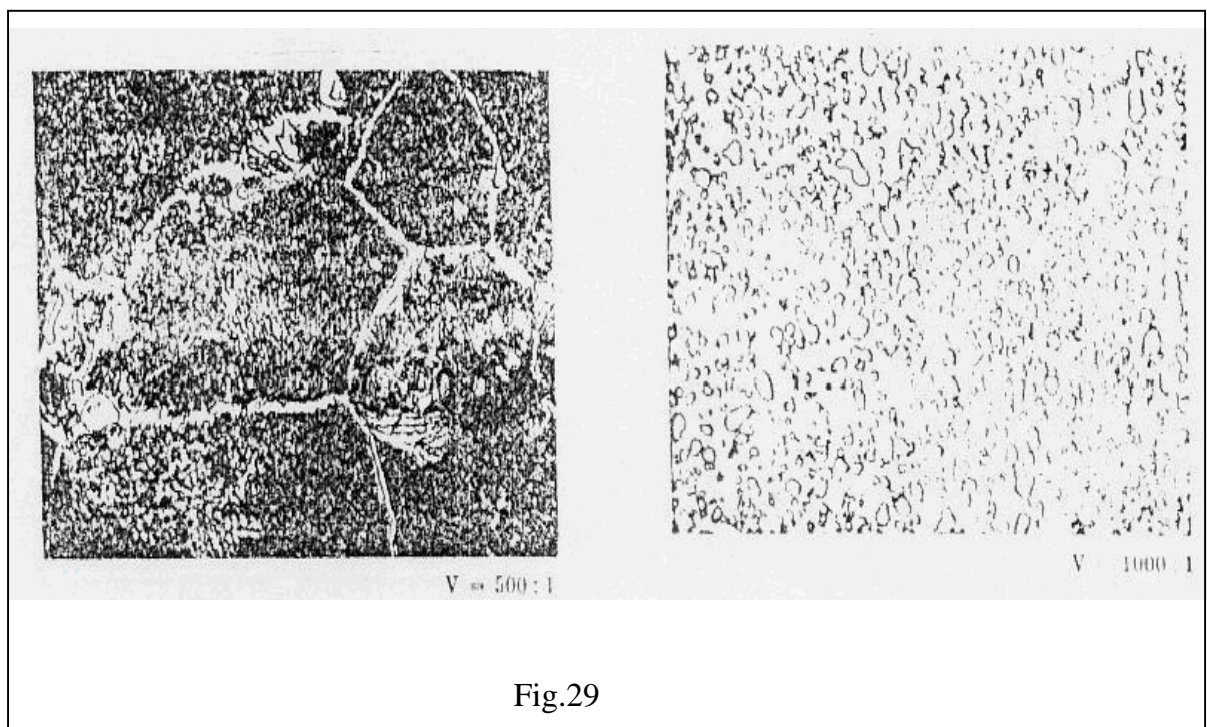


Fig.29

1.4.1.10. Recuit d'adoucissement

Ce type de recuit consiste au chauffage de longue durée de l'acier aux températures près de AC_1 ($650 - 680^\circ C$) suivi d'un refroidissement lent d'environ $10^\circ C/h$. pour les aciers à carbone, la température de chauffage étant de 650 à $750^\circ C$ (fig. 30).

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.

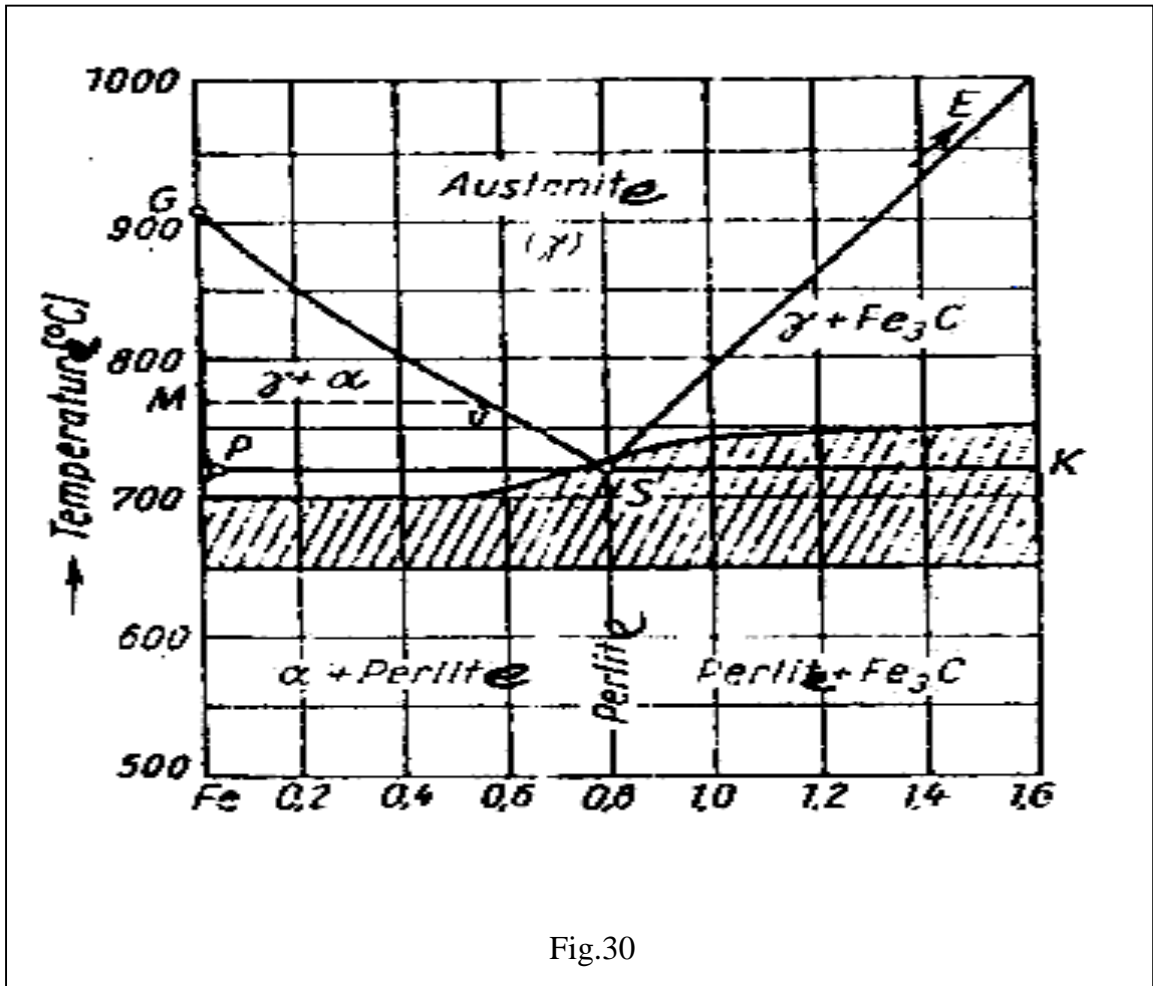


Fig.30

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

1.4.2. 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 A_{Cm} , 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'érouissage et les tensions internes.

La figure 31 représente le domaine de température de la normalisation.

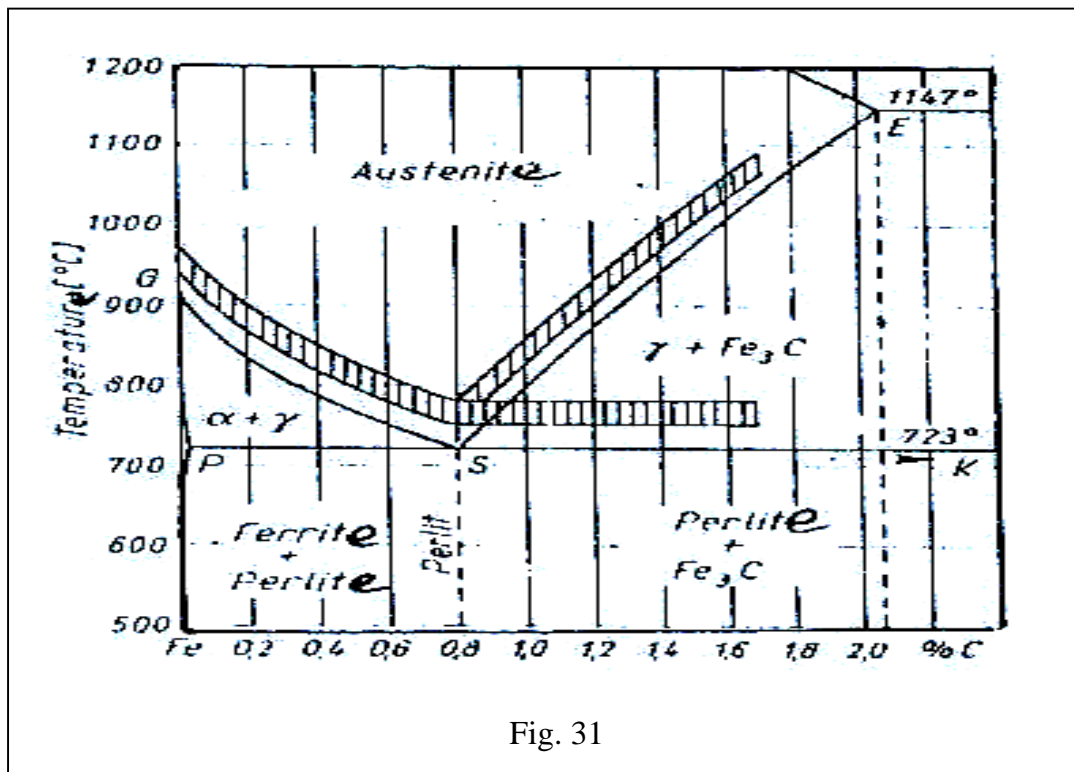


Fig. 31

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.

1.4.3. La trempe

La trempe consiste à un chauffage de l'acier à une température de 30 à 50°C au dessus de la ligne GOSK supérieure à celle de AC_3 , pour les aciers hypoeutectoïdes et supérieure à AC_1 , pour les aciers hypereutectoïdes.

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 est 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/mm^2 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.

1.4.3.1. Choix de la température d'austénisation

Les aciers hypoeutectoïdes doivent être chauffés de 30 à 50°C au dessus de AC_3 .

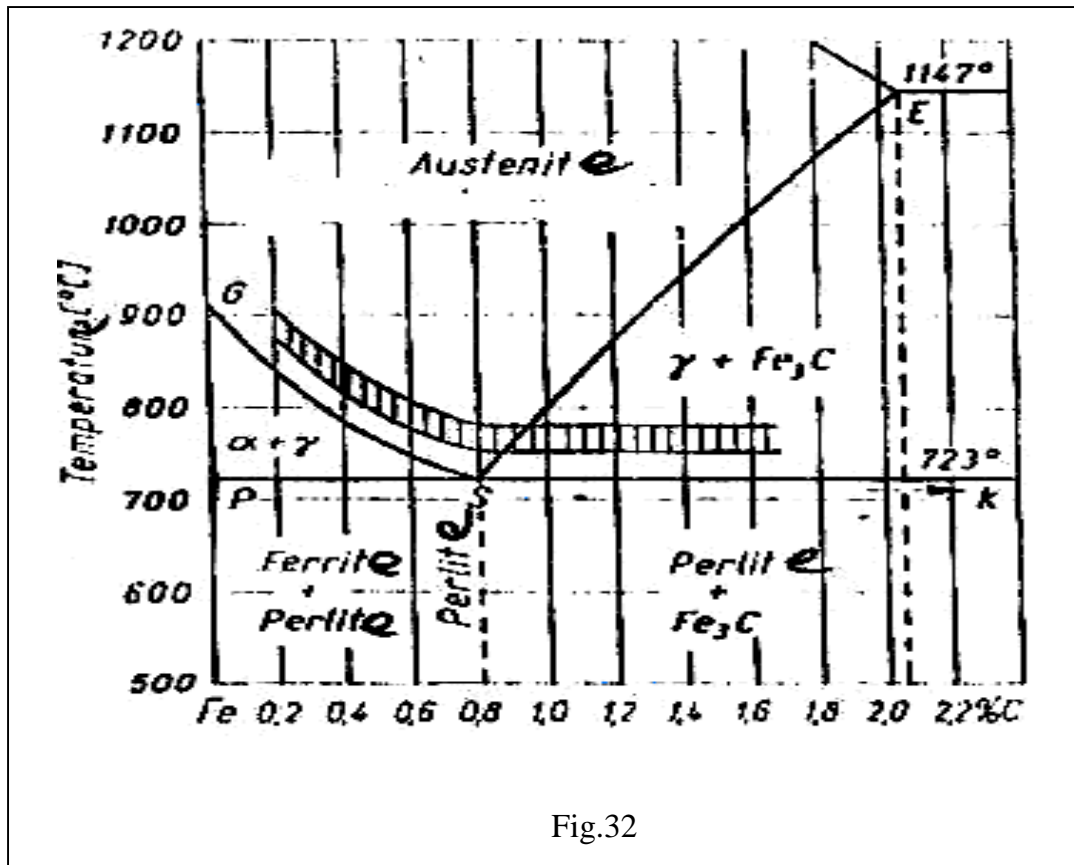


Fig.32

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 33, 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. 33).

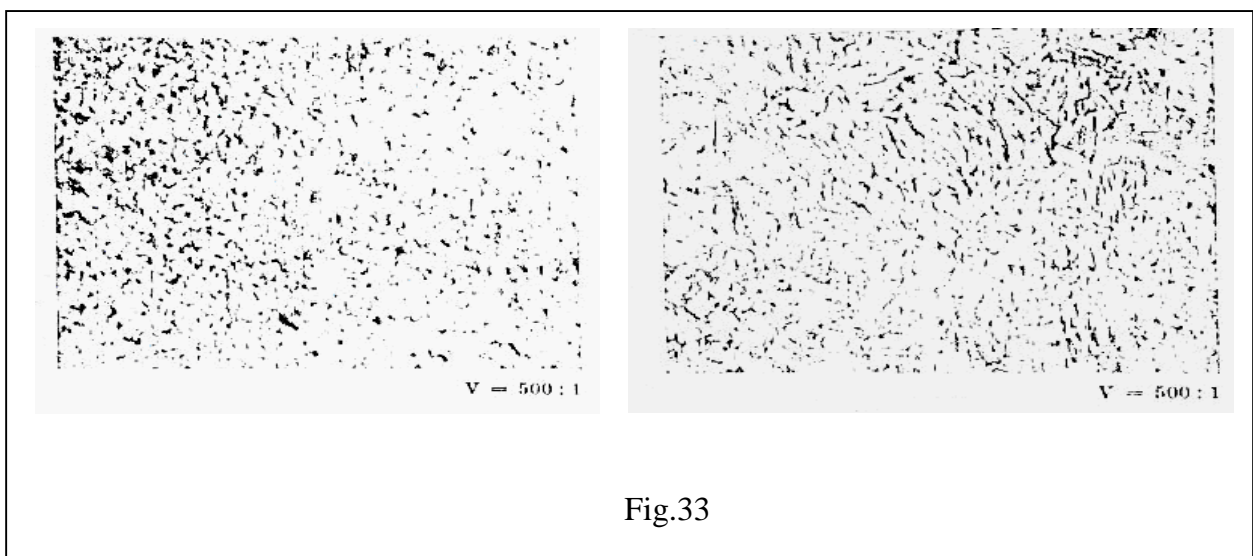


Fig.33

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 ($T = -60^{\circ}\text{C}$) afin de transformer le reste de l'austénite en martensite.

1.4.3.2. 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).

1.4.3.3. 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_r^{700}),
- exprimée dans un gradient de température généralement compris entre 700 et 300°C

$$\left(\overline{V}_{700}^{300} \right)$$

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 34 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.

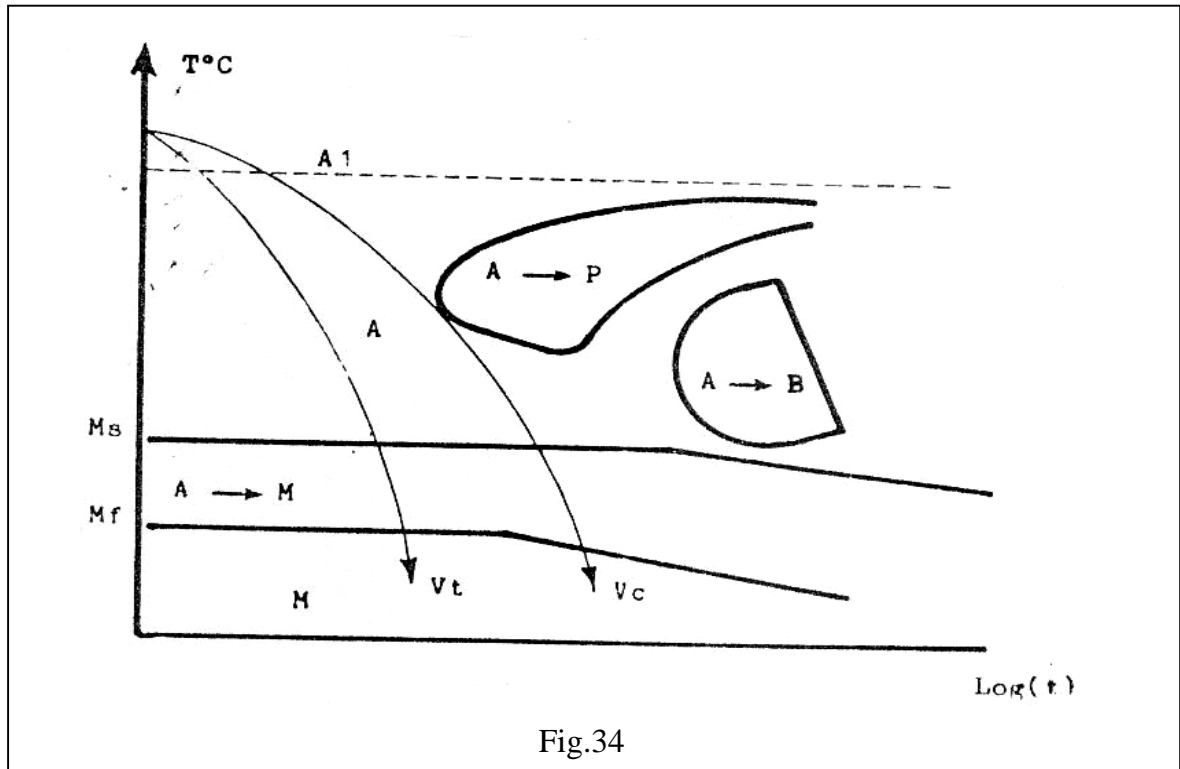


Fig.34

1.4.3.4. 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.

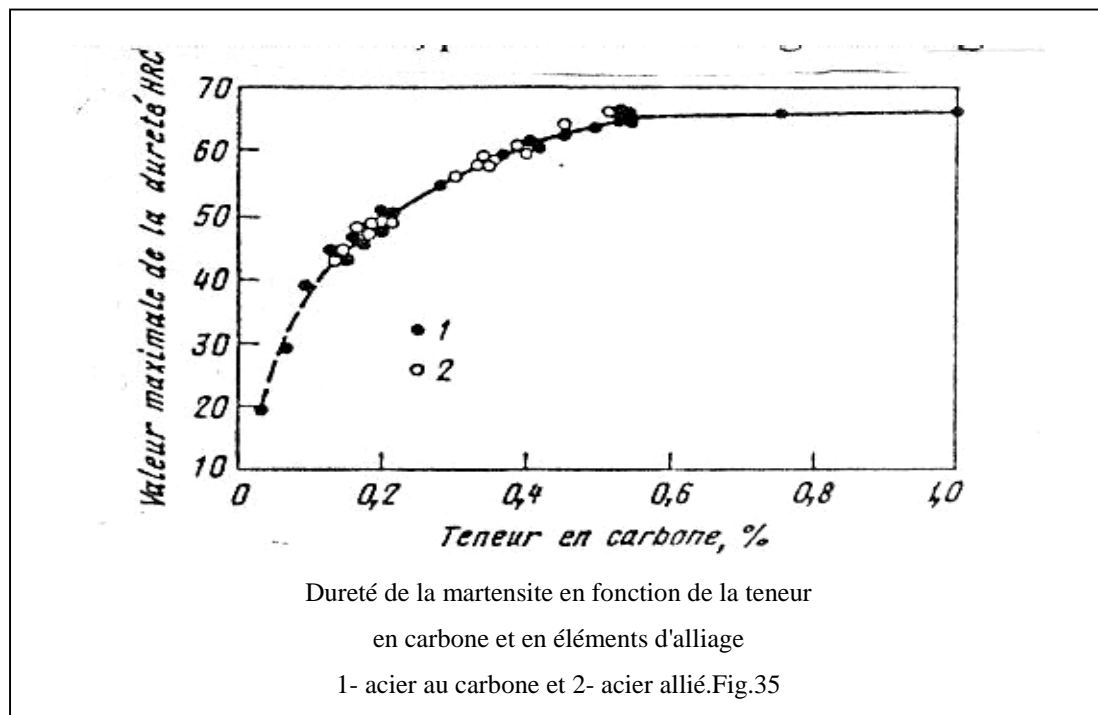
Généralement, on utilise pour les bains de trempe, des liquides qui peuvent bouillir tels que l'eau, les solutions aqueuses de sels et d'alcalins, les huiles. La trempe par ces agents passe par une étape de refroidissement pelliculaire (ou caléfaction) où une gaine de vapeur

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.

1.4.3.5. 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. 35).



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 36, 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.

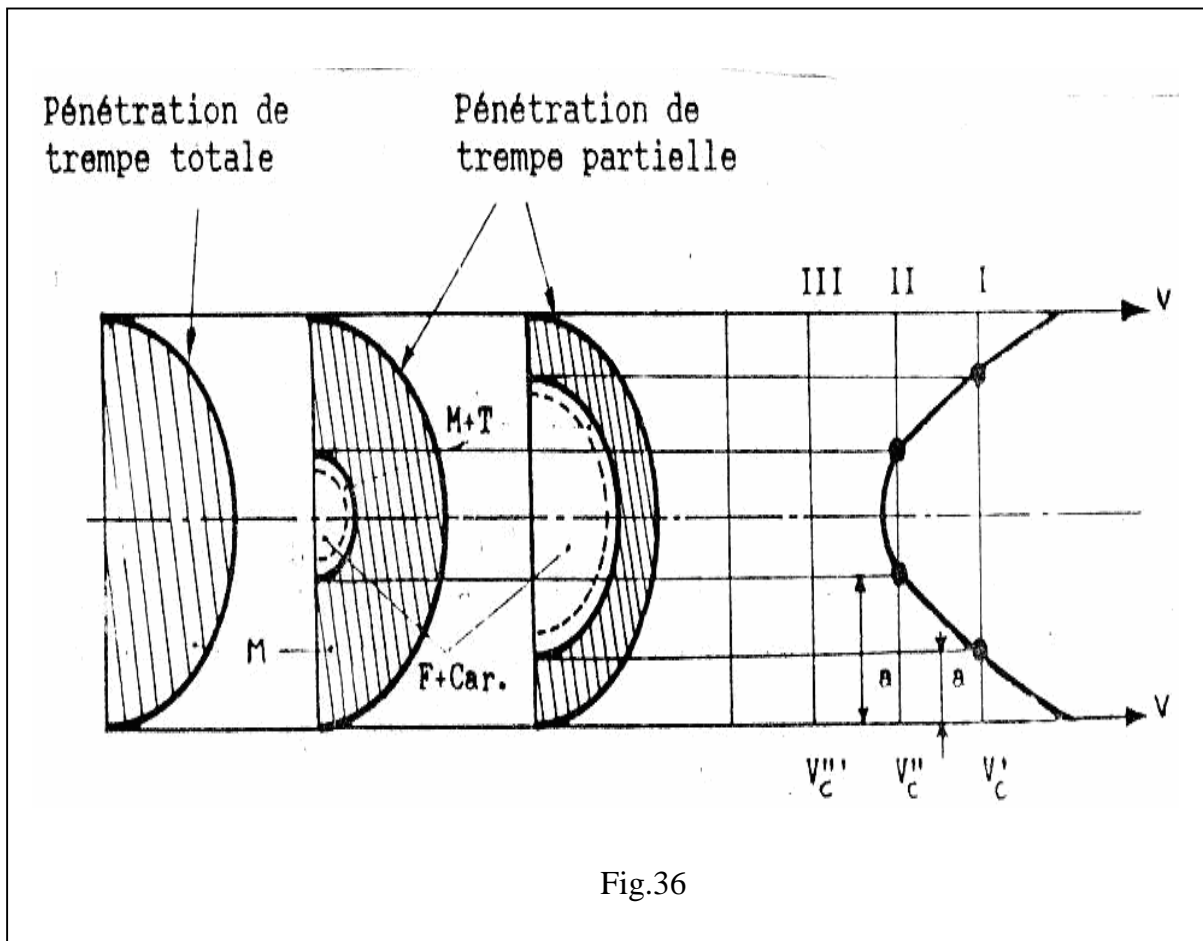


Fig.36

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,...

1.4.3.6. Essai Jominy

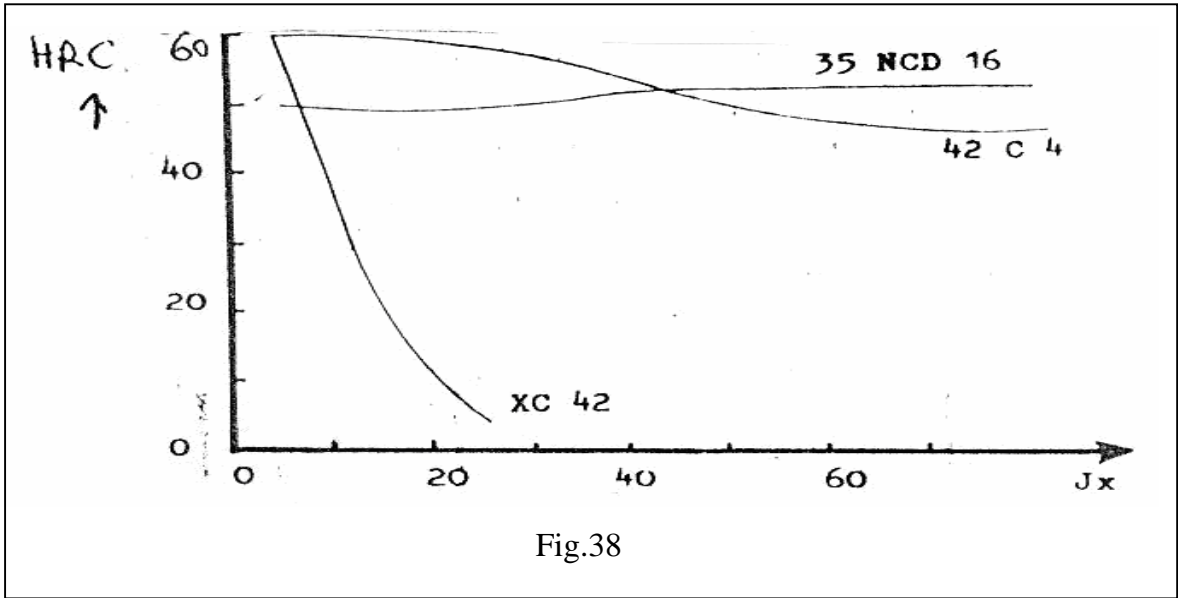
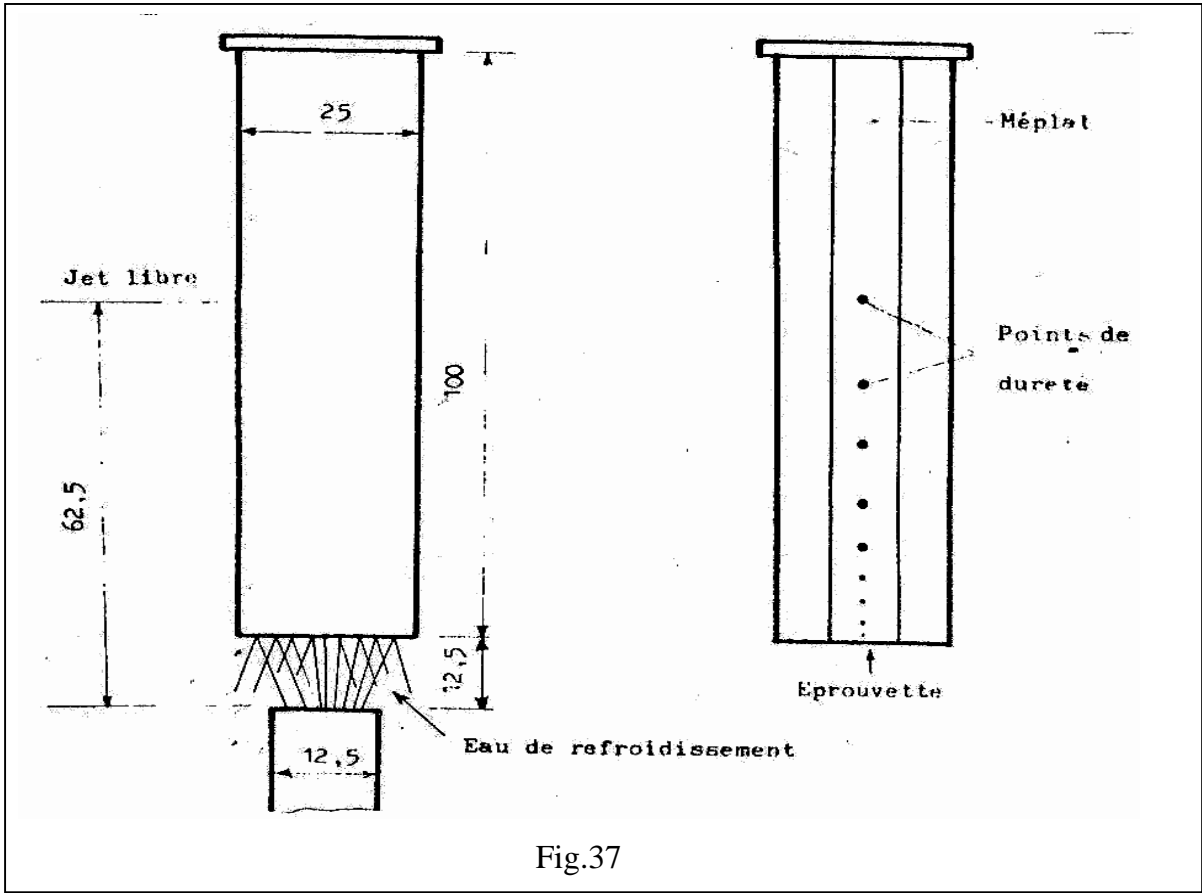
Il a pour but d'obtenir, en une seule opération sur une éprouvette normalisée (voir figure 37), des indications globales sur la trempabilité d'un acier, sous forme d'une courbe appelée courbe Jominy.

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 38.



1.4.3.7. 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.39), 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 :

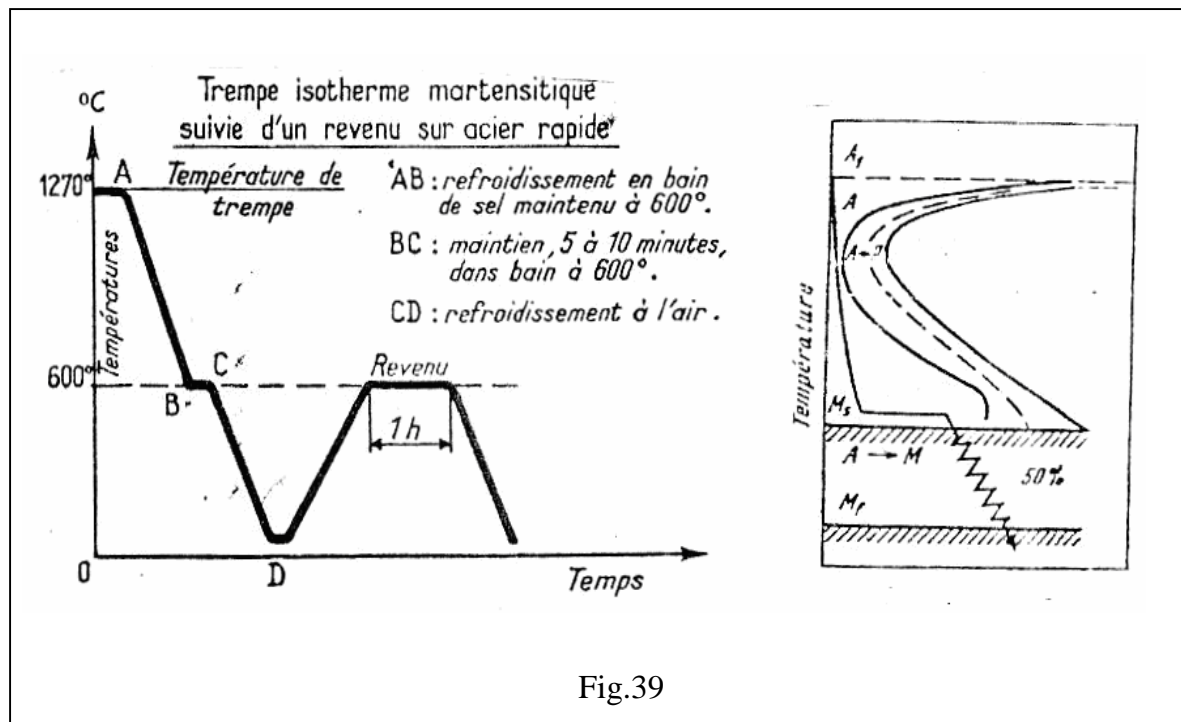
- Les modifications volumiques produites par la présence d'une grande quantité d'austénite résiduelle et la propension de la martensite à l'autorevenu.
- Le gauchissement, car la transformation martensitique se produit presque simultanément dans toutes les sections de la pièce.
- Le danger de la formation 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 Ms 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 Ms (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. 40), s'effectue en principe, de la même façon que la trempe martensitique, mais elle impose un séjour plus long au dessus du point Ms. 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.

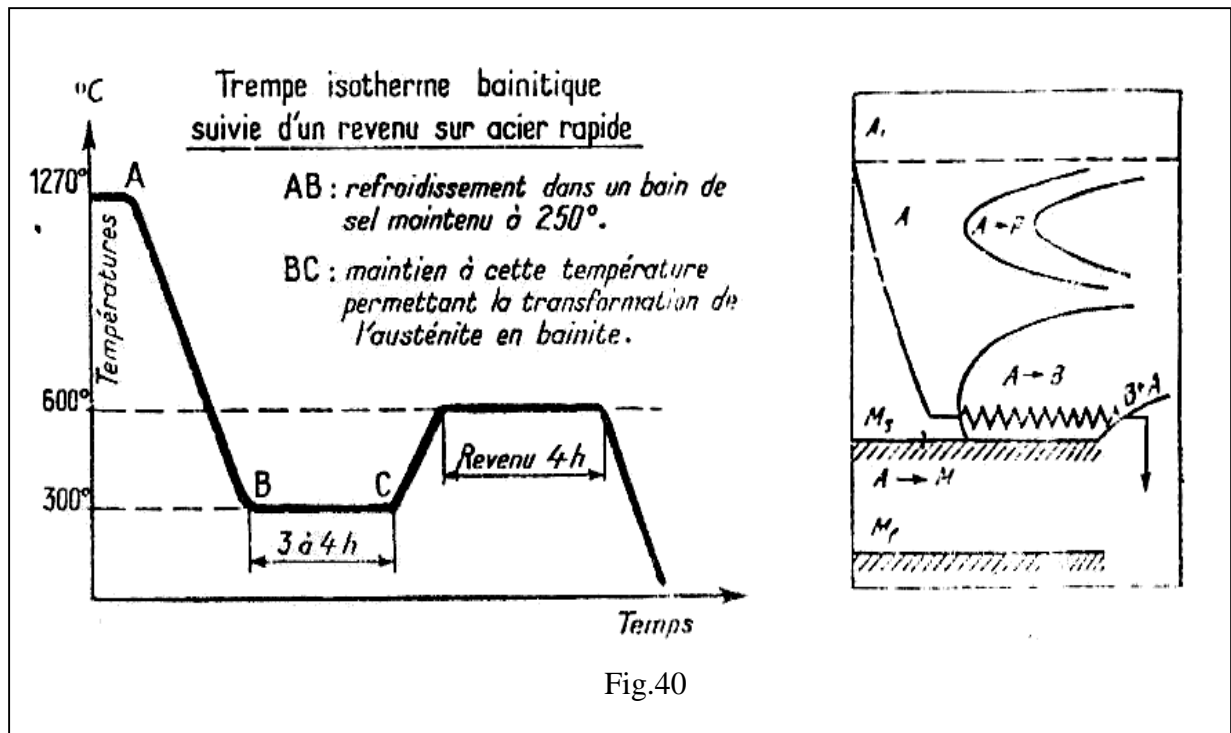
Pour de nombreux aciers, la trempe bainitique augmente nettement la résistance fonctionnelle, c'est à dire, la résistance des éprouvettes de forme complexe.

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% KNO_3 + 45 % NaNO_2 ou NaNO_3 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.



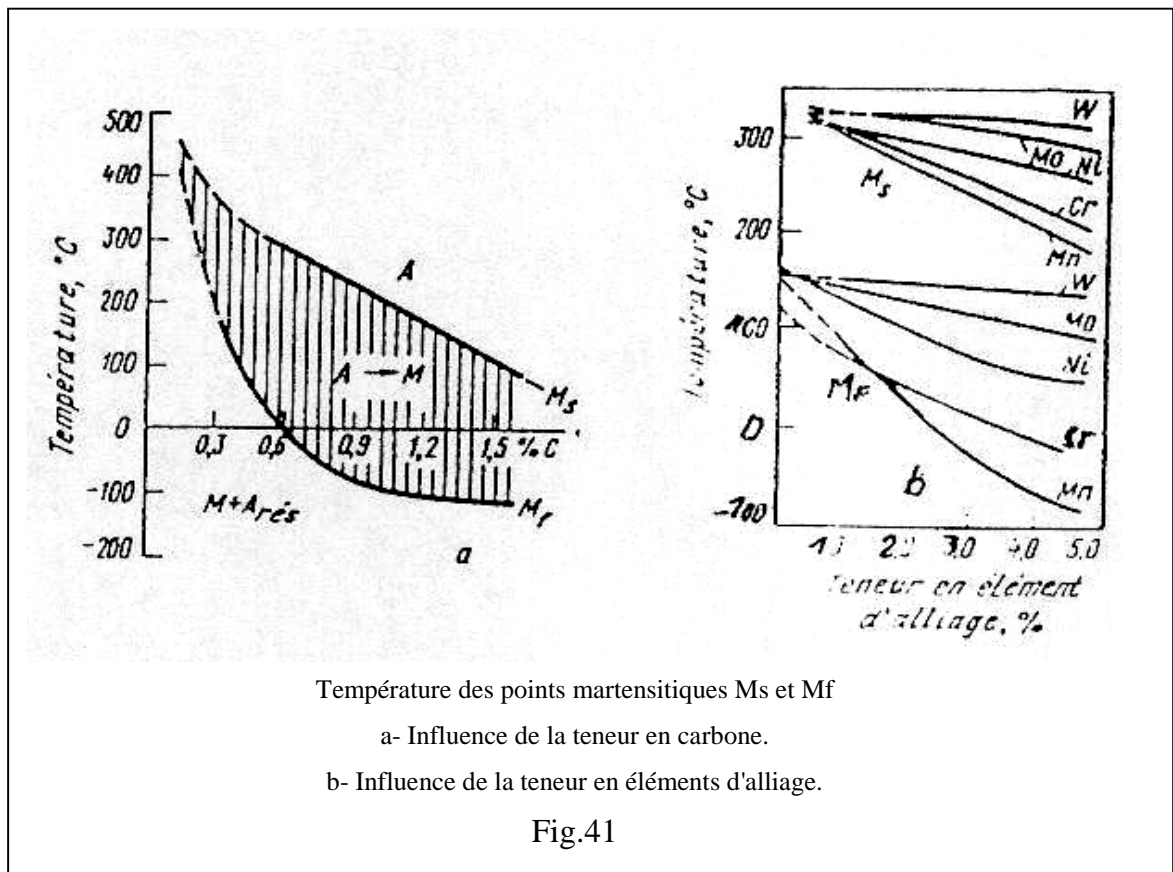
L'addition de l'eau (3 à 5 %) à un bain d'alcalis caustique en fusion, provoque l'ébullition et accélère ainsi le refroidissement dans la gamme des températures de la transformation perlitique. A 400 ou 500°C, le refroidissement devient 4 à 5 fois plus rapide, et à 300°C, deux fois plus rapide.

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_f se trouve au dessous de zéro, (fig. 41).



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.

1.4.3.8. 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.

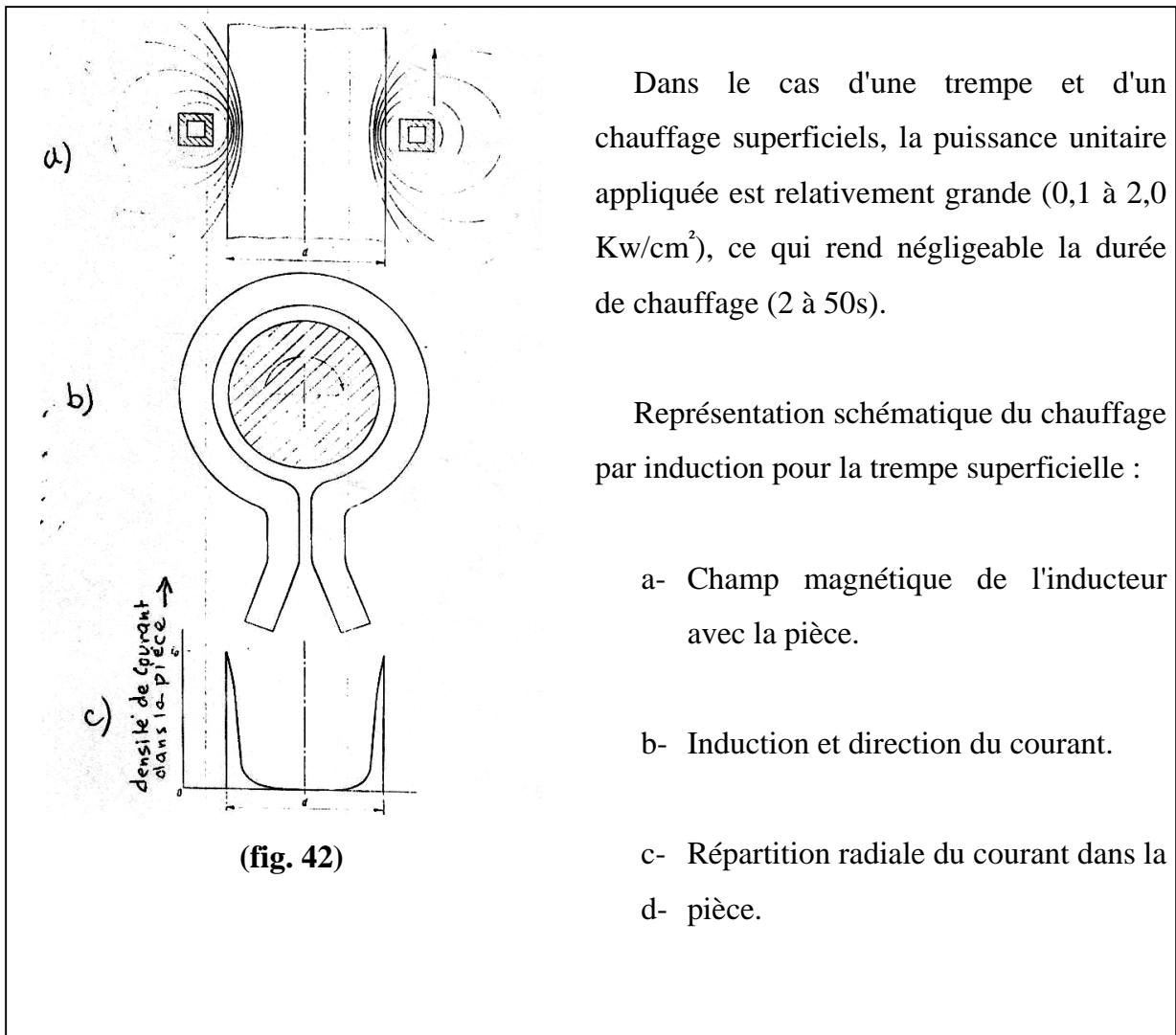
Les avantages essentiels que présente la trempe superficielle sont l'augmentation de la dureté, de l'amélioration de la tenue à l'usure, de la résistance, de la limite de fatigue des couches superficielles des pièces.

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. 42). 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.



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 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.
- 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 trempé 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.

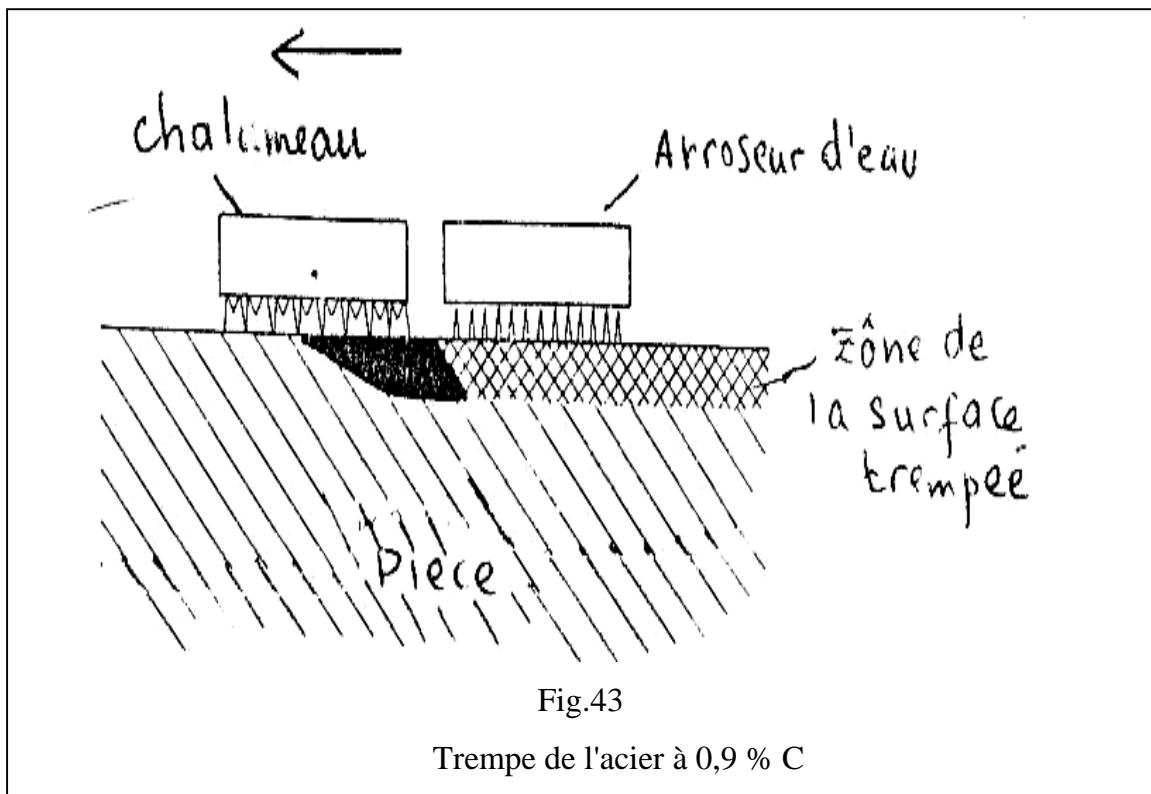
- Chauffage et refroidissement simultanés (trempe sur place) de toute la surface, ce procédé s'emploie pour des pièces de petites surfaces (axes, manetons, outils).
- Chauffage et refroidissement successifs des secteurs isolés, ce procédé est utilisé pour le durcissement des tourillons, des vilebrequins, 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.

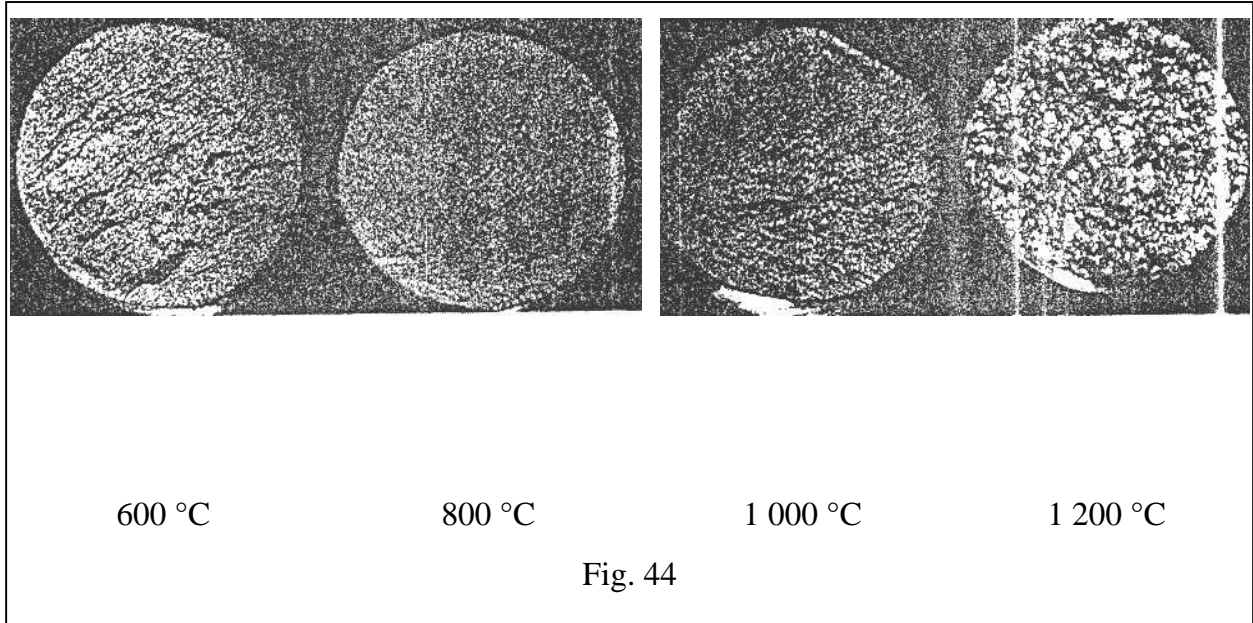
La trempe par induction est suivie de revenu à basse température de 160 à 220°C et souvent d'autorevenu, car en réalisant la trempe, le refroidissement n'est pas complet et la pièce garde ainsi une certaine quantité de chaleur. Cette chaleur résiduelle fait remonter la température de la couche trempée 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 :

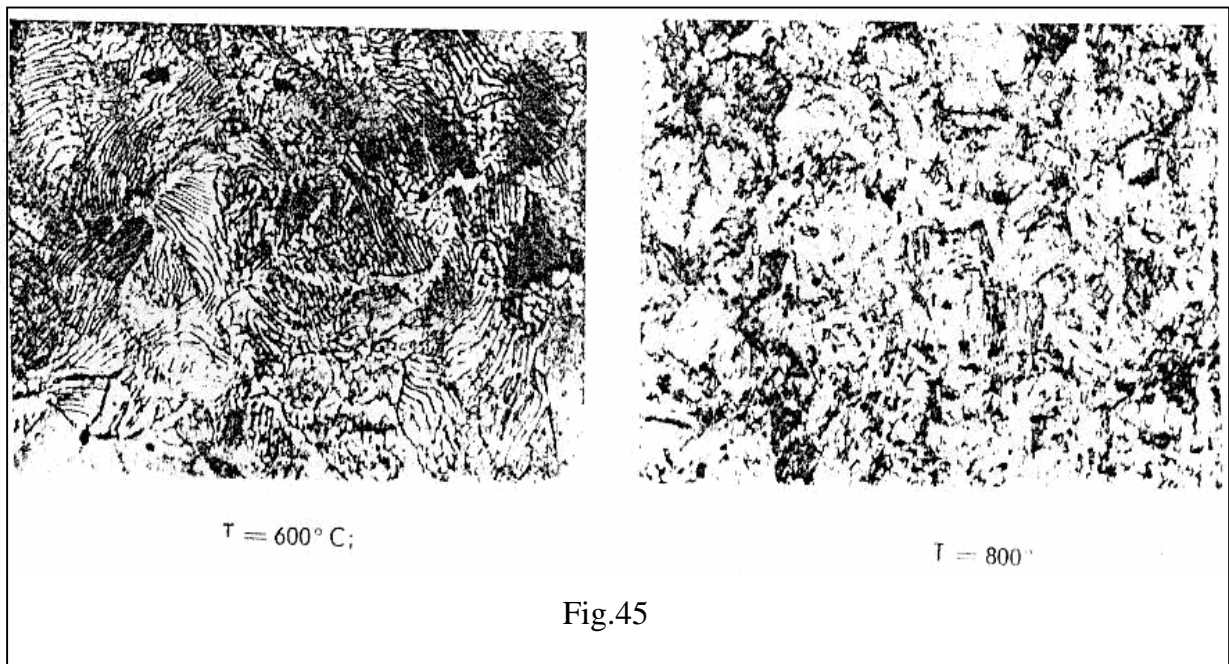
Ce mode de trempe est employé pour de grosses pièces (cylindres de laminoirs, arbres etc.). La surface de la pièce est chauffée à la flamme de gaz dont la température est très élevée (2400 à 3150°C). L'apport de chaleur à la pièce étant important, la surface de cette dernière s'échauffe rapidement jusqu'à 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. 43). 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.

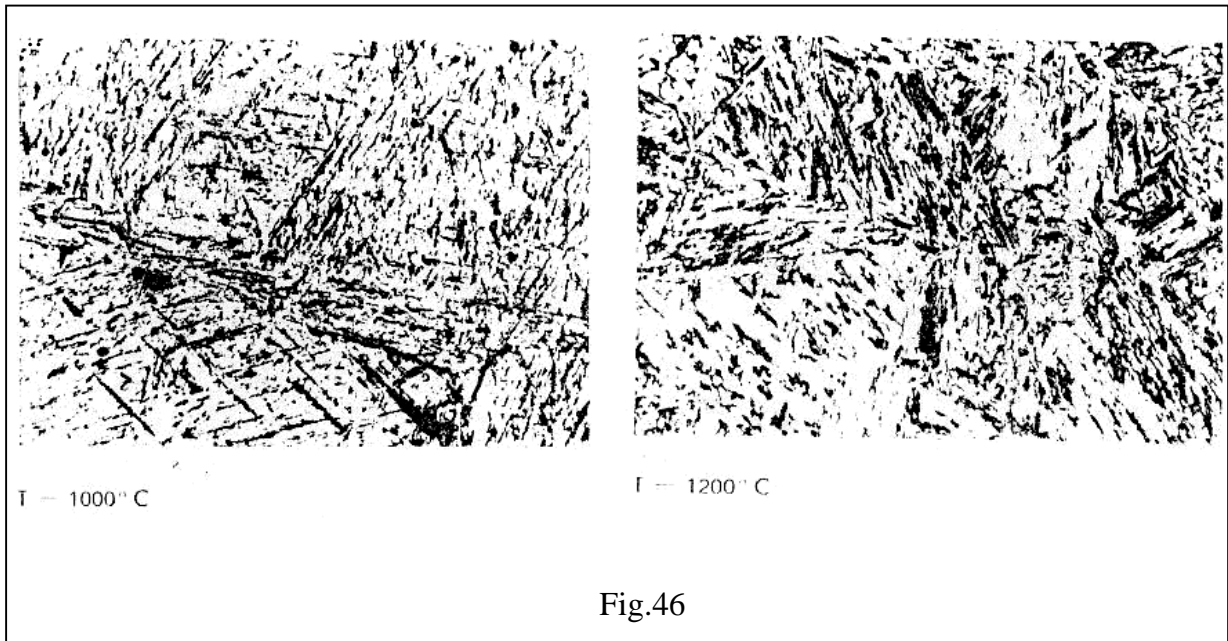


a. Structure d'après la cassure en fonction de la température de trempe, refroidissement dans l'eau à 20°C.

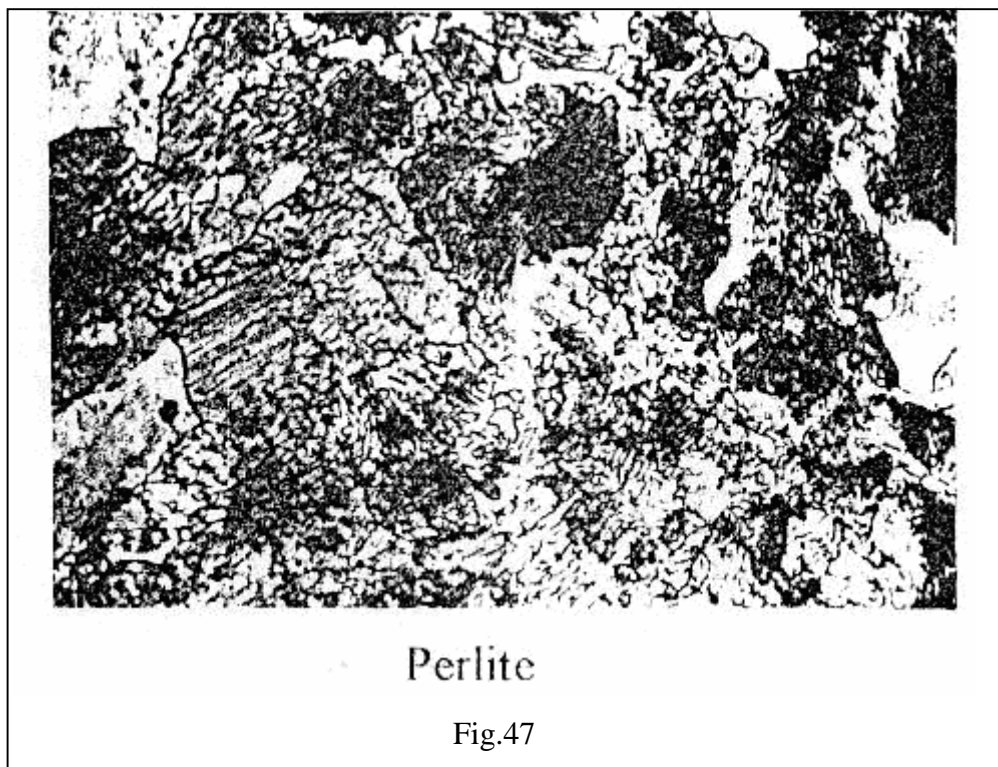


b. Les mêmes structures que précédemment, vues au microscope avec grossissement (A = 500 : 1), milieu d'attaque HNO₃ à 1 % d'alcool.

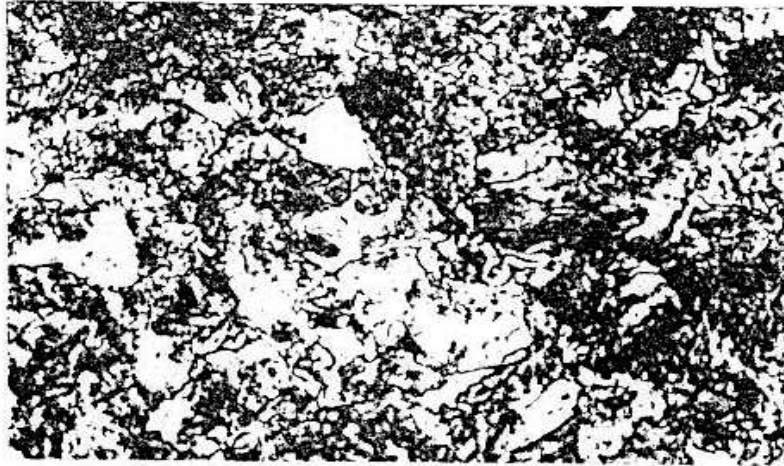




c. Acier à 0,9 % C, T = 800°C , t =30 min, refroidissement dans le four, (A= 500 : 1), perlite.



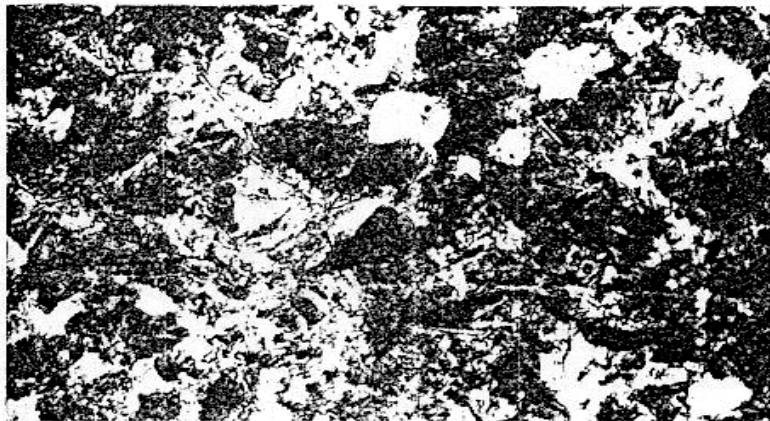
d. Acier à 0,9 % C, T = 800°C , t =30 min, refroidissement à l'air, (A= 500 : 1), ferrite + bainite.



Ferrite + Bainite

Fig.48

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



Bainite

Fig.4

f. Acier à 0,9 % C, $T = 800^{\circ}\text{C}$, $t = 30$ min, refroidissement à l'eau, (A = 500 : 1), martensite + troostite.



Martensite + troostite

Fig.50

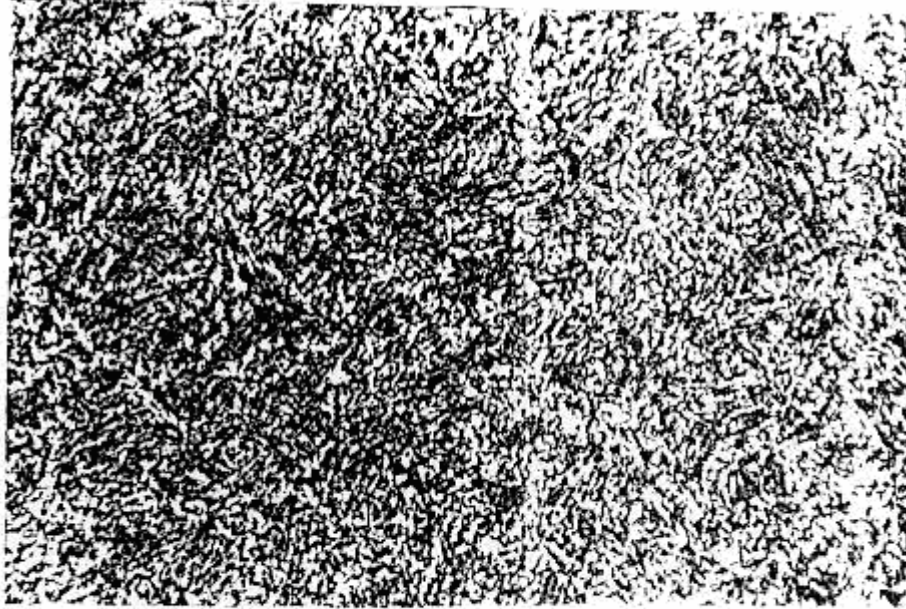
g. Acier à 1,6 % C, $T = 100^{\circ}\text{C}$, refroidissement dans la glace (A = 500 : 1), Martensite + reste de l'austénite.



Martensite + reste de l'austénite

Fig.51

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.

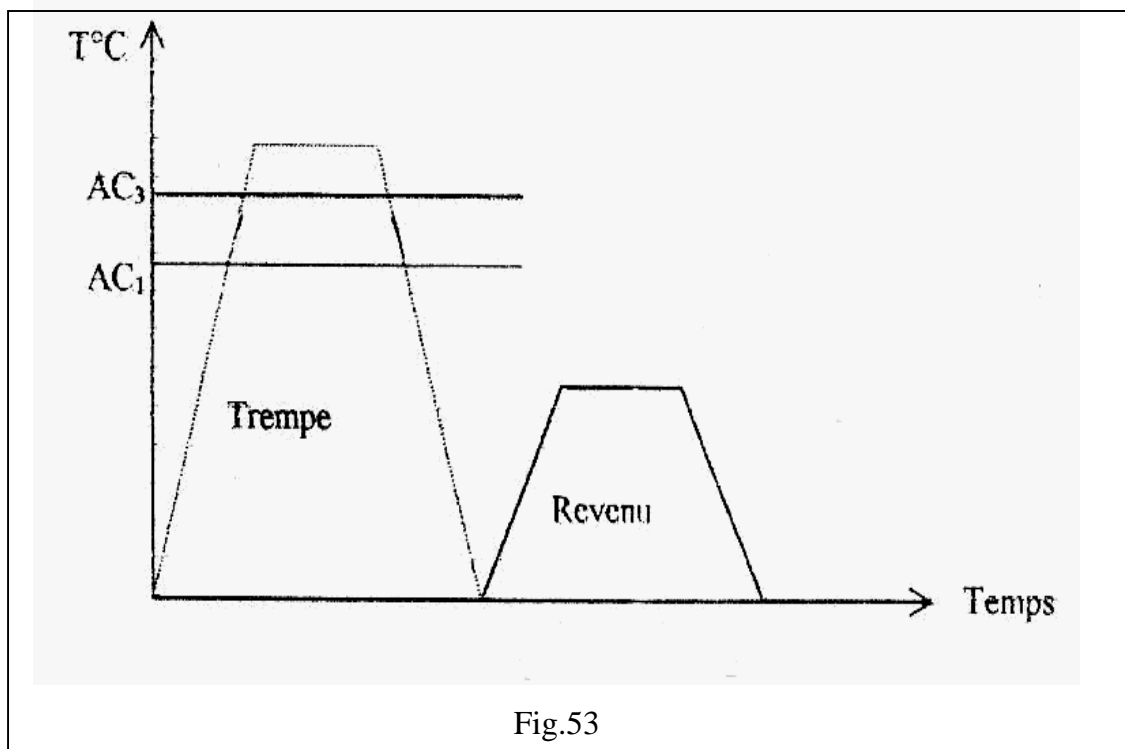


Structure de revenu

Fig.52

1.4.4. 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. 53).



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 :

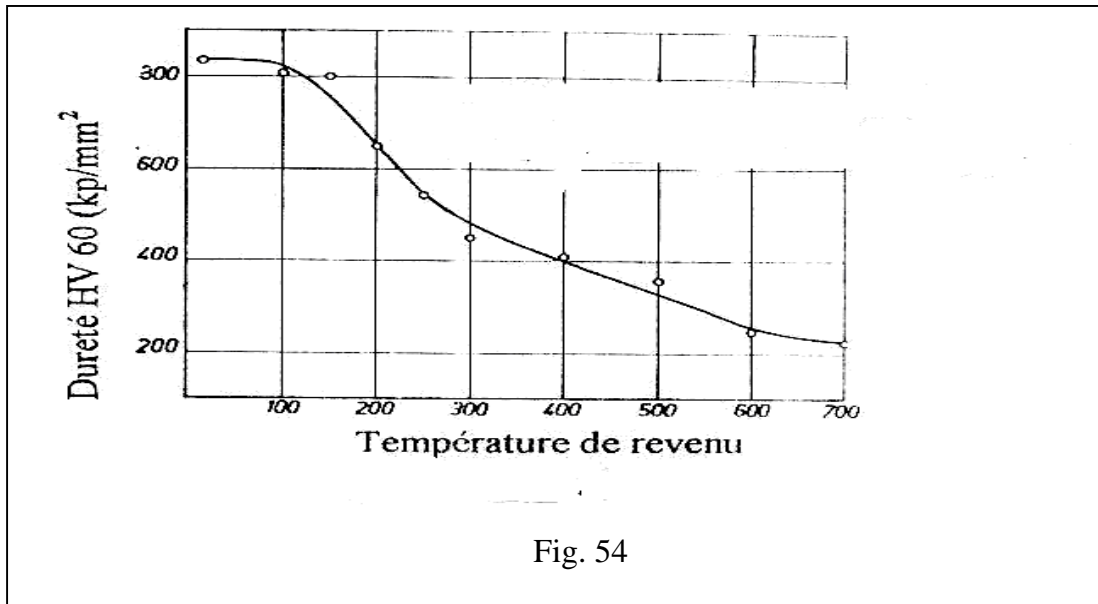
Le revenu à basse température s'effectue avec un chauffage vers 250°C et permet de diminuer les contraintes internes. Il transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Ce revenu augmente la résistance et améliore la ductilité sans altérer sensiblement la dureté (58 à 63 HRC), d'où une bonne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

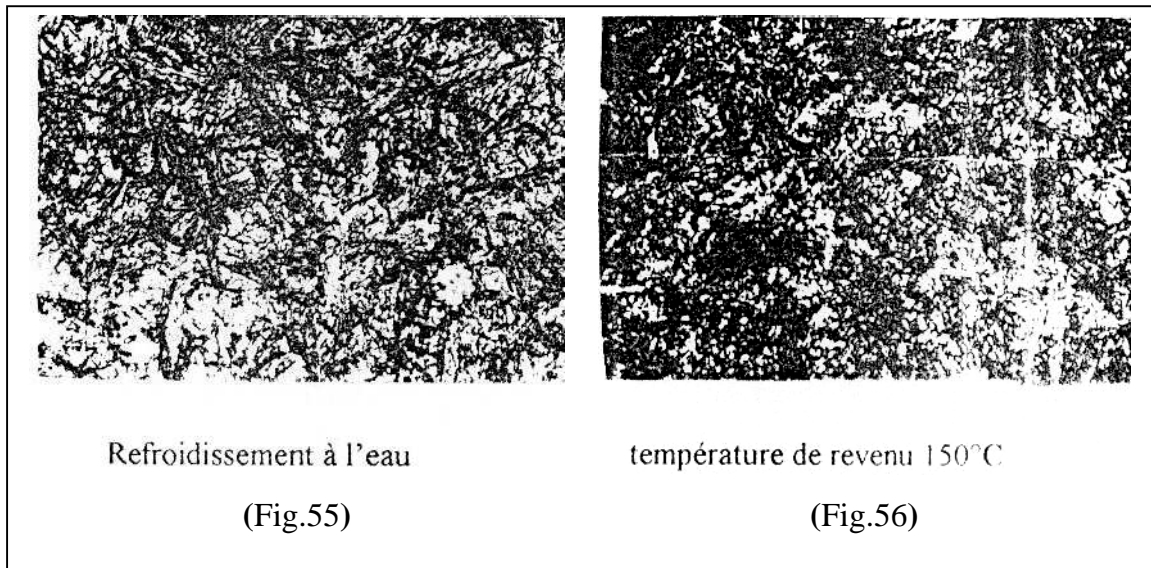
Le revenu à température intermédiaire se réalise entre 350 et 500°C et s'emploie pour les ressorts variés et les estampes. Il permet d'obtenir une limite élastique et une résistance à la fatigue élevées. La structure est de type troostite de revenu ou troostite - martensite dont les duretés varient de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

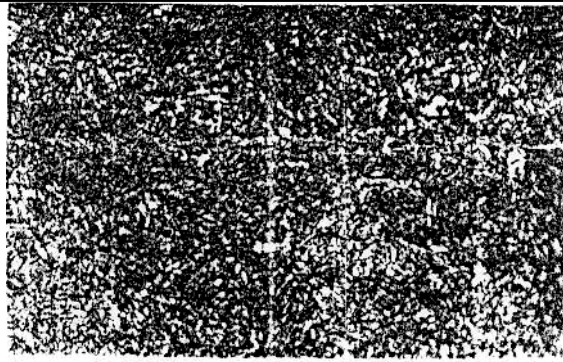
c. Revenu à haute température :

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 54 montre l'évolution de la dureté HV 60 en fonction de la température de revenu.



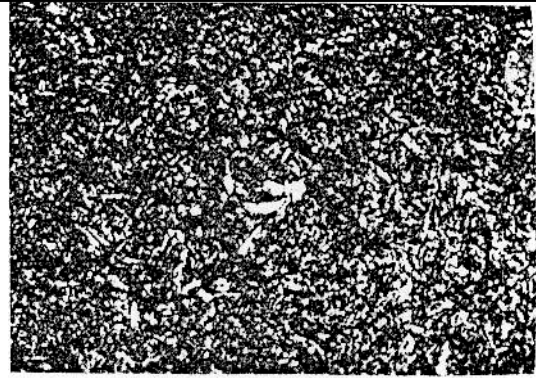
Les figures, ci-dessous, montrent la structure de l'acier à 0,6 % C pour différentes températures de revenu.. La solution d'attaque étant HNO_3 à 3 % d'alcool avec un grossissement (A = 500 : 1) .





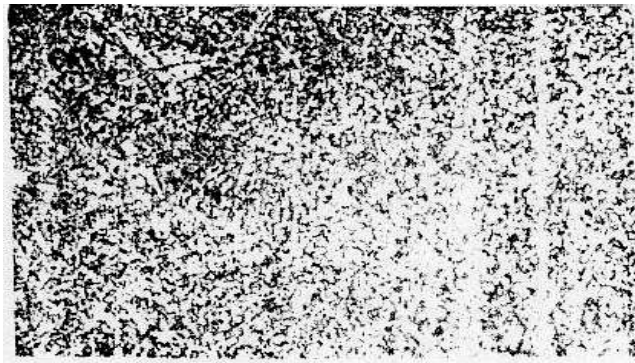
Température de revenu : 300°C

(Fig.57)



Température de revenu 500°C

(Fig.58)



température de revenu 700°C

(Fig.59)

Après avoir étudié les différents types de traitement thermique de l'acier, résumons ces derniers sur La figure 60 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.

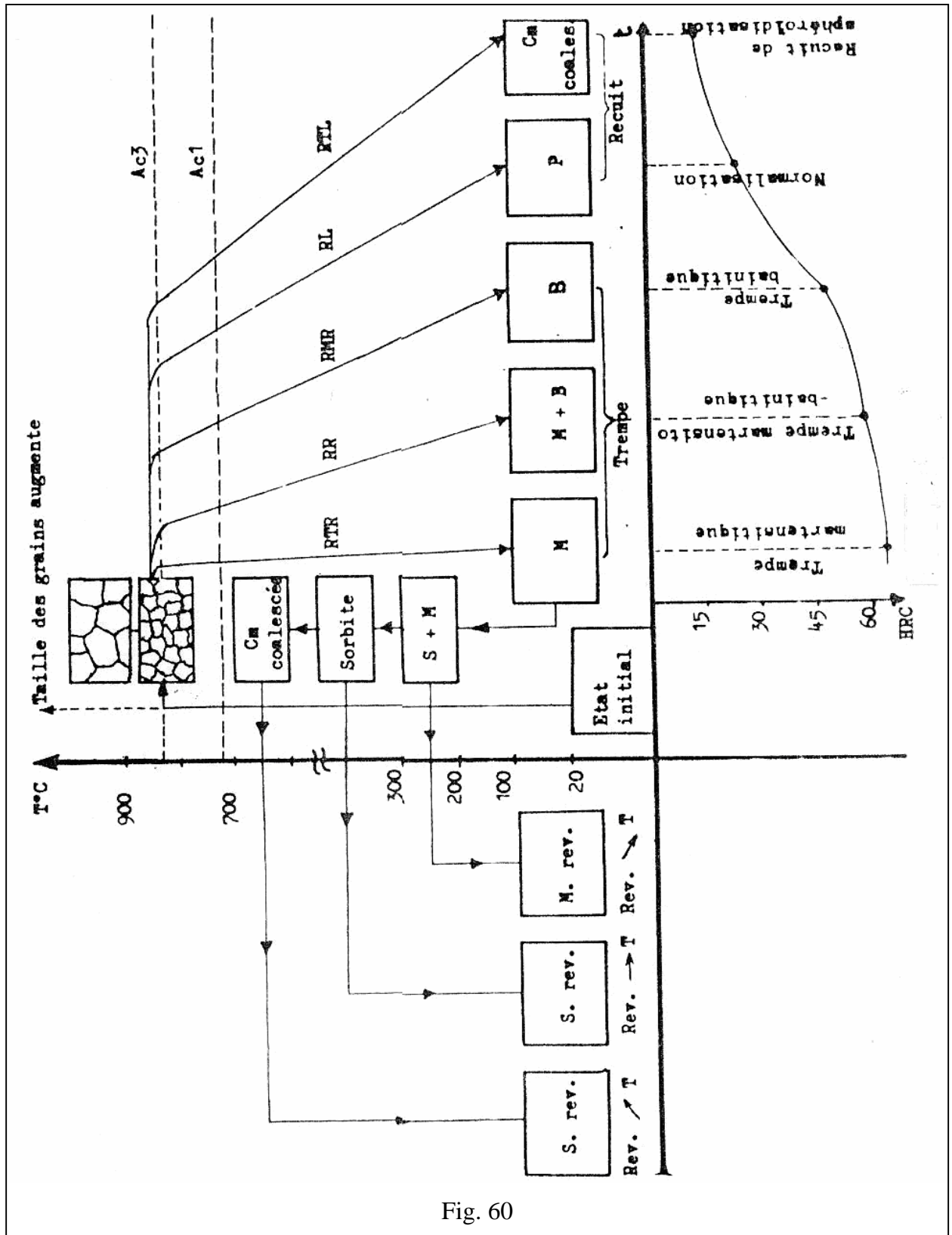
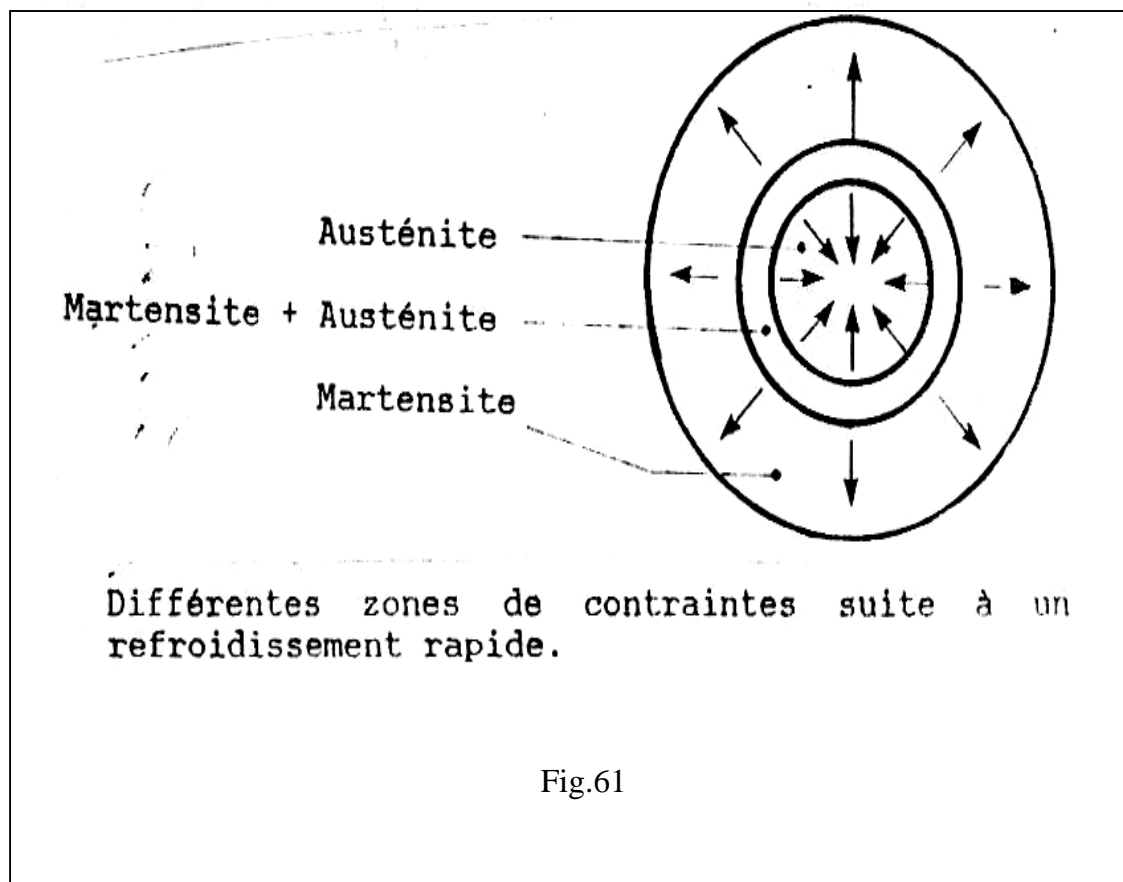


Fig. 60

1.5. 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 raccordements 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 61.



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

1.6. 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 62 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.

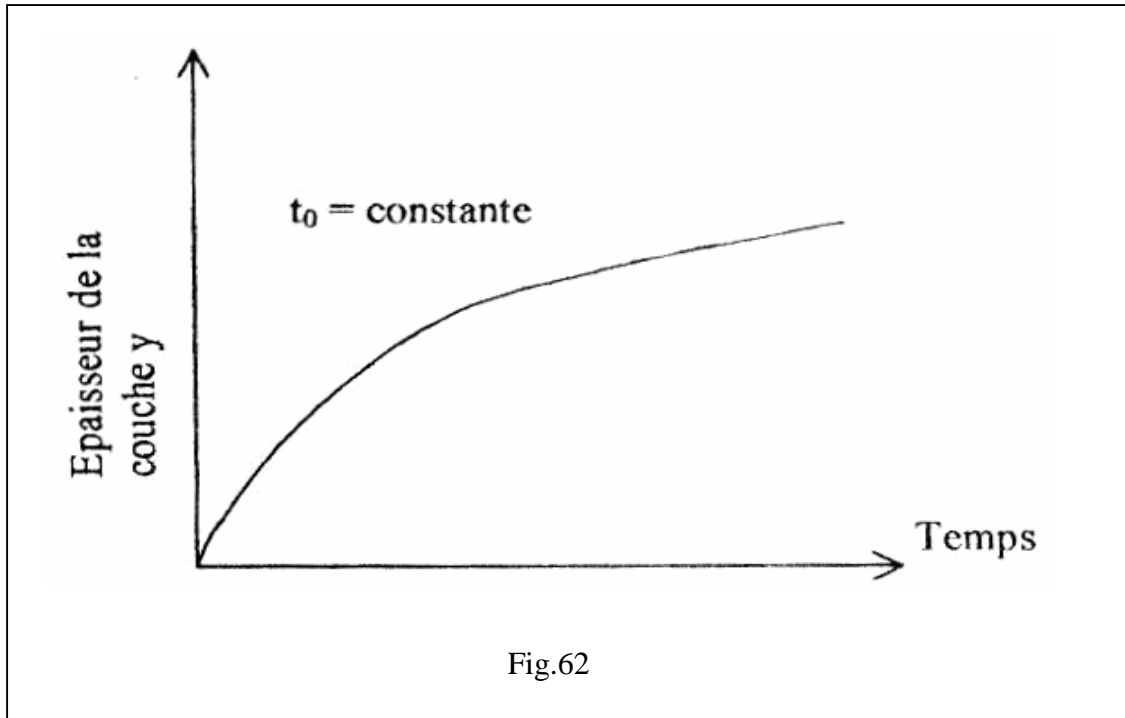
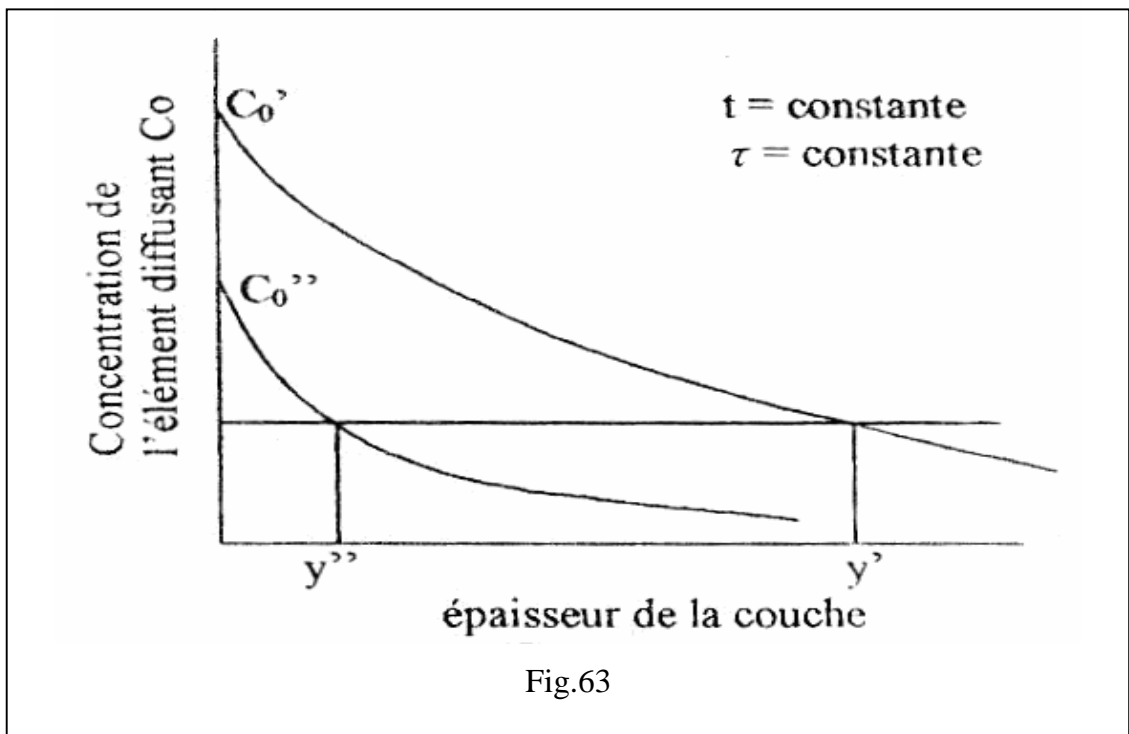


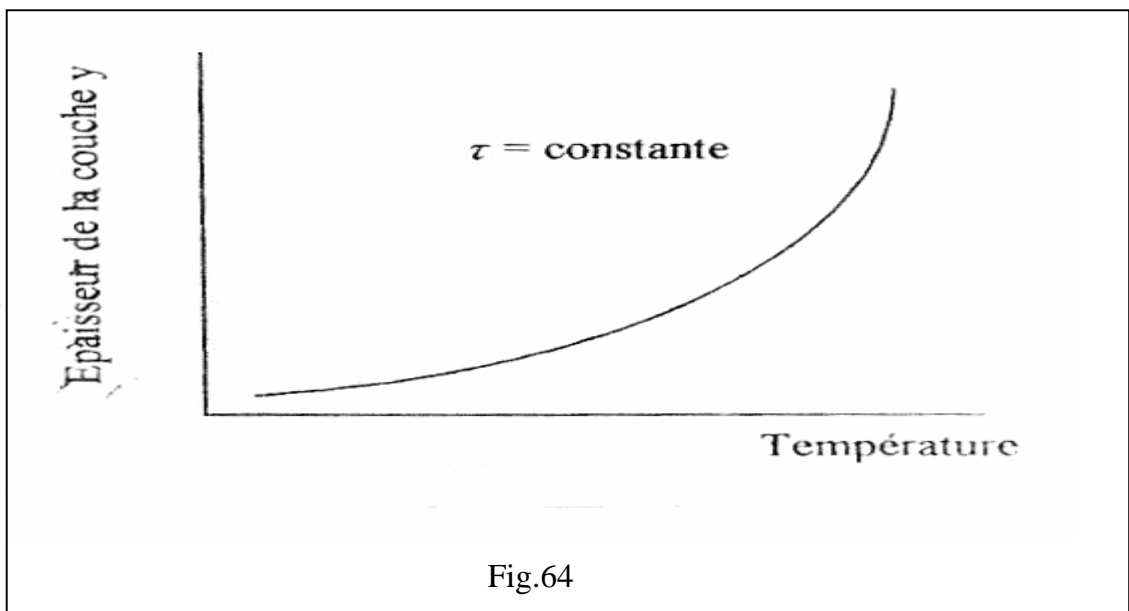
Fig.62

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

La figure 63 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. 64).



1.7. Principaux types de traitements thermochimiques de l'acier

Ces traitements thermochimiques sont :

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

1.7.1. 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 (0,05 à 0,25 % 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).

1.7.1.1. 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. 65).

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 $\leq 0,17\%$ C, elle est de 15 % de l'épaisseur soumise à la cémentation, pour les aciers à $> 0,17\%$ C, elle est de 5 à 9 %. Le plus souvent, l'épaisseur de la couche varie de 0,5 à 2 mm et la concentration en carbone dans la couche superficielle doit être de 0,8 à 1,0 %. Des concentrations plus élevées dégradent les propriétés mécaniques de la pièce 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, augmentent 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.

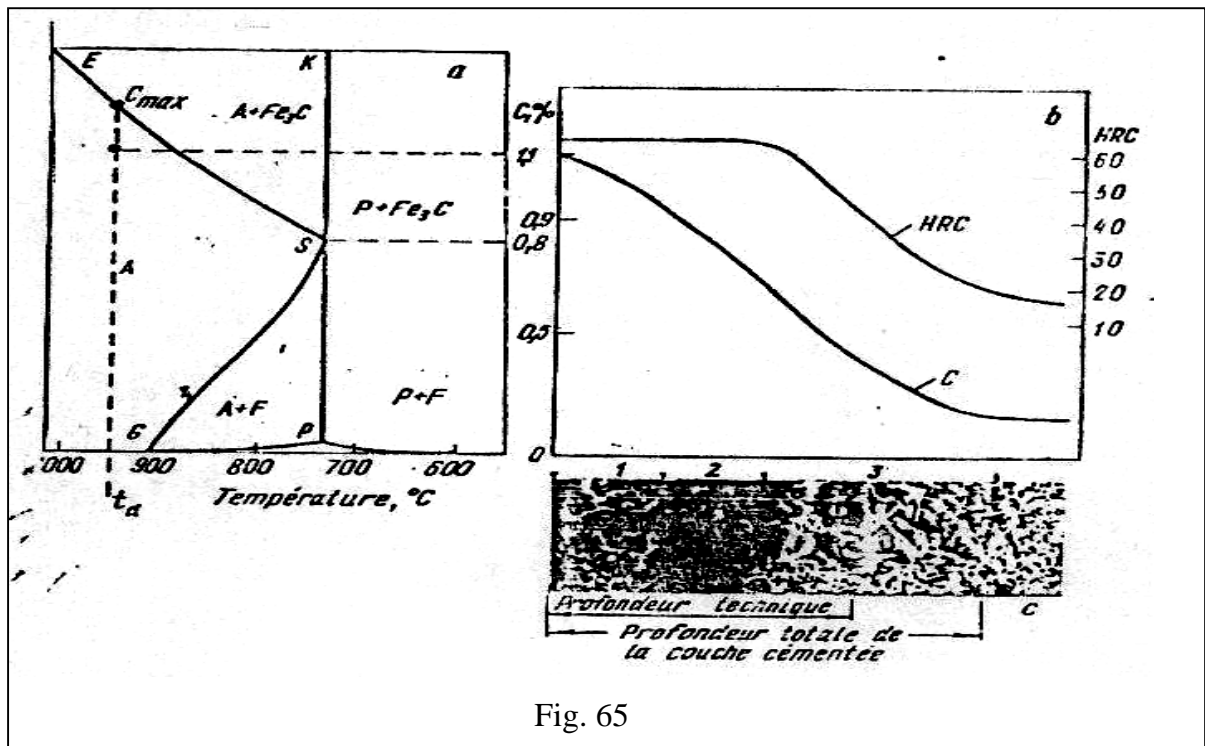


Fig. 65

1.7.1.2. Cimentation 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 cimentation, 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 cimentation 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.

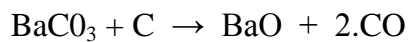
La caisse est placée dans un four où la température de cimentation varie de 910 à 930°C. Le maintien à la température de cimentation est de 7 à 9 min par centimètre de la dimension maximale de la caisse. Après cimentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400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

Durée en heures		Épaisseurs de la couche de cimentation 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.



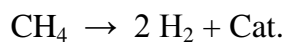
Le ciment employé est à l'état granulé, ce qui favorise le déplacement des gaz et permet d'obtenir une vitesse de déplacement plus élevée.

1.7.1.3. 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 cimenter, diminue la durée du processus en rendant inutile le chauffage préalable des caisses remplies de ciment etc.

La meilleure couche cimentée s'obtient en employant comme agent de cémentation le gaz naturel CH_4 , 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.

1.7.1.4. Cémentation par des agents liquides

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

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.

1.7.1.5. 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.

1.7.2. 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 ammoniac. 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.

1.7.2.1. Mécanisme de la formation de la couche nitrurée

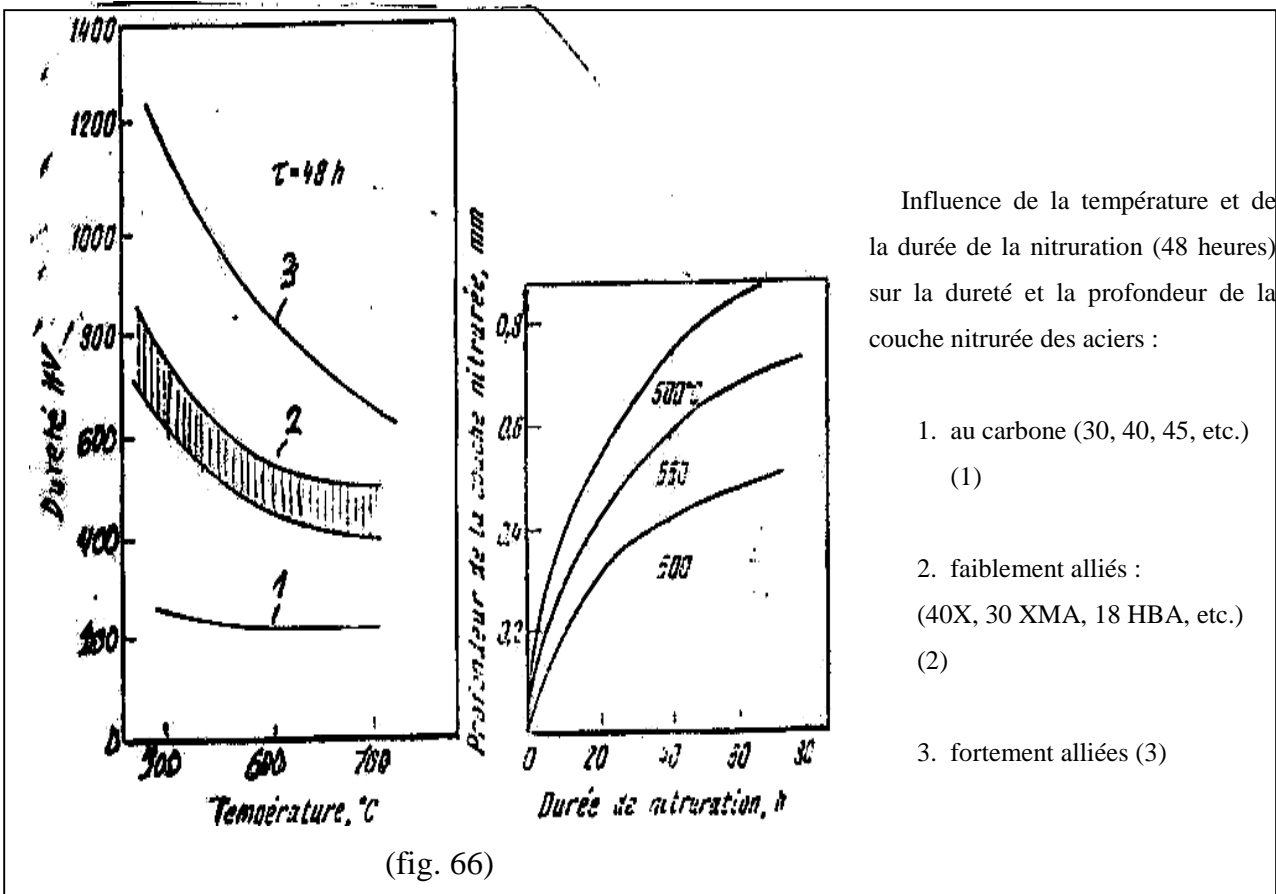
Les alliages fer-azote forment différentes phases et parmi elles, la phase F_4N (nitruure de fer), avec une teneur en azote de 6,10 %, c'est un corps très dur mais fragile. La nitruration s'effectue dans une atmosphère d'ammoniac qui, au chauffage, se dissocie suivant la réaction suivante : $2 NH_3 \rightarrow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

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 nitruures 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. 66) La diminution de la dureté de la couche nitrurée est liée à la coalescence des nitrures des éléments d'alliage.



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.

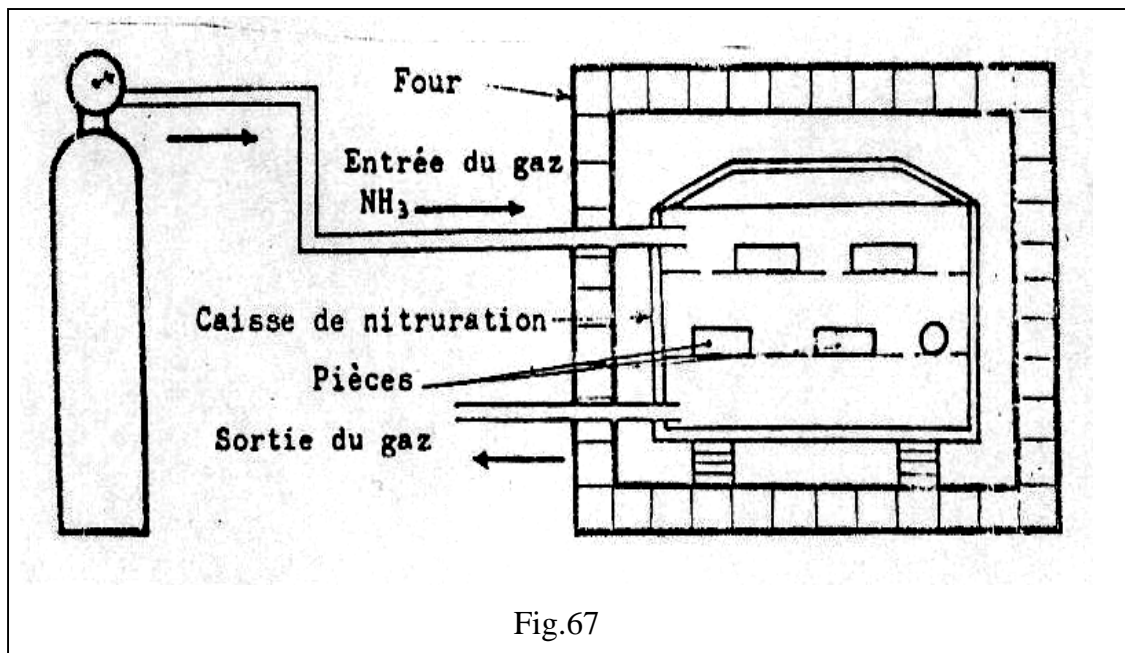
La nitruration présente beaucoup d'avantages sur la cémentation (grande dureté, qui se conserve jusqu'à 500°C, maximum de résistance à l'usure et une certaine résistance à la corrosion), par contre, la nitruration coûte plus chère que la cémentation et présente un léger gonflement de la couche nitrurée 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 $\text{Fe}_3(\text{N,C})$.

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. 67).



Les caisses sont ensuite placées dans un four porté à $525^{\circ}C$ 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.

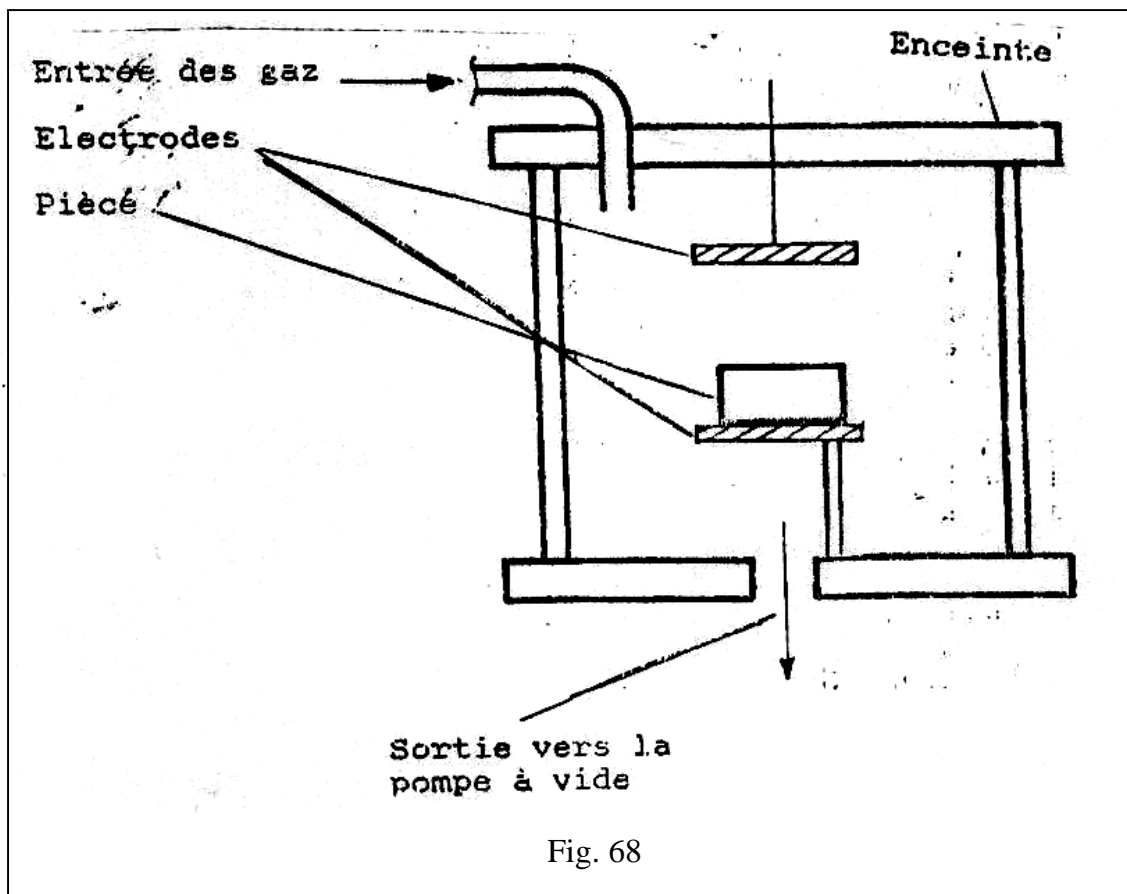
Le courant gazeux NH_3 , envoyé sous pression de 10 à 20 mbar, fait baigner les pièces. Les parties ne devant pas être nitrurées, sont préalablement traitées à l'étain. Après nitruration, la couleur des pièces tend vers le blanc à cause de la faible température, elles sont dépourvues de déformation.

1.7.2.2. 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. 68). 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.



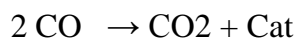
Le tableau, ci-dessous, indique quelques nuances d'aciers nitrurés avec les duretés HV.

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

1.7.3. La cyanuration et la carbonitruration

1.7.3.1. 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.

1.7.3.2. La carbonitruration

La carbonitruration est un procédé de durcissement superficiel des pièces en acier que l'on chauffe dans une atmosphère gazeuse ($\text{CO} + \text{N}_2 + \text{C}_3\text{H}_8$), 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 AC_3 . C'est pourquoi la température de chauffage lors de la trempe est moins élevée (700 à 850°C) que pour la cémentation.

Une trempe peu énergétique, généralement à l'huile ou à l'air, est effectuée soit à la sortie des pièces du four après refroidissement, soit après un deuxième chauffage. On a recours par la suite à un revenu à basse température (180°C). La dureté obtenue est de l'ordre de 62 HRC. Une épaisseur cémentée de 0,5 à 0,7 mm demande environ 3 heures de traitement. La couche carbonitrurée doit avoir une structure martensitique à grains fins, une faible quantité de carbonitrides et environ 20 à 30% d'austénite résiduelle.

La carbonitruration gazeuse est généralement appliquée aux pièces de formes complexes. C'est un traitement qui est, de plus en plus, adopté par les industries de précision telles que les pièces pour automobiles, avions, métrologie, etc.

1.7.4. La métallisation par cémentation

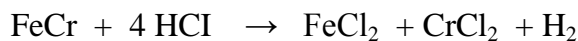
C'est un traitement thermochimique qui consiste à saturer la couche superficielle de l'acier en éléments tels que aluminium, chrome, bore etc. Après traitement, l'acier acquiert plusieurs propriétés importantes telles que la tenue à chaud et à l'usure accrue, la résistance à la corrosion et la dureté.

1.7.4.1. La chromisation

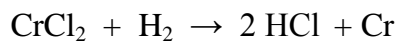
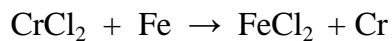
C'est la saturation en chrome de la couche superficielle des pièces de l'acier, par diffusion du chrome en milieu pulvérulent à une température supérieure à AC_3 , (1000 à 1050 °C). Généralement la chromisation augmente la tenue à la corrosion jusqu'à 800°C et celle des aciers à teneur élevée en carbone (> 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 constituant 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.

1.7.4.2. 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 %) pulvérents.

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.

1.7.4.3. 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.

1.8. Durcissement superficiel par écrouissage

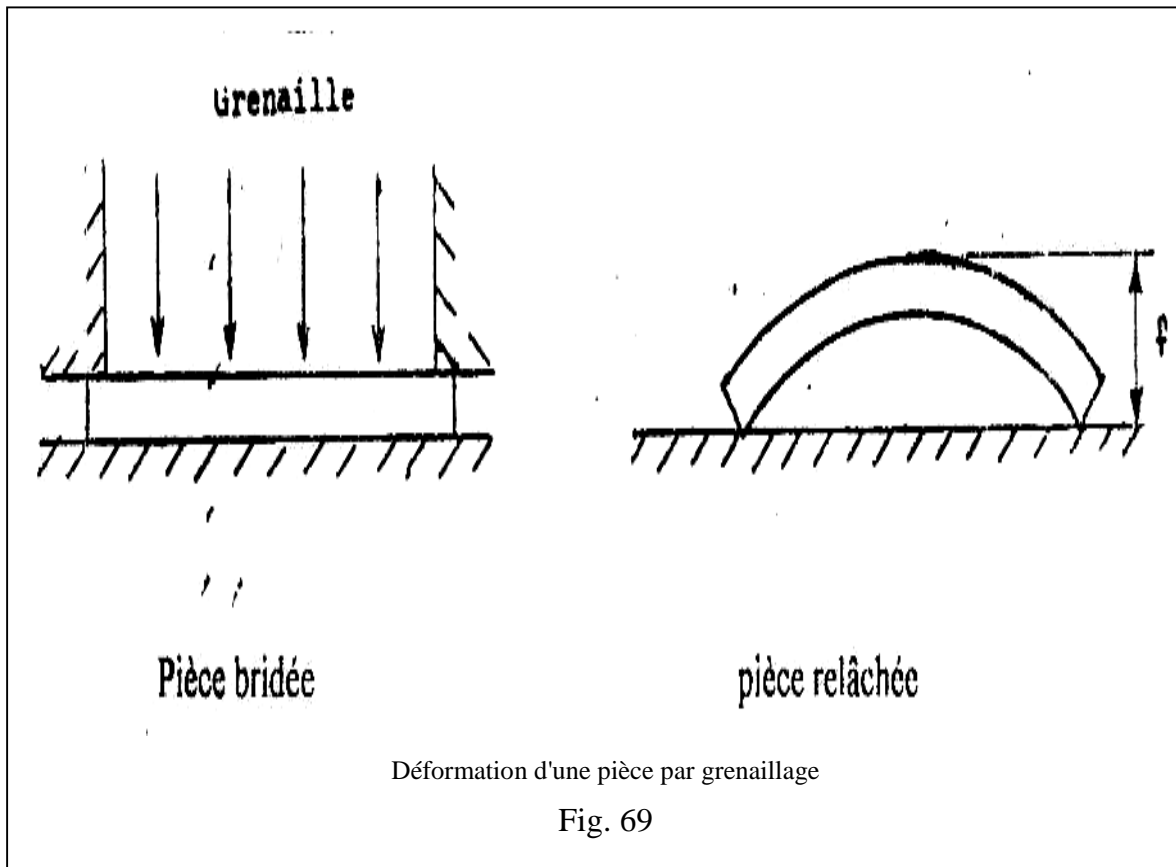
C'est un procédé mécanique qui consiste à créer des micro-déformations plastiques dans les couches superficielles des pièces, ce qui peut avoir deux effets :

- 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.

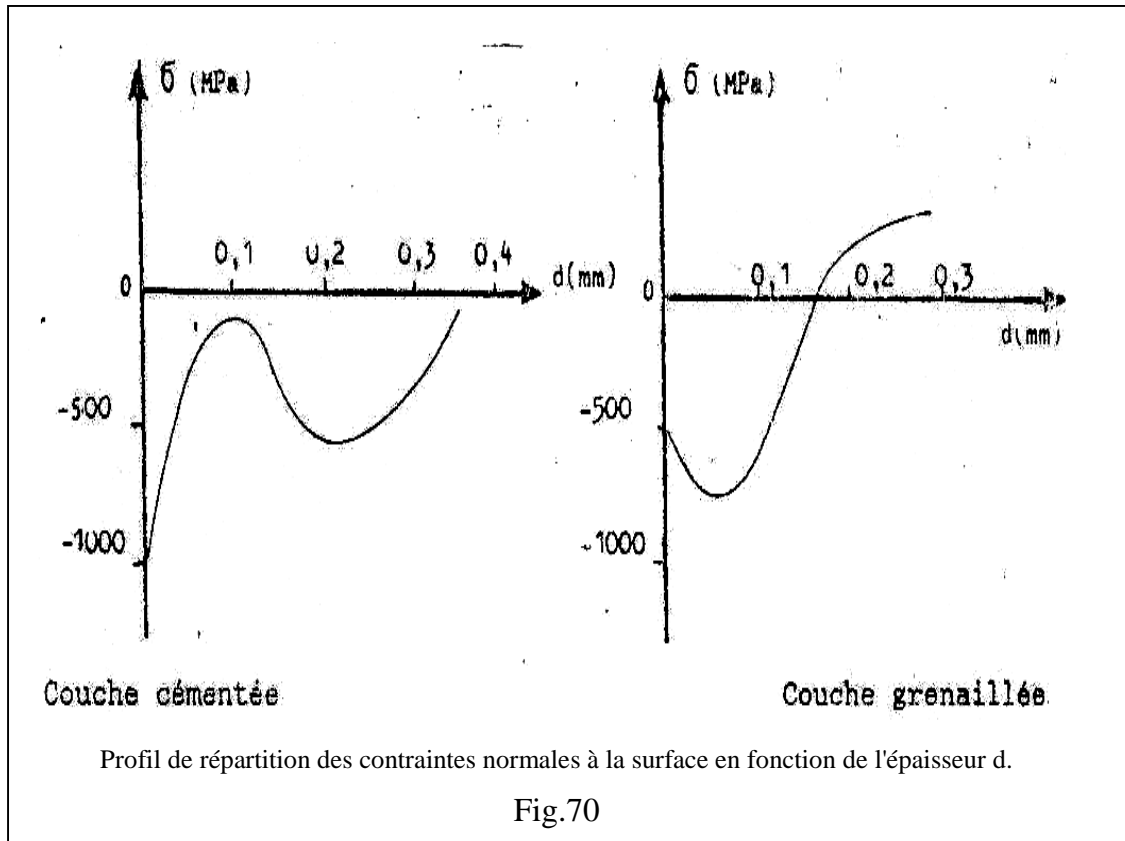
1.8.1. Le grenailage

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 69.



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. 70).
- L'autre non destructive utilise les rayons x et ne permet que la mesure des contraintes en surface.



1.8.2. 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.

1.8.3. 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.

1.8.4. Autres procédés de durcissement

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

1.8.4.1. 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.

1.8.4.2. 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

1.8.4.3. 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).

1.8.4.4. 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.

2. CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES

Les aciers et les fontes sont les matériaux métalliques les plus utilisés dans les différentes branches de l'industrie. Un acier est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est $\leq 2\%$. La fonte est aussi un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est $> 2\%$. Selon leur usage, les aciers et les fontes, sont classés en plusieurs groupes.

2.1. Classification des aciers

2.1.1. Aciers de construction

Dans les groupes des aciers de construction, on trouve les aciers au carbone et les aciers alliés, destinés à la fabrication des éléments de machines, utilisés dans la construction des ouvrages d'art et des édifices. La teneur en carbone dans ce groupe d'aciers ne dépassent pas 0,5 à 0,6 %.

Un acier de construction doit posséder en plus des bonnes propriétés mécaniques, de bonnes propriétés technologiques telles que se prêter bien au formage (laminage; forgeage, emboutissage, etc.), à l'usinage, au soudage, avoir une pénétration de trempe élevée et une faible aptitude aux déformations et aux tapures de trempe.

Il existe des centaines de nuances d'aciers de construction. Les aciers de construction sont élaborés dans des fours martin (acides et basiques), dans des fours électriques ouverts et dans des convertisseurs à soufflage supérieur.

2.1.1.1. Aciers de construction d'usage général (aciers au carbone)

Les aciers de construction au carbone forment deux classes, celles des aciers courants (ordinaires) et de qualité. D'après les conditions et le degré de désoxydation on distingue trois types de nuances.

a. Les aciers calmés :

Ils sont obtenus par désoxygénation complète du métal dans le four puis dans une poche de coulée. Ces aciers contiennent une quantité minimale de protoxyde de fer en assurant ainsi une solidification « calme » du métal dans la lingotière, qui s'accompagne de diminution de volume. A la partie supérieure du lingot solidifié, se forme une retassure et une porosité dues au retrait éliminées par chauffage lors du laminage.

b. Les aciers effervescents :

Ce sont des aciers insuffisamment désoxygénés et qui contiennent une quantité non négligeable de FeO. Le métal est dit effervescent à cause des bulles de gaz CO qui se dégagent suite à la réaction de FeO avec le carbone du métal. Le grand nombre de bulles de gaz, empêche la formation d'une retassure. Les aciers effervescents sont moins coûteux car les rebuts de leur fabrication sont réduits au minimum. Ils possèdent une plasticité élevée et se prêtent bien à l'emboutissage à froid.

c. Les aciers semi-calmés :

Ce sont des aciers intermédiaires entre les aciers calmés et effervescents et trouvent aujourd'hui un emploi toujours plus large.

2.1.1.2. Aciers de construction ordinaires (aciers courants)

Ils sont moins purifiés et contiennent donc plus de soufre, de phosphore et certaines autres inclusions non métalliques. Ils sont employés pour des pièces peu importantes tels que les fers marchands, laminés à chaud (poutres, barres, cornières, tôles, ...).

Ils sont très employés aussi dans la fabrication des éléments de machines peu importantes (axes, arbres, pignons, doigts de chenilles, bagues, boulons, écrous), les propriétés mécaniques d'un acier ordinaire peuvent être sensiblement améliorées par un

traitement thermique (généralement une trempe à l'eau après chauffage). Ainsi après trempe à l'eau, la limite élastique des tôles laminées s'accroît légèrement sans que la plasticité ne se dégrade ($A = 15$ à 26 %).

Pour les constructions soudées, on utilise essentiellement les aciers calmés et semi-calmés à faible teneur en Mn et Si. Les aciers prévus à cet effet doivent avoir une faible aptitude au vieillissement thermique.

Pour les nuances devant être utilisées dans les régions froides, le seuil de rupture à froid acquiert une grande importance. Les aciers doivent être calmés et traités thermiquement (amélioration ou normalisation).

Les aciers de construction ordinaires, ayant une composition chimique définie et demandent une bonne tenue à l'usure, (axes, poussoirs, vis sans fin, pignons), subissent généralement une cémentation ou cyanuration.

2.1.1.3. Aciers de construction de qualité

Ces aciers ont une composition chimique plus rigoureuse, des teneurs plus faibles en soufre ($< 0,04$ %) et en phosphore ($< 0,035$ %), et suivant le degré de désoxydation, ils peuvent être calmés ou effervescents. Les aciers à faible teneur en carbone, donc à faible résistance, à plasticité élevée et à bonne soudabilité, s'emploient pour des pièces peu sollicitées. L'aptitude de ces aciers à l'estampage est d'autant plus faible que leur teneur en carbone est plus élevée. Les aciers de qualité sont utilisés :

- Sans traitement thermique.
- Avec le traitement de normalisation.
- Avec un traitement de cémentation lorsque les pièces demandent de faibles charges et une bonne tenue à l'usure (arbres à came, axes, leviers, etc.).

Les aciers à teneur moyenne en carbone (0,3 à 0,5) %, s'emploient après une normalisation, une amélioration et une trempe superficielle pour des pièces très variées dans la construction mécanique (vilebrequins, bielles, pignons, tiges, etc.). A l'état normalisé, la résistance de ces aciers est plus grande que celle des aciers à bas carbone, alors que la plasticité est plus basse. A l'état recuit, ces aciers se prêtent bien à l'usinage. L'acier à 0,45 % C est souvent utilisé pour les roues dentées et les arbres.

Les aciers contenant entre 0,6 et 0,85 % C possèdent une résistance et une limite élastique plus grandes et une tenue à la l'usure plus élevée. Ils s'emploient après trempe et revenu, normalisation et revenu, ainsi qu'après trempe superficielle pour la fabrication des ressorts, tiges, rondelles, cylindres de laminoirs, etc.

Les aciers au carbone de qualité, contiennent du manganèse (0,7 à 1) %, ce qui permet d'améliorer la résistance en augmentant la pénétration de trempe et de réduire légèrement la plasticité.

2.1.2. Aciers de décolletage

Les aciers de décolletage possèdent de bonnes aptitudes à l'usinage tout en assurant un bon état de surface. Ils contiennent généralement une teneur accrue en soufre et en phosphore. Le soufre se combine au manganèse en formant MnS sous forme d'inclusions allongées dans le sens du laminage et contribue à la formation d'un copeau court et cassant. Le phosphore améliore la dureté et la résistance, et élève le seuil de fragilité à froid.

La teneur en carbone varie de 0,08 à 0,45 %, celle du manganèse de 0,7 à 1,5 %, celle du soufre de 0,08 à 0,30 % et celle du phosphore de 0,08 à 0,15 %. La résistance et la dureté augmentent, alors que la plasticité diminue avec la teneur en carbone.

Exemples :

- Acier à 0,12 % C, $R = 420 \text{ N/mm}^2$, $HB = 160$, $A = 22 \%$.
- Acier à 0,40 % C, $R = 600 \text{ N/mm}^2$, $HB = 207$, $A = 14 \%$.

Parfois on rajoute à l'acier de 0,15 à 0,30 % de plomb qui fond lors de la coupe et diminue ainsi la résistance, les frottements et l'effort de coupe.

Les aciers de décolletage étirés à froid (écrouis) ont une résistance assez élevée (jusqu'à 800 N/mm²), l'emploi de ces aciers est destiné à la fabrication de vis, de boulons, d'écrous, ainsi qu'aux pièces fortement sollicitées.

2.1.3. Aciers d'amélioration

Ce sont les aciers utilisés après trempe et revenu à haute température et contenant entre 0,3 et 0,5 % C. Les aciers d'amélioration doivent avoir une limite élastique élevée, une faible susceptibilité à l'entaille, une bonne pénétration de trempe et une faible aptitude à la fragilité de revenu.

Les nuances contenant entre 0,35 et 0,45 % s'emploient surtout pour les pièces de sections relativement petites, ou sollicitées par des charges relativement faibles. Pour des pièces volumineuses, on emploie les aciers alliés pour augmenter la pénétration de trempe. Pour des pièces encore plus grandes, on utilise les aciers fortement alliés exposés ci-après.

2.1.3.1. Aciers alliés au chrome

L'addition du chrome de 0,8 à 1,2 % accroît la pénétration de trempe et permet de former un carbure plus dur que la cémentite, ce qui contribue à l'augmentation de la dureté, de la résistance à la rupture et à l'usure, sans accroître la fragilité.

Les aciers alliés au chrome peuvent contenir d'autres éléments tels que le bore (0,002 à 0,005) % qui augmente la pénétration de trempe et le vanadium (0,1 à 0,2) % qui renforce les propriétés mécaniques de l'acier.

2.1.3.2. Aciers alliés au chrome-manganèse.

L'addition combinée de chrome (0,9 à 1,2 %) et du manganèse (0,9 à 1,2) % permet d'accroître suffisamment la résistance et la pénétration de trempe. Ces aciers s'emploient pour des pièces de sections variant de 20 à 40 mm. L'addition supplémentaire de titane à l'acier, abaisse son aptitude à la surchauffe.

2.1.3.3. Aciers alliés au chrome-silicium-manganèse (chromansil)

Les propriétés mécaniques de ces aciers sont très élevées. La composition chimique moyenne est constituée de :

- 0,2 à 0,3 % C.
- 0,9 à 1,1 % Cr.
- 0,8 à 1,1 % Mn.
- 0,9 à 1,2 % Si.

Les caractéristiques mécaniques des aciers au Cr-Si-Mn après trempe à l'huile (880°C) et revenu (540°C) sont les suivantes :

- $R = 1100 \text{ N/mm}^2$.
- $R_e = 850 \text{ N/mm}^2$.
- $A = 10 \%$.
- $K = 50 \text{ J/cm}^2$.
- $Z = 45 \%$.

Les aciers "chromansil" possèdent une bonne soudabilité une faible pénétration de trempe. Celle ci peut être améliorée par une addition de 1,4 à 1,8 % de nickel.

2.1.3.4. Aciers alliés au chrome-nickel

Ces aciers possèdent une bonne résistance, une bonne ductilité et une grande pénétration de trempe. Ils sont employés pour la fabrication de grosses pièces de formes complexes, sollicitées en service à des chocs et des charges vibratoires.

Le nickel assure la ductilité maximale, et combiné au chrome, ils assurent une pénétration de trempe élevée. Combiné au molybdène, le nickel abaisse sensiblement le seuil de fragilité à froid.

Enfin nous avons rassemblé les principales nuances des aciers alliés d'amélioration et leurs caractéristiques dans le tableau ci-dessous.

Nuance DIN	Rm (daN/mm ²)	K (J/cm ²)	Applications technologiques
41 Cr 4	80 à 120	5 à 7	Boulonnerie pour matriçage à froid, à chaud. Se prête à la trempe par induction.
50 CrV 4	90 à 130	4 à 5	Essieux et arbres fortement sollicités. Se prête à la trempe par induction.
25 CrMo 4	65 à 105	7 à 10	Pièces d'avions, d'automobiles fortement sollicitées. Vilebrequins, leviers de direction, bielles, arbres.
42 CrMo 4	75 à 130	5 à 8	
30 CrMoV 9	90 à 145	4 à 6	Pièces de grande résistance : engrenages, axes.
24 NiCr 14	75 à 120	8 à 12	Pignons, roues dentées.
35 NiCr 18	110 à 165	4 à 7	Pièces très sollicitées, grande résistance aux chocs.
36 NiCrMo 4	75 à 130	6 à 10	Pièces pour flexion, chocs, torsion alternée : bielles, vilebrequins, arbres de cardans, d'engrenages, fusées d'essieux, leviers.
30 NiCrMo 8	90 à 145	5 à 8	
34 NiCrMo 6	80 à 130	6 à 9	
40 Mn 4	70 à 105	4 à 6	Pièces de faibles sections : boulons, vis, arbres.
37 MnSi 5	70 à 120	3 à 6	Pièces pour haute résistance à l'usure : roues d'engrenages, arbres.

2.1.4. Aciers de cémentation

Ce sont des aciers à faible teneur en carbone (0,10 à 0,25) %. Après trempe, cémentation et revenu à basse température, la dureté de la couche cémentée atteint 62 HRC et celle du cœur (20 à 40) HRC.

Les aciers de cémentation doivent avoir au cœur des propriétés mécaniques élevées, en particulier, une très haute limite élastique. Les éléments d'alliage améliorent les propriétés mécaniques.

2.1.4.1. Aciers alliés au chrome

La teneur en chrome des pièces simples, varie de 0,7 à 1 %, la profondeur de la couche cémentée atteint 1,5 mm. Une trempe à l'huile, suivie de cémentation, donne au cœur des pièces, une structure bainitique. Les propriétés mécaniques sont de l'ordre de :

- $R = (700 \text{ à } 800) \text{ N/mm}^2$.
- $R_e = (500 \text{ à } 650) \text{ N/mm}^2$.
- $A = (11 \text{ à } 12) \%$.
- $K = (60 \text{ à } 70) \text{ J/cm}^2$.

2.1.4.2. Aciers alliés au chrome-vanadium

L'addition de vanadium (0,1 à 0,2) % à un acier au chrome, améliore ses propriétés mécaniques, celles-ci, deviennent au cœur.

- $R = (750 \text{ à } 800) \text{ N/mm}^2$.
- $R_e = (550 \text{ à } 600) \text{ N/mm}^2$.
- $A = (12 \text{ à } 13) \%$.
- $K = 80 \text{ J/cm}^2$.

La faible pénétration de trempe de ces aciers ne permet de les utiliser que pour des pièces de petites dimensions (axes de pistons, arbres à cames).

2.1.4.3. Aciers alliés au chrome-nickel

L'addition simultanée de chrome et de nickel augmente la résistance, la plasticité et la ductilité au cœur des pièces. De plus, le nickel augmente la résistance et la ductilité de la couche cémentée.

Ces aciers sont employés pour les grosses pièces supportant, en service, des charges dynamiques importantes. Ils sont peu susceptibles de surchauffe en cémentation prolongée et n'ont pas de tendance à la sursaturation en carbone de la couche superficielle. L'addition de tungstène ou de molybdène aux aciers au chrome-nickel, accroît la stabilité de l'austénite surfusionnée et par conséquent, la pénétration de trempe.

2.1.4.4. Aciers alliés au chrome-manganèse

Dans beaucoup de cas, puisque les aciers au chrome-nickel coûtent chers, ils sont remplacés par les aciers au chrome-manganèse qui sont employés pour la fabrication des engrenages, des arbres, etc.

Les aciers alliés au chrome- manganèse sont moins résistants à la surchauffe et possèdent une ductilité plus faible par rapport aux aciers chrome-nickel. Une faible addition de titane (0,03 à 0,09) % à cet acier donne après cémentation, trempe. revenu, une couche cémentée de dureté élevée (60 HRC), une pénétration de trempe très faible, ainsi une faible addition de molybdène l'accroît et donne une dureté maximale en surface.

Dans le tableau ci-dessous, nous avons porté les principales nuances d'aciers alliés de cémentation et leurs applications.

Nuance DIN	Rm (daN/mm ²)	Dureté (HB)	Applications technologiques
13 Cr 3	50 à 60	141 à 183	Pièces de construction avec exigences extraordinaires, résistance du cœur très élevée, haute résistance à l'usure: vis sans fin, engrenages..
15 CrNi 6	60 à 75	169 à 211	
18 CrNi 8	60 à 80	183 à 225	
15 CrMo 5	60 à 75	169 à 211	Pièces soumises à des efforts élevées de tous genre : roues dentées, engrenages de boîtes de vitesses, arbres à cames.
20 CrMo 5	75	220	
16 MnCr 5	60 à 70	155 à 200	
20 MnCr 5	60 à 75	169 à 211	
18 NiCrMo 6	115 à 150	210	Axes, engrenages, pignons, leviers de direction.

2.1.5. Aciers de nitruration

Appliquée à un acier non allié, la nitruration ne donne qu'un durcissement faible et la pénétration de l'azote en profondeur fragilise les pièces. Par contre, il suffit d'introduire une faible quantité d'aluminium (1 à 2) % ou éventuellement d'autres éléments d'alliage, tels que le chrome, pour que la consolidation en surface s'intensifie sans affecter le cœur. L'addition d'une certaine quantité de molybdène, assure le maintien prolongé à 550°C et ne change pas la résilience (pas de fragilisation).

La dureté obtenue dans la couche nitrurée est d'autant plus élevée que le teneur en aluminium est plus forte. Pour obtenir une résistance au cœur, plus importante, on augmente la teneur en carbone (jusqu'à 0,5 %), en gardant inchangée celle de l'aluminium. Le tableau suivant rapporte les principales nuances de nitruration et leurs caractéristiques.

Désignation	Caractéristiques				Applications
	Rm	Re	A	K	
	(da/mm ²)		(%)	(J/cm ²)	
30 CDA 6-612	800	700	18	19	Axes, vilebrequins, arbres, engrenages
45 CDA 6-12	900	800	16	16	Outils d'emboutissage, de sertissage, engrenages fortement chargés.
30 CAD 6-6	800	700	18	19	Même usage que ci-dessus. Couche nitrurée plus tenace et moins dure.
40 CAD 6-6	900	800	15	16	
30 CAD 6-3	800	700	18	19	
45 CAD 6-3	900	800	15	16	
20 CD 12	700	600	22	18	Pièces soumises au chocs importants et nécessitant une grande résistance à l'écaillage
30 CD 12	800	700	19	23	
30 CD 12 revenu à 550°C	1300	1200	11	8	
Z 35 CS 8	950	850	18	6	Pièces résistant à l'oxydation à chaud : soupapes à tiges nitrurées.
Z 50 CNW 20	880	450	30	10	

2.1.6. Aciers pour constructions soudées

Comme leur nom l'indique, les aciers pour constructions soudées doivent d'abord avoir une bonne soudabilité. De plus, il est nécessaire qu'ils aient une limite élastique assez élevée et ils ne doivent pas être susceptibles de rupture par fragilité. Ces aciers contiennent en général :

- Une faible teneur en carbone (0,15 à 0,22) % cause des exigences de soudabilité.
- Une teneur relativement élevée en manganèse à cause des exigences de résistance mécanique.
- Eventuellement de faible addition de chrome et de molybdène.

Les aciers pour constructions soudées sont très employés en construction, métalliques soudées et en chaudronnerie, notamment, dans le domaine ferroviaire (wagons, etc.).

2.1.7. Aciers à ressorts

Les aciers à ressorts doivent répondre aux exigences suivantes :

- Une bonne résistance aux faibles déformations plastiques.
- Une bonne limite de fatigue.
- Un grand pouvoir trempant.
- Une régularité dans le comportement.

Ces propriétés s'obtiennent pour une teneur en carbone supérieure à 0,5 % après trempe et revenu à 500°C, du point de vue composition chimique, les aciers à ressorts diffèrent très peu des aciers de construction, mais les conditions d'élaboration sont plus rigoureuses.

Généralement la limite élastique des aciers à ressorts au carbone est supérieure à 800 N/mm² et celles des aciers à ressorts alliés est supérieure à 1000 N/mm². Après trempe, tout le volume de la pièce doit avoir une structure martensitique.

La nuance avec la teneur la plus élevée en carbone (1,25 à 1,32) % est pauvre en manganèse (0,1 à 0,25) %. Cette nuance est utilisée, après traitement, pour faire des rubans de scie, de la coutellerie, des lames de grattoirs, etc. Les teneurs moyennes en éléments d'alliages contenus dans les aciers à ressorts sont : Si : (1,5 à 2,8) %, Mn : (0,6 à 1,2) %, Cr : (0,2 à 1,2) %, Ni : (1,4 à 1,7) %, W : (0,8 à 1,2) %.

Ces éléments assurent la pénétration de trempe, affinent le grain et augmentent la tenue à la relaxation. Le silicium élève la pénétration de trempe et retarde la décomposition de la martensite pendant le revenu. Les autres éléments sont plus ou moins présents suivant l'usage des ressorts.

Dans le cas courant, les ressorts sont durcis par trempe et revenu à moyenne température, ou par écrouissage superficiel (grenailage) qui permet d'augmenter la limite de fatigue. L'emploi des aciers à ressorts est très varié (voir tableau ci-dessous).

- Dans le cas de sollicitations normales, on utilise les aciers au manganèse-silicium.
- Dans le cas où s'impose un amortissement efficace et une longue durée de vie sous sollicitations élevées, on emploie les aciers au chrome-silicium et au chrome-vanadium.

Nuances DIN	Re (daN/mm ²)	Dureté (HB)	Applications
46 Si 7	90	255	Ressorts de suspension pour locomotives et wagons.
60 SiMn 5	85	250	Ressorts en spirales, coniques, hélicoïdaux, à lames.
46 Mn 7	75 à 90	230	Ressorts soumis à un taux élevé de flexion alternée : Ressorts à lames, ressorts à boudins.
67 SiCr 5	85	240	Ressorts de soupapes et régulateurs.
50 CrV 4	80	235	Ressorts à boudins, barres de torsion, ressorts de soupapes (T = 350°C).

2.1.8. Aciers à roulements

Les aciers à roulements doivent satisfaire à des exigences très rigoureuses en ce qui concerne les inclusions non métalliques. Leur présence dans la partie sollicitée, provoque une concentration de contraintes qui entraîne une rupture de fatigue prématurée. Les bagues, rouleaux et bielles, exigent dans les conditions de travail, une dureté, une tenue à l'usure et une résistance, élevées.

A l'état recuit, ces aciers ont une structure perlitique à grains fins, assez usinable avec une dureté d'environ 187 HB. Après trempe à l'huile et revenu à basse température (200°C)

la dureté atteint (61 à 66) HRC.

Les bagues, les rouleaux et les bielles sont fabriquées en acier à haut carbone contenant du chrome. Dans le cas de grosses pièces, on utilise comme addition, du chrome-manganèse-silicium ou du chrome-nickel (aciers de cémentation). Pour les roulements travaillant dans des milieux agressifs, on emploie l'acier inoxydable à 1,2 % C et 1,4 % Cr.

Dans le tableau, ci-dessous, nous avons porté quelques nuances d'aciers pour roulements et leurs principales applications.

Nuances DIN	Rm (daN/mm ²)	Dureté (HRC)	Applications
105 Cr 4	70	63 à 67	Roulements à bagues de 10 à 17 mm de diamètre.
100 Cr 6	70	63 à 66	Bagues de roulements à billes, disques et anneaux de butées à billes et à galets, sièges de roulements.
100 CrMn 6	73	63 à 66	Bagues de plus de 30 mm d'épaisseur de paroi à l'état fini.
X90 CrMoV 18	85	57 à 59	Roulements inoxydables, rouleaux à billes, à galets.

2.1.9. Aciers à haute résistance (Maraging)

Les exigences de ces aciers sont les suivantes :

- Une résistance mécanique élevée.
- Une bonne tenue à la rupture fragile.
- Une fiabilité élevée en service.

Ces prescriptions correspondent, dans une grande mesure, aux aciers martensitiques de vieillissement qui contiennent très peu de carbone (< 0,03 %) et appelés aciers « Maraging ». Ce sont les ferronickels martensitiques traités par durcissement structural. Ils sont souvent additionnés de cobalt, de molybdène, de niobium, etc., pour assurer le vieillissement.

Lors du vieillissement, le chrome consolide la martensite, améliore la tenue à la corrosion. Le manganèse provoque le vieillissement de la martensite Fe-Ni, mais diminue la plasticité et la ductilité de la martensite vieillie.

Le plus utilisé des aciers Maraging est le Z3 NKDT 18-9-5 contenant 18 % Ni, 9 % Co, 5 % Mo, et 0,7 % Ti. Son traitement thermique comporte un recuit d'une heure à 820°C avec un refroidissement à l'air, suivi d'un traitement de vieillissement de 3 heures à environ 480°C. Les caractéristiques mécaniques après recuit et vieillissement sont portées dans le tableau ci-dessous.

Etat	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)	Z (%)	KCV (J/cm ²)
Recuit	650 à 1020	630 à 700	15 à 20	70 à 80	31 à 45
Vieilli	1750 à 1950	1650 à 1850	10 à 12	48 à 57	31 à 45

L'acier Maraging se distingue donc par ses bonnes propriétés de résistance et de ductilité. A l'état trempé, il se prête bien à l'usinage, au corroyage et au soudage. Les aciers martensitiques de vieillissement s'emploient dans les industries aéronautiques, navales, dans les constructions d'appareils de mesure et de contrôle, etc.

2.1.10. Aciers à haute tenue à l'usure

Il existe deux classes d'aciers résistant à l'usure :

- Les aciers austénitiques au manganèse.
- Les aciers martensitiques au chrome.

2.1.10.1. Aciers austénitiques au manganèse

Ce sont des aciers austénitiques à haute teneur en manganèse, de composition moyenne de (0,9 à 1,3) % C et de (11,5 à 14,5) % Mn.

Ces aciers n'ont pas une dureté particulièrement élevée, mais ils possèdent une aptitude remarquable à s'écrouir sous l'effet de faibles déformations plastiques. Ils ont de ce fait, une très bonne tenue au frottement, convenablement traités, ils sont très peu fragiles. Leur haute aptitude à s'écrouir, les empêche d'être usinables et ils ne peuvent être mis en forme que par moulage et rectification. Après coulée, ils sont constitués d'austénite et de carbure en excès $(Fe, Mn)_3C$, qui se précipite aux joints de grains en altérant la résistance et la ductilité.

Les aciers austénitiques au manganèse conviennent pour des pièces de frottement (rails de chemins de fer, godets d'excavateur, mâchoires de concasseur, etc.). L'acier le plus connu de cette catégorie est l'acier "Hadfteld" de désignation normalisée Z 120 M 12, dont les caractéristiques mécaniques sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Etat	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)	Z (%)	Dureté (HB)
Trempe à l'eau	850 à 1050	340 à 440	40 à 60	35 à 40	160
Ecroui (10 à 20) %	1200 à 1250	800 à 900	15 à 25	-	200

L'addition d'environ 1 % de molybdène permet d'éviter les précipitations indésirables de carbure, et de surclasser l'acier Hadfield du point de vue résistance à l'abrasion.

2.1.10.2. Aciers martensitiques au chrome

Les aciers martensitiques au chrome sont des aciers résistants à l'usure, usinables et qui peuvent imposer une certaine conservation de dimensions. Il existe deux catégories :

- Les aciers ayant (0,4 à 0,48) % C et (0,7 à 1,1) % Cr.
- Les aciers ayant (0,95 à 1,1) % C et (1,3 à 1,6) % Cr.

Les aciers de la première catégorie correspondent à la nuance 42 CD 4. Pour les applications demandant une bonne résistance à l'usure, cette catégorie exige une élaboration particulièrement soignée.

Les aciers, de la deuxième catégorie, correspondent à la nuance 100 C 6, qui est une nuance d'acier pour roulements, ils ont une très haute dureté à l'état traité. Dans le cas des pièces volumineuses, pour lesquelles la trempabilité du 100 C 6 est insuffisante, on rajoute (0,2 à 0,4) % de molybdène sans faire varier la composition chimique du carbone et du chrome.

2.1.11 Aciers résistant à chaud

Le besoin d'aciers pour emploi à haute température se fait sentir dans les domaines industriels suivants :

- Construction des fours; (soles, chemins de roulement, grilles).
- Construction des générateurs de vapeur.
- Boulonnerie.
- Construction des turbines à gaz ou à vapeur.

L'augmentation de température influe fortement sur les propriétés mécaniques, en particulier, elle provoque la diminution des caractéristiques de résistance (E, Rm, Re et HB) et l'élévation des caractéristiques de plasticité en particulier, et le fluage. Par conséquent, les exigences d'emploi sont les suivantes.

- Grande résistance à la déformation à chaud (fluage, relaxation, fatigue à chaud).
- Bonne résistance aux chocs thermiques.
- Grande résistance aux agents chimiques à chaud (oxydation, corrosion).
- Facilité de mise en oeuvre (aptitude à la conformation à chaud ou à froid, soudabilité, usinabilité).

La résistance à chaud peut être améliorée par addition d'éléments d'alliages à la solution solide. Ceux-ci renforcent l'énergie de liaison interatomique et retardent le processus de diffusion, tout en élevant la température de recristallisation. Les aciers, pour

emploi à haute température, atteignant les 950°C (pointes d'outils de coupe en service), sont élaborés à base de nickel, de fer et de cobalt, alors que ceux atteignant des températures encore plus élevées (1200 à 1500)°C, sont réalisés à base de chrome, de molybdène et d'autres éléments difficilement fusibles. Parmi les aciers résistants à chaud, on peut citer les aciers perlitiques, martensitiques et austénitiques.

2.1.11.1. Aciers perlitiques

Les aciers perlitiques sont employés dans le cas des pièces susceptibles de fluage, mais relativement peu chargées et ne dépassent pas la température de 600°C (pièces d'installations énergétiques). Ce sont des aciers à bas carbone dont la teneur en chaque élément additionné (Cr, Mo, V) est égale ou supérieure à 1 %. Ces derniers améliorent la résistance à chaud, notamment avec la formation du carbure VC.

Les aciers perlitiques sont souvent soumis à la normalisation (vers 1000°C) et au revenu à haute température (vers 700°C). Ce traitement leur confère une structure de perlite lamellaire fine (sorbite) dont la résistance à chaud est plus élevée.

2.1.11.2. Aciers martensitiques résistant à chaud

Ce sont des aciers martensitiques alliés au W, V, Mo, Ti, destinés à la fabrication des pièces et des ensembles de turbines à gaz et des installations à vapeur. Les éléments d'alliages permettent d'élever la température de recristallisation, de former des carbures de type $M_{23}C_6$, M_6C , M_2C , MC et donc d'améliorer la résistance à chaud.

La résistance optimale à haute température pour les aciers à haute teneur en chrome, après une trempe martensitique vers 1020°C, suivie de revenu, est due à la structure de sorbite que lui confère ce traitement.

Les aciers martensitiques au chrome-silicium (silichrome) sont employés pour les soupapes d'échappement des moteurs à combustion interne, après une trempe (vers 1020°C) et un revenu à haute température.

2.1.11.3 Aciers austénitiques résistant à chaud

Ce sont les aciers à forte teneur en carbone, nickel et manganèse qui favorisent la structure austénitique. Ils sont employés pour des pièces travaillant entre 500 et 750°C. La résistance à chaud est plus élevée que celle des aciers martensitiques et ferritiques. Les aciers austénitiques sont plastiques et se prêtent bien au soudage.

On peut obtenir d'excellentes propriétés d'aciers résistants à chaud par addition, à la composition classique des aciers inoxydables 78-10 :

- Soit d'éléments durcissant d'austénite à l'état hypertrempe (B, Mo, W, ...).
- Soit d'éléments donnant lieu à des précipitations en cours de fluage (Ti, Nb, ...).
- Soit d'éléments permettant le durcissement structural de l'austénite (Mo, Ti, ...).

2.1.11.4. Austénites complexes

Les exigences, sans cesse, croissantes dans le domaine de l'industrie des turbines à gaz et des turboréacteurs, ont conduit à renforcer les teneurs en chrome et en nickel, et à ajouter en plus des teneurs en éléments spéciaux, tels que le cobalt aboutissant ainsi à des compositions dans lesquelles la teneur en fer peut descendre au dessous de 50 %. Exemple : l'alliage Z 12 CNKDW 20-20-20 contenant 20 % Cr, 20 % Ni, 20 % CO, 2 % Mo et 3 % W.

2.1.12. Aciers à haute tenue à la corrosion (aciers inoxydables)

La tenue à la corrosion s'obtient en ajoutant aux aciers ordinaires, des éléments chimiques qui forment en surface, des pellicules protectrices fortement liées au métal de base et qui empêchent ainsi le contact direct métal-milieu corrosif.

Les éléments d'addition (chrome, aluminium, silicium) se dissolvent dans le fer et forment, pendant l'échauffement de l'acier, des couches protectrices d'oxydes tels que $(Cr, Fe)_2O_3$, $(Al, Fe)_2O_3$. Au fur et à mesure que la teneur des éléments d'addition est élevée, plus la tenue à la corrosion s'élève en température :

- Avec (5 à 8) % Cr, on peut atteindre $T = (700 \text{ à } 750)^\circ\text{C}$.
- Avec (15 à 17) % Cr, on peut atteindre $T = (950 \text{ à } 1000)^\circ\text{C}$
- Avec 25 % Cr et 5 % Al, on peut atteindre $T = 1300^\circ\text{C}$.

Les aciers à haute tenue à la corrosion peuvent être classés en deux groupes principaux : les aciers alliés au chrome qui, après refroidissement à l'air obtiennent une structure martensitique ou ferritique et les aciers alliés au chrome-nickel à structure austénitique.

2.1.12.1. Aciers inoxydables au chrome

L'addition à l'acier entre 12 et 14 % de chrome, rend positif le potentiel électrochimique du métal qui devient ainsi résistant à la corrosion dans l'atmosphère, l'eau potable, l'eau de mer et dans plusieurs sortes d'acides, de sels et d'alcalis. Les aciers inoxydables au chrome contiennent une faible teneur en carbone et éventuellement des additions d'aluminium pour améliorer la résistance à la corrosion à chaud. Il est indiqué deux types de ces aciers dans le tableau ci-dessous.

Nuances	% C	% Cr	Traitements thermiques	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)
Z3 C 13	0,03	13	Trempe (air ou huile) à 950°C et revenu (2 à 4) h vers $(650 \text{ à } 700)^\circ\text{C}$	550 à 700	350 à 550	15
Z5 CA 13	0,05	13		450 à 600	250 à 450	20

Malgré sa faible teneur en carbone, l'acier Z3 C13 prend partiellement par la trempe, une structure martensitique. L'acier est inoxydable, grâce à la présence d'aluminium (0,2 %). Ces deux nuances sont soudables. La tenue à la corrosion des aciers à 13% Cr est meilleur, mais à condition que tout le chrome soit à l'état de solution solide. Dans ce cas, il forme à la surface une couche protectrice dense de type Cr₂O₃.

Les aciers Z12 C13 et Z20 C13 s'emploient pour les pointeaux des carburateurs, les ressorts, les instruments chirurgicaux, les aciers à plus forte teneur en chrome (17 % et plus) ont une tenue à la corrosion plus élevée. L'acier Z12 C17 s'emploie après recuit de recristallisation vers 750°C dans l'industrie alimentaire et l'industrie légère.

Les aciers ferritiques Z15 C 25 et Z15 C 28 s'emploient, le plus souvent, sans traitement thermique pour la fabrication des pièces travaillant dans des milieux agressifs (acide nitrique bouillant, ...). Ces nuances résistent à l'oxydation à chaud jusqu'à 1150°C en atmosphère sulfureuse. Leurs caractéristiques mécaniques à chaud sont faibles et elles deviennent facilement fragiles après quelques temps de maintien à haute température, probablement à cause du grossissement exagéré du grain.

2.1.12.2. Aciers inoxydables au chrome-nickel

Ce sont des aciers austénitiques, additionnés généralement de chrome, nickel ou de manganèse. Ils ont une faible limite d'écoulement, une résistance modérée, une plasticité élevée et une bonne tenue à la corrosion dans les milieux oxydants. Les caractéristiques de quelques nuances d'aciers inoxydables Cr-Ni, après trempe à l'eau à 1150°C sont rapportées dans le tableau suivant.

Nuances	Composition chimique				Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)
	% C	% Cr	% Ni	% Si			
Z15 CN24-12	0,15	24	12		600	250	35
Z10 CN25-20	0,10	25	20	-	600	250	35
Z12 NCS38-18	0,12	18	38	2	600	300	30

Des nuances voisines à celles mentionnées dans le tableau, teneurs en carbone plus élevée, permettent d'améliorer la coulabilité en moulage. Les teneurs en nickel peuvent être abaissées en raison de l'influence gammagène du carbone. Les aciers inoxydables au chrome-nickel coûtent très chers. C'est pourquoi, on a recours à des aciers moins coûteux dans lesquels le nickel est remplacé par le manganèse. Ces aciers servent dans la fabrication des appareils travaillant dans des milieux faiblement corrosifs.

Par trempe (1050°C), les aciers au Cr-Ni-Mn, acquièrent une structure austénitique. Dans le domaine de déformation, ils subissent, d'une part, un fort durcissement, et d'autre part, une transformation partielle en martensite.

Les tableaux suivants résument différentes nuances d'aciers inoxydables ferritiques, austénitiques et martensitiques ainsi que leurs domaines d'applications.

a. Aciers inoxydables ferritiques :

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X8 Cr17	150	45 à 60	Ustensiles de cuisines, ferrures de portes, revêtements de comptoirs.
X8 CrTi17	150	45 à 60	Résistant à la corrosion intercrystalline : bacs, pales d'agitateurs.
X8 CrMoTi17	160	50 à 65	Résistant aux acides : citrique, sulfurique, borique bouillant, acétique froid et bouillant, sulfate d'ammoniac bouillant, iode sec, vinaigre.

b. Aciers inoxydables austénitiques :

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X12 CrNi18-8	175	50 à 70	Ustensiles de cuisines, ferrures de portes et fenêtres, Instruments chirurgicaux, sièges de soupapes.
X10 CrNiTi18-9	185	50 à 75	Ustensiles, appareils pour l'industrie alimentaire et chimique, pièces pour réacteurs nucléaires.
X12 CrNiS18-8	175	50 à 70	Crochets à viandes, écrous, vis à bielles.
X8 CrNi12-12	175	50 à 65	Ustensiles de cuisines
X5 CrNiMo18-12	175	50 à 70	Instruments de chirurgie, conduite d'eau résiduaire, gicleurs résistant aux acides, armatures.

c. Aciers inoxydables martensitiques :

Nuances DIN	HB état recuit	R (dan/mm ²)	Applications
X10 Cr13	160	50 à 65	Instruments médicaux, canons de fusils de chasse, rivets, ustensiles de cuisine.
X20 Cr13	240	60 à 70	Moulage : hélices de navires, roues, godets pour turbines. Forgeage : arbres, boulons.
X40 Cr13	225	70 à 85	Instruments de chirurgie, couteaux de table, hachoir, pieds à coulisse.
X35 CrMo17	260	70 à 85	Aciers inattaquables à l'eau de mer, bonne résistance à chaud.
X22 CrNi17	260	80 à 95	
X90 CrMoVCo17	265	70 à 85	Disques perforés pour cuisine, couteaux, bistouris.

2.2. Aciers à outils

Les aciers à outils sont des aciers au carbone et alliés à plus de 0,5 % C. Ils sont caractérisés par :

- Une dureté élevée (60 à 65) HRC.
- Une grande résistance à l'usure.
- Une forte résistance mécanique.

Dans le cas général; ce sont des aciers hypereutectoïdes et lédéburitiques, dont la structure après trempe et revenu à basse température se compose de martensite et de carbures. Pour les outils qui demandent une ductilité relativement élevée (matrices de formage à chaud), on emploie des aciers hypoeutectoïdes. Après trempe et revenu à haute température, ils acquièrent une structure de sorbite.

On distingue actuellement quatre classes d'aciers à outils :

- Classe 1 : aciers au carbone pour travail à froid.
- Classe 2 : aciers alliés pour travail à froid.
- Classe 3 : aciers pour travail à chaud
 - avec chocs : forgeage, estampage, matriçage.
 - Sans chocs : moules, pièces de filage.
- Classe 4 : aciers à coupe rapide.

Les aciers à outils sont repérés, indépendamment de la désignation normalisée, par quatre chiffres :

- Le premier indique la classe.
- Les trois autres dépendent du groupe, du sous-groupe d'emploi et des éléments d'alliages dominants.

2.2.1. Aciers à outils de la classe 1

Ce sont des aciers au carbone destinés pour le travail à froid. Cette classe d'aciers est utilisée pour l'outillage à main. Les aciers au carbone doivent assurer, après trempe et revenu à basse température, une dureté élevée de l'arête tranchante des outils (60 à 65)HRC, nettement supérieure à celle du métal usiné, ainsi qu'une bonne tenue à l'usure pour conserver l'état de l'arête tranchante.

La faible stabilité de l'austénite surfusionnée affaiblit la pénétration de trempe des aciers à outils au carbone. La pénétration de trempe totale lors du refroidissement à l'eau ne s'obtient que pour des dimensions inférieures à (10 à 12) mm des outils.

C'est pourquoi les nuances contenant entre 0,5 et 1,2 % de carbone, s'emploient généralement pour des outils de petites dimensions (limes, forets aléseurs, ...).

Dans le cas où les outils subissent en service des charges dynamiques, il est recommandé d'utiliser des aciers hypoeutectoïdes et eutectoïdes traités thermiquement, de manière à obtenir une structure de type troostite.

Pour les outils, (comme les fraises, tirets, scies, grattoirs, ...), on emploie des aciers hypereutectoïdes (1 à 1,3) % C traités et à structure composée de martensite et de carbures.

Les aciers au carbone présentent les avantages suivants :

- Prix modéré.
- Faible dureté et bon usinage à l'état recuit.
- Bonne aptitude à la transformation à l'état recuit.

Quelques nuances d'aciers à outils de la classe 1, avec des exemples d'applications, sont exposées dans le tableau ci-après.

Nuances AFNOR	Température moyenne (°C)			Dureté HRC	Applications
	Recuit	Trempe	Revenu		
XC 50	750 à 780	830 E	150 à 300	54	Outils de forage, fourches, râpeaux.
XC 60	750 à 780	825 E 850H	200 à 300	60 à 63 60 à 62	Petites matrices, outils de chocs, barres.
XC 70	750 à 780	800 E 850 H	150 à 250	61 à 63	Scie à bois, marteaux, fers de rabots.
XC 80	750 à 780	800 E 800 H	150 à 250	63 à 64 62	Matrices, cisailles, poinçons, estampes, scies circulaires.
XC 90	750 à 780	790 E 790 H	150 à 300	63 à 64 63	Burins, tourneurs, coutellerie, matrices, chirurgie.
XC 100	700 à 750	790	150 à 250	63 à 65	Ciseaux, burins, poinçons, touches à froid
XC 110	700 à 750	780 E	150 à 250	64 à 65	Matrices à chaud, Outils pour meules.
XC 120	700 à 750	180 E	150 à 250	65	Calibres, jauges, burins, outils à bois.
Recuit : recuit d'adoucissement, E : eau, H : huile					

2.2.2. Aciers à outils de la classe 2

Ce sont les aciers à outils pour travail à froid. Les aciers à outils alliés pour travail à froid, de même que les aciers à outils au carbone ne sont pas très résistants, et de ce fait, sont employés pour la coupe des matériaux relativement doux et à de faibles vitesses de coupe, la température en service ne dépasse pas 2350°C.

Les aciers à outils alliés au chrome, vanadium, molybdène, ... font preuve d'une grande stabilité de l'austénite surfusionnée et par suite d'une grande pénétration de trempe. Le traitement thermique comporte une trempe à l'huile et un revenu à 200°C afin de réduire les déformations et les gauchissements des outils. Les aciers à outils pour travail à froid sont de plusieurs sortes.

2.2.2.1. Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium

Les teneurs moyennes sont de l'ordre de 0,8 % C, 2,1 % Mn et de 0 à 0,25 % V. Les aciers de cette classe sont appelés aciers indéformables. Ils ont pour principale Caractéristique, une bonne indéformabilité au traitement thermique due à une température de trempe relativement basse. On les trempe, soit à l'huile, soit au bain de sels par trempe étagée. Ils forment une solution commode pour les outils de précision et de mesure, ne demandant pas une résistance particulière à l'usure (poinçons, matrices de découpage, calibre vérificateurs, instruments de mesure, ...).

2.2.2.2. Aciers au chrome

La composition moyenne comporte les additions suivantes : (1 à 2,1) % C, (0,2 à 1,3) % Cr, (0 à 0,25) % V. Les aciers à faible teneur en chrome présentent une faible trempabilité et sont employés pour de petits outils à fabriquer en grande série (mèches, tarauds, ...), et pour des pièces demandant une bonne tenue au choc ou à la flexion (extracteurs, butées, ...).

Les nuances, à plus forte teneur en chrome (13 %) et contenant du vanadium, sont très indéformables et très résistantes à la flexion et sont destinées à la fabrication, par exemple, de filières, mandrins d'étirage, galets de formage, matrices d'extension à froid, molettes de coupes, fraises et outils à bois.

2.2.2.3. Aciers au chrome-molybdène

La composition moyenne de ces aciers comporte : (1 à 1,5) % C, (5 à 12) % Cr, (0,9 à 1,1) % Mo, (0,1 à 0,4) % V. Les aciers de ce type se déforment très peu à la trempe et sont employés pour les mêmes catégories d'outils que précédemment.

2.2.2.4. Aciers au chrome-tungstène

Ces aciers contiennent en général, les teneurs suivantes : (0,4 à 1,1) % C, 0,9 % Mn, (0,85 à 1,1) % Cr, (1 à 2) % W. Ces aciers sont d'un emploi très général, ils sont durs, tenaces et d'un assez grand pouvoir trempant. Leur application est très variée, outils coupants (forets, mèches, cisailles . .), alésoirs, tarauds, filières, poinçons, matrices, etc.

2.2.2.5. Aciers au nickel-chrome

Ces aciers contiennent 0,35 % C, 1,7 % Cr, 3,75 % Ni. C'est une nuance particulière, réservée pour les outillages d'estampage à froid, comportant des gravures de grande finesse et d'un prix élevé.

2.2.3. Aciers à outils de la classe 3

Ce sont des aciers à outils pour travail à chaud Dans cette catégorie d'aciers, on peut distinguer deux classes principales :

- Les aciers au Cr-W-Mo-V.
- Les aciers au Ni-Cr-Mo.

Quelques nuances d'aciers à outils pour travail à chaud sont mentionnées, à titre d'exemple, dans le tableau suivant :

N° d'ordre	% C	% Cr	% W	% Mo	% V	% Ni
1	0,6	0,9	1,85	0,2	0,15	-
2	0,4	5	1,3	1,4	0,4	-
3	0,3	2,5	9	0,3	0,4	-
4	0,55	0,85	-	0,45	-	1,75
5	0,4	1,5	-	0,5	-	4,3

La nuance au Cr-W, repérée sous le numéro 1 dans le tableau précédent, possède une grande résistance à l'état traité, une haute limite de fatigue notamment aux chocs répétés et une bonne stabilité au revenu jusqu'à 500°C. On l'emploie comme outillage travaillant aux chocs à des températures moyennes : poinçons de perçage, lames de cisailles à chaud, petites matrices diverses.

La deuxième nuance qui contient 5 % Cr, est un acier indéformable pour outillage travaillant à chaud. Il est réservé aux emplois demandant à la fois une haute résistance à la compression et une bonne tenue aux chocs thermiques entre 300 et 600°C.

La troisième nuance contenant une très forte teneur en tungstène (9 %), est caractérisée par une grande dureté et une bonne tenue à l'usure. Cet acier peut être utilisé jusqu'à la température de 650°C.

Les deux autres nuances au nickel-chrome-molybdène ont une excellente pénétration de trempe et sont employés pour les grosses matrices d'estampage à chaud.

2.2.4. Aciers à outils de la classe 4

Cette classe contient les aciers à coupe rapide. Les aciers à coupe rapide ou simplement les aciers rapides sont caractérisés par :

- Une bonne tenue à chaud.
- Une bonne dureté.
- Une résistance mécanique et une tenue à l'usure élevée.
- La propriété de garder la structure martensitique à chaud à 600°C.

L'utilisation des aciers de coupe par rapport aux aciers à outils ordinaires, permet d'augmenter sensiblement la vitesse de coupe de 2 à 4 fois et la tenue de l'outil de 10 à 30 fois.

L'élément d'alliage principal est le tungstène. Plus la teneur en tungstène est élevée, plus les qualités de coupe de ces aciers sont meilleures et ceci jusqu'à environ 23%. Au delà de cette teneur, le tungstène semble n'avoir aucun effet.

Les teneurs en chrome sont en général, de l'ordre de 4 à 4,5 %. Le molybdène peut remplacer le tungstène et la tenue à chaud de ces aciers s'améliore en présence de vanadium et de cobalt.

Les aciers rapides contiennent des carbures lédéburitiques. A l'état recuit, ils sont constitués de ferrite alliée et de carbures de type M_6C , $M_{23}C_6$, MC , M_3C dont le principal acier dans les aciers rapides est le M_6C , la ferrite comporte la plus grande partie dissoute de chrome.

La structure d'un acier moulé comporte un eutectique complexe qui ressemble à la lédéburite et qui se dépose aux joints de grains.

Pour assurer une bonne tenue à chaud, les outils rapides sont soumis à une trempe de 1200 à 1300°C pour avoir une meilleure dissolution des carbures secondaires, et obtenir au chauffage, de l'austénite hautement alliée au Cr, W, Mo, et V. Ceci assure, après trempe, une structure martensitique à haute stabilité, donc une bonne tenue à chaud. La trempe est suivie d'un revenu multiple à haute température.

Les nuances commerciales d'aciers rapides peuvent se classer comme suit.

2.2.4.1. Aciers rapides courants

Ces Aciers sont aussi appelés "aciers 18-4-1" et ils contiennent environ 18 % W, 4 % Cr, 1 % V. Ils sont employés pour les outils coupants à grande vitesse (forets, tarauds, alésoirs, ...), ainsi que pour le petit outillage demandant une grande résistance à l'usure à chaud et sans chocs thermiques (matrices spéciales, filières,...).

2.2.4.2. Aciers rapides au tungstène-molybdène

La teneur moyenne de ces aciers est de 6 % W, 6 % Mo, 4 % Cr et 2 % V. Le molybdène remplace, en partie, le tungstène. Une teneur donnée de molybdène peut remplacer une teneur, à peu près, double de tungstène.

2.2.4.3. Aciers extra-rapides

Ces aciers contiennent en moyenne 18 % W, 4 % Cr, 1 % Mo et 2 % V. Ils sont utilisés pour outils de finition devant présenter des arêtes aiguës et une grande constante de profil (peignes à fileter les tubes, fraises, broches, alésoirs, ...).

2.2.4.4. Aciers rapides spéciaux au cobalt

Ce sont des aciers rapides qui contiennent, en plus de la teneur moyenne, environ entre 2 et 15 % Co. Ils sont destinés à être utilisés dans des conditions de travail très sévères.

- Usinage de métaux durs (aciers traités, fontes trempes).
- Vitesses de coupes très élevées (tours automatiques, tours à barres).
- Section du copeau forte (dégrossissage, rabotage).

2.2.4.5. Aciers rapides à haute teneur en vanadium

La teneur en vanadium atteint 5 %. Le carbure de vanadium est à l'origine de la supériorité de ces aciers, en ce qui concerne, la tenue à la coupe.

2.2.4.6. Aciers au molybdène-cobalt

Ce sont des aciers à coupe rapide; de dureté exceptionnelle (59 à 70) HRC, permettant d'usiner les alliages à haute résistance massique et les alliages réfractaires.

Dans les tableaux suivants, nous avons rapporté quelques nuances d'aciers rapides :

- Aciers rapides au tungstène.
- Aciers rapides au molybdène.

a. Aciers rapides au tungstène :

Analyse		HB état recuit	Rm (dan/mm ²)	Applications	Matériaux
Elément	%				
C	0,8	235	80	Tarauds, fraises à fileter, mèches hélicoïdales.	Aciers avec Rm<90 daN/mm ²
W	18,5	-	-		
V	1,0	277	95		
C	0,8	235	80	Outils soumis à de gros efforts, grandes vitesses de coupe, fortes passes	Aciers, fontes à résistance élevée, acier moulé, fonte malléable.
W	18,5	-	-		
Mo	0,8	277	95		
V	1,7				
Co	5,0				
C	0,75	277	95	Outils pour conditions de travail sévères, dégrossissage.	Moulage des aciers, aciers inoxydables au Cr-Ni.
W	18,5	-	-		
Mo	0,8	321	110		
V	1,7				
Co	10,0				

a. Aciers rapides au molybdène :

Analyse		HB état recuit	Rm (dan/mm ²)	Applications	Matériaux
Elément	%				
C	1,2	235	90	Outils soumis à des contraintes élevées, dégrossissage et finition sur tours.	Aciers austénitiques et alliages de grande résistance.
W	9,5	-	-		
Mo	4,0	277	95		
V	3,5				
Co	10,5				
C	0,8	235	90	Scies à métaux, scies circulaires, mèches hélicoïdales.	Aciers de résistance Rm < 90 daN/mm ²
W	6,7	-	-		
Mo	5,2	277	95		
V	2,0				
C	0,8	235	90	Outils extra-tenaces : tarauds, mèches.	Aciers de résistance Rm < 90 daN/mm ²
W	2,0	-	-		
Mo	9,2	277	95		
V	1,3				
C	1,2	240	90	Fraises, alésoirs, roulettes à découper, à racler	Aciers, fontes, bronzes, laitons, alliages d'aluminium.
W	6,5	-	-		
Mo	5,2	300	95		
V	3,5				

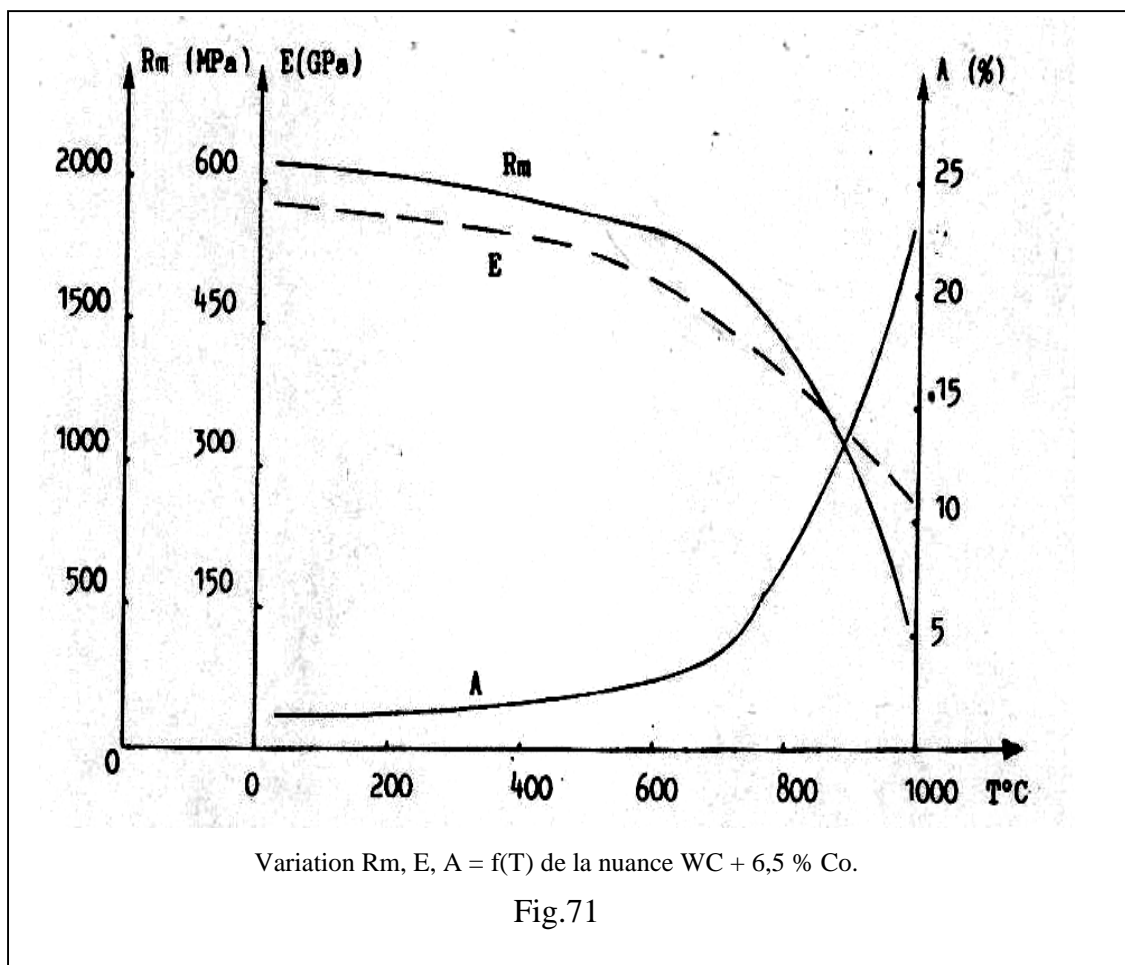
2.2.5. Carbures métalliques à outils

On appelle carbures métalliques, les alliages constitués de tungstène et de titane, alliés au cobalt. Les carbures de tungstène WC et de titane TiC, très durs et fragiles sont agglomérés par une phase ductile de cobalt.

Les carbures métalliques contiennent en général (85 à 36) % WC, (6 à 60) % TiC et (3 à 25) % Co. La dureté et la tenue à l'usure des carbures métalliques restent importantes

jusqu'à 800°C. Ils permettent de travailler avec une arête tranchante échauffée jusqu'à des températures plus élevées que dans le cas des aciers à outils, (fig. 71), ce qui veut dire qu'ils peuvent être utilisés à des vitesses de coupe plus grandes.

Les alliages au titane-tungstène s'emploient essentiellement pour l'usage des aciers au carbone et alliés. Ils sont élaborés sous forme de plaquettes fixées aux supports, généralement en acier ordinaire, non pas par fusion, mais par frittage. A cet effet, les poudres TiC et WC, finement broyées (1 à 3) μm et mélangées à du cobalt pulvérisé dans des proportions bien définies, sont compactées puis elles sont frittées vers 1500°C.



2.3. Aciers et alliages spéciaux

Cette partie du chapitre est consacrée à quelques aciers et alliages ayant des propriétés physiques particulières et dont les caractéristiques mécaniques présentent un intérêt secondaire.

2.3.1. Aciers et alliages à aimants

On distingue trois groupes d'aciers et alliages : durs, doux et amagnétique.

2.3.1.1. Aciers et alliages magnétiques durs

L'énergie nécessaire pour inverser l'aimantation d'un matériau ferromagnétique est proportionnelle au produit de l'induction rémanente B_r et la force coercitive H_c . Dans les métaux ferromagnétiques, la grandeur B_r est définie par la saturation magnétique, par conséquent, pour accroître l'énergie magnétique, il faut augmenter H_c . Pour augmenter la force coercitive, il faut que la structure de l'alliage comporte des défauts de structure (lacunes, dislocations, blocs, ...), qui constituent une distorsion du réseau cristallin.

Pour la fabrication des aimants, on utilise les aciers à haut carbone, environ 1 % C, additionnés de chrome, de tungstène, de cobalt, ... Ces aciers se prêtent bien à l'usinage et au corroyage, mais possèdent une énergie magnétique relativement faible. Ainsi, on les utilise pour les aimants peu importants. Les alliages les plus importants dans l'industrie des aimants sont ceux à base des éléments de transition Fe, Co et Ni, additionnés également de Cu, Al, Co, Ti, Nb, pour augmenter la force coercitive. Ces alliages sont durs et fragiles, donc ils ne se déforment pas. Les aimants s'obtiennent selon la forme par moulage, suivi de rectification.

Pour obtenir des propriétés magnétiques élevées de ces alliages, on procède au chauffage vers 1200 à 1300°C, puis d'une trempe à une vitesse propre pour chaque type d'alliage, suivie d'un revenu vers 550 à 650°C.

2.3.1.2. Aciers magnétiques doux

Ces aciers sont employés dans le domaine de l'électrotechnique. Les aciers à faible teneur en carbone (0,05 à 0,005) %, et contenant du silicium (0,8 à 4,8) %, sont très employés pour les tôles magnétiques. ils doivent avoir :

- Une faible force coercitive H_c .
- Une haute perméabilité magnétique.
- Des pertes par hystérésis très faibles.

Pour avoir ces caractéristiques, le matériau ferromagnétique doit avoir une structure homogène (solution solide ou métal pur), et doit être purifié des impuretés et des inclusions telles que la cémentite, l'oxygène et le soufre. Le matériau doit être complètement recristallisé (vers 1200°C), afin d'éviter les effets de l'écroutissage (forte réduction du paramètre μ et accroissement de H_c).

Le silicium forme avec le fer une solution solide, ce qui permet d'augmenter la résistance électrique, et donc de diminuer les pertes de courants tourbillonnaires. De plus, le silicium augmente la perméabilité magnétique, abaisse quelque peu la force coercitive et les pertes par hystérésis. L'estampage à froid, la coupe, l'enroulement des noyaux à tôles dégradent les propriétés magnétiques des aciers, c'est pour cela, qu'il est recommandé d'appliquer un recuit entre 750 et 790°C. L'acier pour transformateur est livré sous forme de bandes et tôles laminées à froid, et ayant une texture magnétique orientée.

a. Permaloy :

Ce sont les alliages à permittivité initiale et à permittivité maximale élevées, permettant d'obtenir une induction magnétique importante et de faibles champs. Les permaloys sont à base de nickel (40 à 80) %, et contiennent souvent du molybdène et du chrome.

b. Ferrites :

Les ferrites sont des oxydes complexes de fer et de métaux bivalents de types $n\text{Mo.mFe}_2\text{O}_3$ (où M est un métal bivalent) obtenus par agglomération de poudres. Leurs caractéristiques sont essentiellement la résistivité élevée (10^3 à 10^7) Ωcm et la magnétisation de saturation relativement faible.

Les ferrites s'emploient dans le cas des hautes fréquences et des hyperfréquences lorsque l'utilisation des ferromagnétiques devient impossible par les grandes pertes en énergie électromagnétique. Elles servent en radio-électronique et en radiotechnique pour la fabrication des antennes à tiges magnétiques, des noyaux des amplificateurs, etc. Les ferrites en $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$ servent de mémoires d'ordinateurs.

2.3.2. Aciers et alliages pour éléments chauffants

La présence d'une solution solide dans un alliage favorise l'obtention d'une haute résistance électrique. Les aciers et alliages prévus comme éléments chauffants, doivent posséder une bonne tenue à l'oxydation à chaud et une résistance suffisante au chauffage pour pouvoir conserver en service leurs formes.

On emploie, le plus souvent, les aciers au chrome-aluminium à basse teneur en carbone de type ferritique (fechral et chromal). Plus la teneur en chrome et en aluminium est élevée, meilleures sont les caractéristiques des éléments de chauffage. Les aciers au Cr-Al sont peu plastiques, ainsi pour en faire des éléments, le métal doit être chauffé vers 200 à 350°C, suivant les dimensions des pièces.

Nous avons déjà noté que les alliages au nickel ont une haute résistance électrique par formation de solution solide. Parmi ces alliages, il y a essentiellement les alliages au nickel-chrome, appelés "nichromes". Pour réduire le prix des nichromes et conserver ou améliorer les caractéristiques de résistance, une partie du nickel est remplacée par du fer, ces alliages

s'appellent "ferronichromes" et sont utilisés à 950 ou 1000°C. Les nichromes sont employés aussi bien pour la fabrication des ustensiles de ménage, que des éléments de chauffage des fours électriques

2.3.3. Alliages aux propriétés dilatométriques

Ce sont des alliages à base de Fe-Ni, très employés dans la construction mécanique et surtout dans la construction des appareils . Le coefficient de dilatation "α" entre -100°C et +100°C, diminue brusquement lorsque la teneur en nickel augmente jusqu'à 36 % et il s'accroît par la suite, si la teneur continue à augmenter. Ce comportement est largement exploité en technique.

Ainsi les éléments des machines et des appareils devant conserver des dimensions constantes entre -100 et +100°C se font en alliages austénitiques (% C < 0,05 et 36 % Ni), appelés "elvar". Ces alliages, dont le coefficient de dilatation $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ est constant dans l'intervalle de température (-50 à +100)°C, sont utilisés comme étalons de longueur en métrologie, comme pièce dans certains appareils de mesures géodésiques.

2.3.4. Aciers et alliages aux propriétés élastiques particulières

Les éléments élastiques des appareils et de mécanismes, doivent être constitués par des matériaux ayant :

- De hautes propriétés élastiques.
- Une bonne plasticité.
- Un module élastique constant dans une large gamme de température.
- Une bonne résistance à la corrosion.
- Etc.

Les matériaux les plus utilisés sont les métaux non-ferreux (laitons, bronzes, ...) et les alliages austénitiques au Fe-Cr-Ni et au Co-Cr-Ni.

Pour la fabrication des éléments élastiques, très sensibles, concernant les appareils de précision, (membranes, soufflets, spiraux de montre, etc.), on utilise les alliages ‘‘elvar’’ au Ni-Cr-Ti à durcissement structural, et dont les propriétés mécaniques moyennes sont :

- Après trempe à 950°C à l’eau :
 - $R_m = 700 \text{ N/mm}^2$.
 - $A = 50 \%$.

- Après vieillissement à 700°C :
 - $R_m = 1250 \text{ N/mm}^2$.
 - $R_c = 800 \text{ N/mm}^2$.
 - $A = 20 \%$.

2.4. Classification des fontes

Les alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2,14 % s’appellent fontes. Outre ces deux éléments, elles contiennent essentiellement du Si, Mn, P, S, dans le cas des fontes non alliées et de plus du chrome, du molybdène, de l’aluminium, etc., dans le cas des fontes alliées.

Dans une fonte, le carbone peut se présenter sous deux formes :

- Cémentite : l’aspect de la cassure est clair d’où l’appellation de fonte blanche.
- Graphite : l’aspect de la cassure est gris d’où l’appellation de fonte grise.

Par rapport aux aciers, les fontes ont des propriétés mécaniques relativement médiocres et sont souvent utilisées en fonderie à cause :

- De leur température de solidification relativement basse.
- De leur intervalle de solidification réduit.
- De leur très faible retrait lors de la solidification.
- De leur difficulté d’usinage.

D’après la forme du graphite et les conditions de sa formation, les fontes sont classées de la façon suivante :

- Fonte blanche.
- Fonte grise.
- Fonte à graphite sphéroïdal.
- Fonte malléable.

Le tableau ci-dessous indique certaines nuances de ces fontes.

Variété	Nuance	R mini (daN/mm ²)	Re (daN/mm ²)	A (%)	Dureté (HB)
Fonte grise de moulage (A.32.101)	Ft 10	10	0,8 à 0,9 R	0,5 à 1	150 à 300
	Ft 15	15			
	Ft 20	20			
	Ft 25	25			
	Ft 30	30			
	Ft 35	35			
	Ft 40	40			
<p>Propriétés : matériau économique, se moulant bien, résistant à la compression, peu oxydable, s'usinant bien, de faible coefficient de frottement, mais cassant.</p> <p>Emplois : pièces moulées courantes, bâtis, carters, organes de transmission, cylindres, pistons, coulisseaux, vannes, etc.</p> <p>Ft 30 à 40 : fonte à haute résistance, s'usinant plus difficilement.</p>					
Fonte malléable (A .32.701, 702, 703)	MB 35-7	35	22	7	≥ 150
	MB 40-10	40	25	10	
	MN 32-8	32	21	8	
	MN 35-10	35	23	10	
	MN 38-18	38	25	18	
	MP 50-5	50	33	5	170 à 30
	MP 60-3	60	40	3	200 à 245
	MP 70-2	70	50	2	240 à 285

<p>Propriétés : bonne résistance mécanique, malléable, soudable (pour MB seulement), se moulant bien.</p> <p>Emplois : pièces de formes complexes, de forgeage impossible, exemples : quincaillerie, machines agricoles.</p>					
<p>Ît, E² Fonte à graphite sphéroïdal</p>	FGS 800-2	80	48	2	248 à 352
	FGS 700-2	70	42	2	229 à 302
	FGS 600-3	60	37	3	192 à 269
	FGS 500-7	50	32	7	170 à 241
	FGS 400-12	40	25	12	≤ 201
	FGS 370-17	37	23	17	≤ 179
<p>Propriétés : bonne résistance mécanique, se moulant bien, s'usinant facilement, malléable après recuit de stabilisation, trempe possible.</p> <p>Emplois : les mêmes emplois que la fonte grise, mais pièces plus résistantes et plus légères. Exemples : cylindres de laminoirs, vilebrequins, pompes, etc.</p>					

2.4.1. Fontes blanches

La majorité du carbone se trouve sous forme de cémentite, ce qui donne à la cassure une couleur claire spécifique, c'est pourquoi elle est dite blanche. Elle est caractérisée par des teneurs en carbone et au silicium relativement faibles et par une teneur élevée en manganèse. Elle est constituée de perlite et de cémentite :

- Fonte hypoeutectique : lédéburite + perlite + cémentite.
- Fonte hypereutectique : lédéburite + cémentite + cémentite primaire.

Ces fontes sont obtenues lorsque le refroidissement est assez rapide et la température de coulée est assez basse. La cémentite n'a pas de temps pour se décomposer et l'on obtient une fonte sans graphite. Ces types de fontes sont obtenues dans le haut fourneau et sont généralement utilisés pour l'élaboration de l'acier ou de la fonte grise.

La fonte blanche présente un retrait élevé, ce qui oblige à prévoir des formes simples des sections uniformes sous angles vifs. Les caractéristiques physiques et mécaniques moyennes des fontes blanches brutes et coulées sont les suivantes :

- Masse volumique : (7,5 à 7,8) g/cm³.
- Coefficient de dilatation à (0 à 300)°C : (9 à 11).10⁻⁶.
- Résistivité électrique : 80 μΩcm.
- Résistance à la corrosion : (200 à 400) N/mm².
- Résistance à la compression : (1500 à 1800) N/mm².
- Module d'élasticité : (168000 à 183000) N/mm².
- Résistance à la flexion : (350 - 750) N/mm².
- Dureté Brinell (350 à 500).
- Retrait de moulage (13 à 21) mm/m.

La fonte blanche est parfois appelée "fonte trempée" car elle présente un état trempé (hors d'équilibre) par rapport à la fonte grise (état stable). La fonte blanche est obtenue par un moulage en coquille métallique entraînant un refroidissement plus rapide. Ainsi, l'extérieur de la pièce est en fonte blanche (12 à 40) mm alors que le cœur est en fonte grise. Ces deux parties sont séparées par une zone mixte en fonte traitée.

Les principaux domaines d'emploi des fontes blanches sont les suivants :

- Galets de dressage, cylindres de broyage, boulets.
- Blindage des broyeurs, pièces de pompes, de ventilateurs.
- Cames, poussoirs, guides.
- Rouleaux pour le travail des métaux, du caoutchouc et des matières plastiques.

Pour obtenir des pièces en fontes blanche, légèrement plus dure qu'à l'état brut, on utilise des additions modérées de nickel, chrome ou de nickel-chrome. La dureté atteint jusqu'à 600 HB. Si l'emploi des fontes blanches, exige des caractéristiques de résistance à la

chaleur et aux corrosions sévères, on ajoute jusqu'à 35 % Cr, (supports des pièces du four de recuit, pièces de moteurs diesel, de chaudières, d'échangeurs).

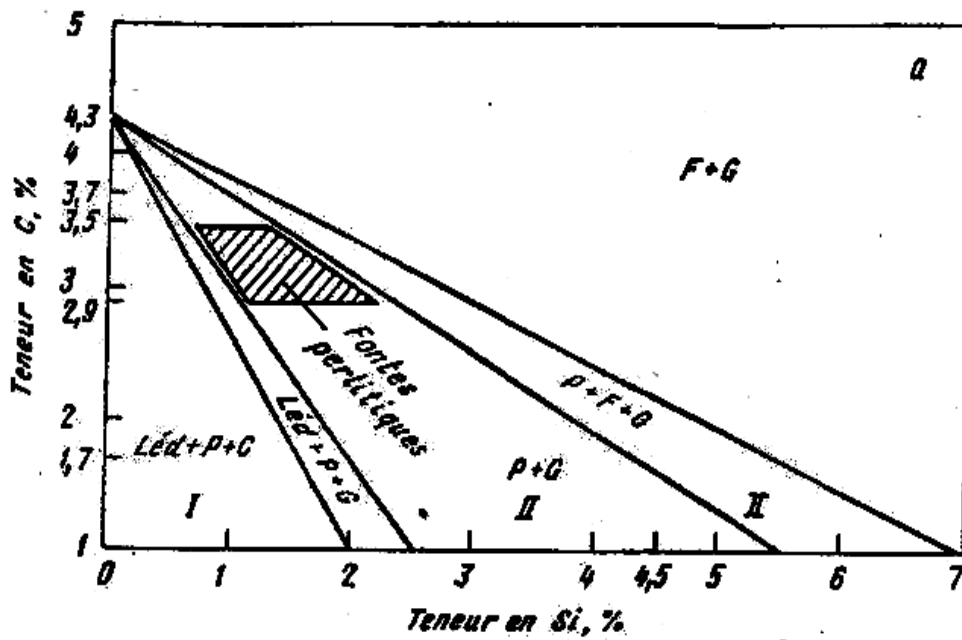
2.4.2. Fontes grises

La dénomination de fonte grise, fait allusion à l'aspect de la cassure grise. Dans ce type de fonte, la majeure quantité du carbone se trouve sous forme de graphite. Au fond, c'est un alliage Fe-C-Si, contenant comme impuretés inévitables du Mn, S et P.

Une coupe métallographique montre que le graphite se présente sous formes de lamelles, ce qui caractérise particulièrement ces fontes, et ce qui détermine leurs propriétés principales. Les plus utilisées sont les fontes hypoeutectiques, titrant de 2,4 à 3,8 % C, plus cette teneur est grande, plus il se forme du graphite et plus les propriétés mécaniques de la fonte sont faibles.

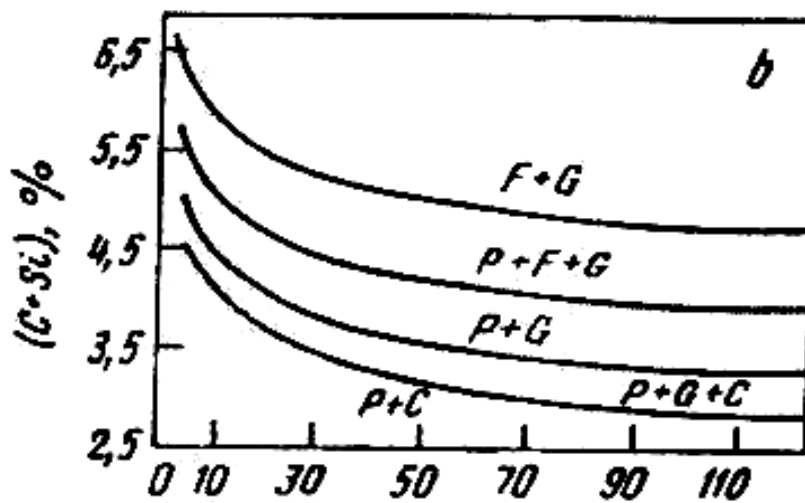
Le silicium dont la teneur dans les fontes grises varie le plus souvent de 1,2 à 3,5 % influe fortement sur leur structure et par suite sur leurs propriétés. L'introduction du silicium diminue la solubilité du carbone dans le fer; il en résulte que le domaine de l'austénite se rétrécit. Le silicium favorise la graphitisation et agit dans le même sens que le ralentissement du refroidissement. En modifiant d'une part la teneur en carbone et de l'autre, la vitesse de refroidissement, on peut obtenir des matrices métalliques à structure différente.

Le diagramme structural des fontes, traduisant la structure des pièces moulées aux parois de 50 mm d'épaisseur en fonction de la teneur en silicium et carbone est représenté sur la figure 72 b, ci-dessous. La teneur en carbone étant donnée, plus le titre de silicium est élevé, plus le processus de graphitisation est complet. Plus la teneur en carbone est grande, il faut moins de silicium pour obtenir une structure donnée, (fig.72 a).



a. Influence de C et Si sur la structure de la fonte
Fontes blanches (I), fontes grises (II) et domaine (F + G)

Fig. 72 a



b. Influence de la vitesse de refroidissement (de l'épaisseur de la pièce coulée)
et de la somme C + Si sur la structure de la fonte.
Fontes blanches (I), fontes grises (II) et domaine (F + G)

Fig. 72 b

La quantité de carbone liée par la cémentite détermine l'existence des types suivants de fontes et bien sûr selon la teneur en silicium. La structure de ces fontes est donnée par la figure 141.

a. Fonte demi-truitée :

La fonte demi-truitée est celle dont la plus grande partie du carbone ($> 0,8 \%$), se trouve sous forme de Fe_3C , et dont la structure est composée de : lédéburite + perlite + graphite lamellaire.

b. Fonte grise perlitique :

Les $0,7$ à $0,8 \%$ C de cette fonte se trouvent sous forme de cémentite qui fait partie de la perlite et dont la structure se compose de : perlite + graphite lamellaire.

c. Fonte grise ferrito-perlitique :

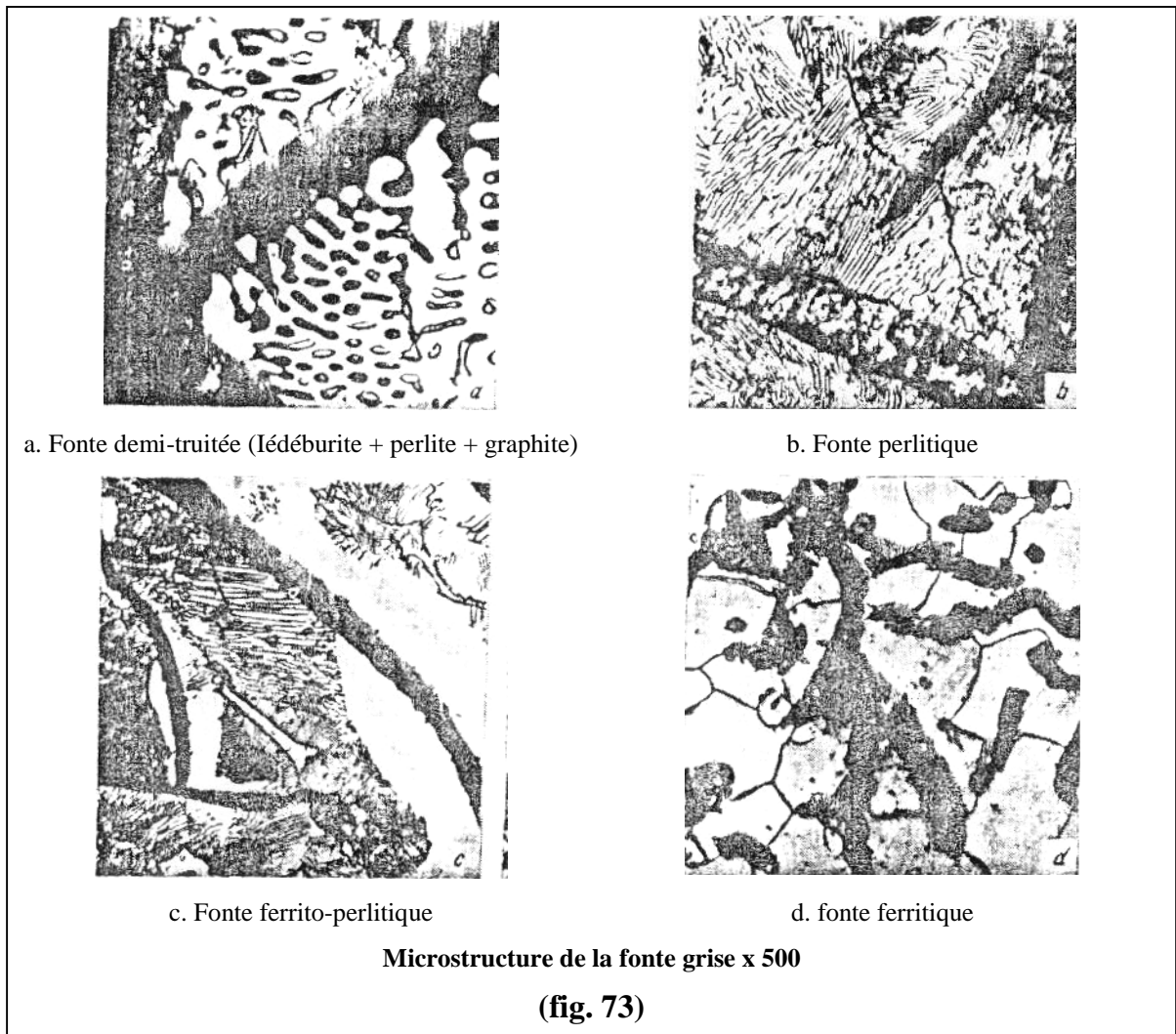
La décomposition de la cémentite eutectoïde détermine pour cette fonte la teneur en carbone lié, qui varie de $0,1$ à $0,7 \%$. La structure étant : perlite + ferrite+ graphite lamellaire

d. Fonte grise ferritique :

Dans ce cas, tout le carbone se trouve sous forme de graphite et la structure est composée de : ferrite + graphite lamellaire.

La figure 73, ci-dessous, présente des structures de fontes :

- Fontes demi-truitées.
- Fontes perlitiques.
- Fontes ferro-perlitiques.
- Fontes ferritiques.



Il est évident que pour des teneurs données en carbone et en silicium, la graphitisation est d'autant plus complète que le refroidissement des fontes est plus faible.

La taille et la répartition de inclusions de graphite jouent un rôle important dans la résistance des fontes grises. Plus la taille et la quantité de ces inclusions sont faibles, plus la résistance est élevée. D'une manière générale, les lamelles de graphite diminuent la résistance à la rupture et tout particulièrement la plasticité de la fonte grise ($A < 0,5 \%$).

Les discontinuités produites par les lamelles de graphite dans le métal de base, rendent la fonte peu sensible aux concentrateurs de contraintes (entailles, défauts de surface, gorge, etc.). Le graphite a une action lubrifiante qui améliore la tenue à l'usure et les propriétés antifrictions de la fonte.

Il est commode de caractériser la vitesse de refroidissement d'après l'épaisseur des parois des pièces à mouler. Plus les parois de ces dernières sont minces, plus le refroidissement est rapide et plus la graphitisation est faible. Par conséquent, pour les pièces à mouler de petites sections, pour lesquelles le refroidissement est rapide, ou pour une fonte à faible teneur en carbone, le titre de silicium doit être augmenté. Par contre, lorsque les pièces à mouler sont épaisses, et par suite leur refroidissement plus lent, la graphitisation est plus complète et la teneur en silicium peut être plus faible.

Le manganèse entrave la graphitisation en rendant plus difficile le dégagement du graphite et accroît l'aptitude de la fonte à la trempe, c'est à dire la constitution surtout dans les couches superficielles de la structure d'une fonte blanche ou truitée.

Le soufre apporte aux éléments qui ralentissent sensiblement la graphitisation sa contribution et provoque le grossissement des lamelles de graphite. C'est une impureté nocive qui altère les propriétés mécaniques et la coulabilité de la fonte (teneur maxi 0,1 à 0,12 %).

Le phosphore n'influe pas sur la graphitisation, sa teneur dans les fontes grises ne doit pas dépasser 0,2 %, mais parfois on admet même 0,4 à 0,5 %. Le phosphore améliore la coulabilité de la fonte par l'intermédiaire de l'eutectique qui s'est formé.

2.4.3. Fontes à graphite sphéroïdal

Comme il a été déjà noté que le graphite lamellaire rend la fonte fragile. Ainsi, pour améliorer la résistance mécanique de la fonte grise, on ajoute des éléments d'addition tels que le Ni, Cr, Mn ou bien on cherche à améliorer l'effet du graphite sphérique. Dans ce cas, la fonte est appelée fonte à graphite sphéroïdal.

La fonte à graphite sphéroïdal s'obtient par addition de magnésium à la fonte liquide.

La composition chimique moyenne de cette fonte est comme suit :

- C : (3,2 à 3,6) %.
- Si : (1,8 à 3) %.
- Mn : (0,3 à 0,4) %.
- P \approx 0,05 %.

L'introduction de silicium, jusqu'à 3 % environ, augmente le pouvoir graphitisant de la fonte liquide et celle du magnésium, jusqu'à 0,07 % environ, joue un rôle d'inhibiteur, mais de courte durée, en retardant la formation initiale du graphite.

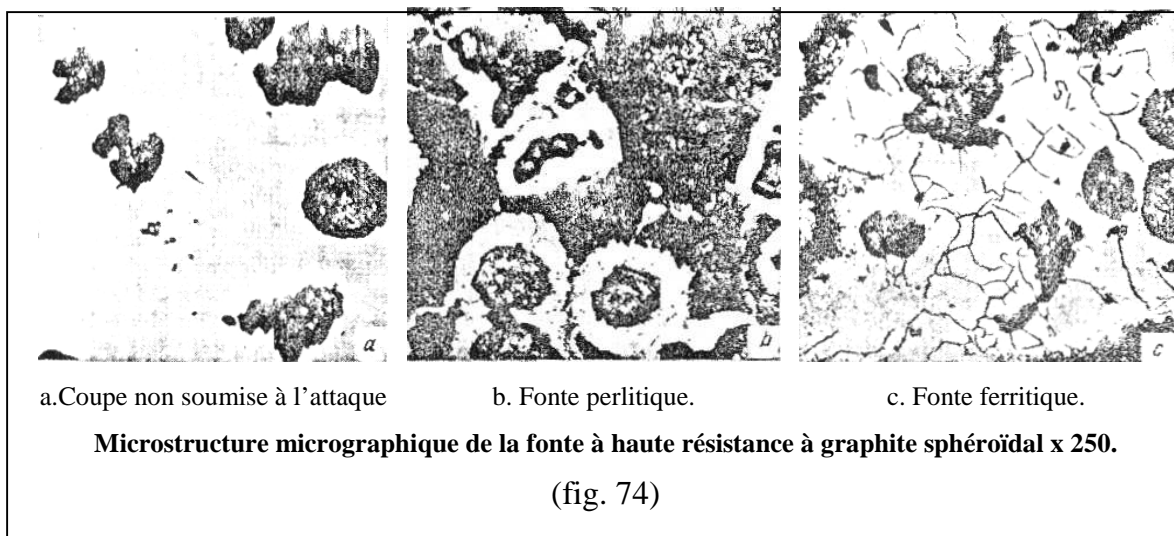
A l'état brute de la coulée, la fonte à graphite sphéroïdal présente une structure perlitique, ferritique ou à cémentite libre. Elle est caractérisée par une résistance mécanique et une ductilité bien plus grande que celles des fontes grises usuelles. La facilité d'usinage est excellente. C'est en somme, un matériau intermédiaire entre la fonte grise et l'acier moulé. Dans le tableau ci-dessous, nous avons porté à titre de comparaison, quelques caractéristiques mécaniques moyennes des fontes et celles de l'acier doux moulé.

Nuance	Dureté (HB)	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)
1. Fonte grise lamellaire	200	200	160	-
2. Fonte blanche non alliée	420	300	-	-
3. Fonte malléable ferritique	140	360	120	-
4. Fonte malléable perlitique	200	530	370	6
5. Fonte à graphite sphéroïdal	260	700	500	3
6. Acier doux moulé	135	450	270	18

La fonte à graphite sphéroïdal est très utilisée dans les diverses branches de l'industrie comme :

- Pièces de construction automobiles (vilebrequins, culasses, ...)
- Pièces pour l'industrie lourde (cylindres de laminoirs, pièces pour presses, ...).
- Pièces pour l'industrie chimique et pétrolière (conduite, pompes, valves, ...).

La figure 74 représente la structure micrographique de la fonte à haute résistance à graphite sphéroïdal.



2.4.4. Fontes malléables

La fonte malléable s'obtient par le maintien prolongé aux températures élevées (recuit) des pièces en fonte blanche. Le recuit produit une graphite nodulaire déchiquetée, qui, par rapport au graphite lamellaire, diminue beaucoup moins la résistance et la plasticité de la matrice métallique.

La matrice métallique d'une fonte malléable est constituée de ferrite (fonte malléable ferritique ou à cœur noir, figure 75) et plus rarement. de perlite (fonte malléable perlitique ou à cœur blanc, figure 76). La fonte malléable à cœur noir est largement employée dans l'industrie, car elle est la plus plastique.

La composition chimique d'une fonte blanche, prévue pour malléabilisation par recuit, peut varier dans les limites de tolérances suivantes : (2,5 à 3) % C, (0,7 à 1,5) % Si, (0,3 à 1) % Mn, 0,12 % S et $\leq 0,18$ P, en fonction de la structure imposée du métal de base.

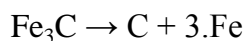
La teneur de la fonte en carbone et en silicium est réduite. Un plus faible titre de carbone améliore la plasticité du fait de la diminution de la quantité de graphite qui se dégage au recuit, alors que la teneur en silicium élimine la précipitation éventuelle au refroidissement du graphite lamellaire dans la structure des moulages.

L'épaisseur de la section des pièces coulées ne doit pas dépasser 40 à 50 mm. Lorsqu'elle est plus grande, l'âme de la pièce peut devenir le siège de formation du graphite lamellaire qui rend la fonte inapte au recuit.

Il existe deux procédés pour malléabiliser les fontes. Ces deux procédés s'appliquent à des pièces de formes définitives compliquées et qui seraient difficiles à obtenir en acier (par coulée ou par forgeage). La matière à traiter, est la fonte blanche et le produit obtenu est doux et tenace. Le premier procédé, étant de loin, le plus employé.

2.4.4.1. Malléabilisation par graphitisation (fonte malléable à cœur noir)

L'opération consiste à placer les pièces en fonte blanche dans des caisses, souvent remplies de sable et chauffées jusqu' environ 950°C, avec un maintien suffisant : c'est la graphitisation primaire qui correspond à la décomposition de la cémentite contenue dans le lédéburite (A + Cm), et l'établissement d'un équilibre stable (austénite + graphite).



Le produit de la décomposition est du graphite nodulaire déchiqueté. A partir de 950°C, on peut obtenir deux types de fontes malléables.

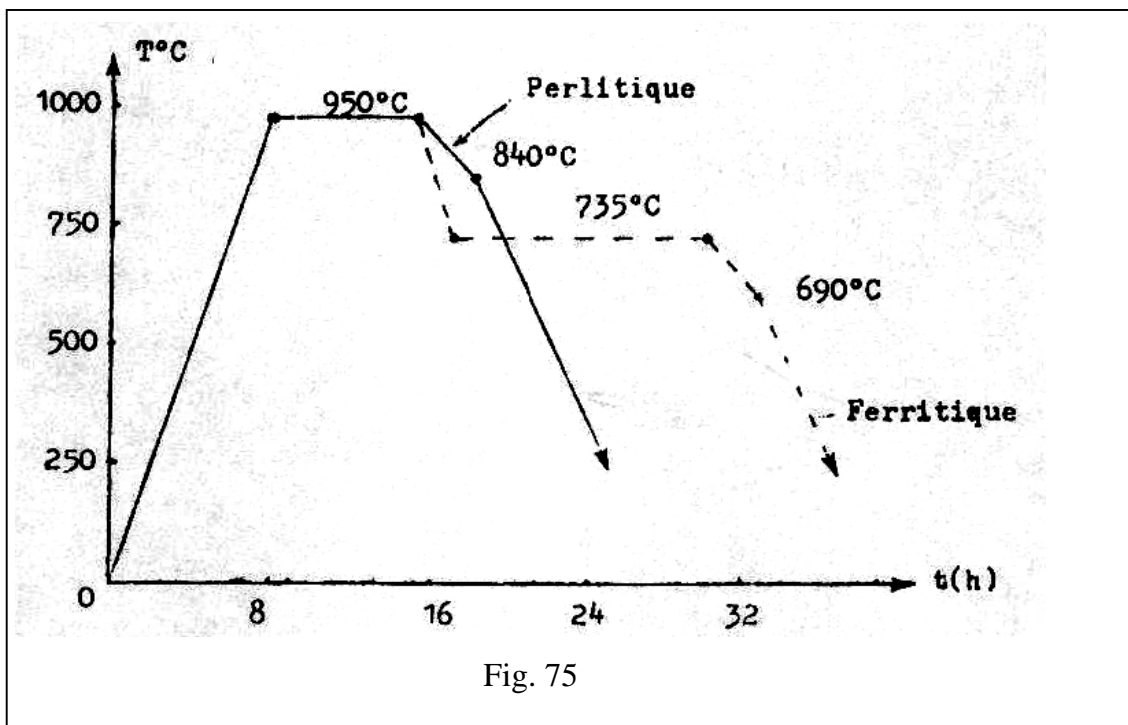


Fig. 75

a. Fonte malléable ferritique :

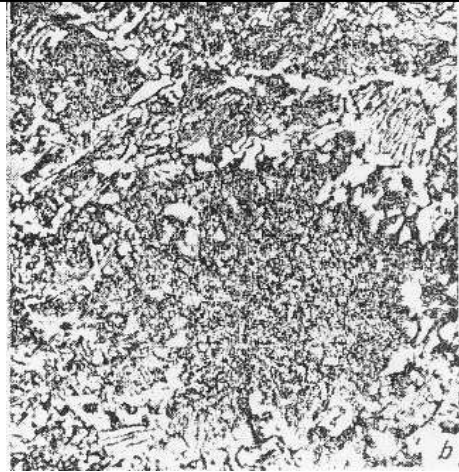
On refroidit les pièces jusqu'à environ 735°C pendant 12 heures pour avoir un graphite secondaire : l'austénite se décompose en ferrite et graphite. A partir de 690°C, les pièces peuvent être refroidies à l'air.

b. Fonte malléable perlitique :

La nature de la fonte est la même, mais le mode de refroidissement est différent. La décomposition de la cémentite est suivie d'un refroidissement à l'air à partir de 840°C, on obtient ainsi une matrice entièrement perlitique pour des pièces minces (perlite + graphite).



a. Fonte ferritique.



b. Fonte perlitique

Microstructure de la fonte malléable x 500

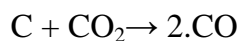
(fig. 76)

2.4.4.2. Malléabilisation par décarburation (fonte malléable à cœur blanc)

Si dans le cas précédent de la malléabilisation par graphitisation, on procède par un traitement thermique, dans ce cas de malléabilisation par décarburation, on procède par un traitement mixte thermo-chimique. Il consiste à chauffer la fonte à 960°C, durant (50 à 100) heures dans un milieu oxydant constitué de minerai de fer, de manière à éliminer le carbone de la fonte sous forme de gaz.

L'oxydation du carbone se déroule comme suit :

- L'oxygène ambiant de la caisse réagit avec le carbone de la surface des pièces en donnant les gaz CO et CO₂.
- L'oxyde de carbone réagit avec le minerai de fer en donnant du CO₂.
- Le gaz CO₂ formé, agit sur le carbone de la fonte suivant la réaction :



Ainsi, l'oxydation porte sur le carbone de l'austénite de la surface de la pièce et le carbone diffuse du centre vers la périphérie pour remplacer le carbone oxydé, et la cémentite entre en solution.

3. DESIGNATION NORMALISEE DES ACIERS ET DES FONTES

3.1. Désignation des aciers

Les aciers sont classés en deux groupes :

- Aciers non alliés (aciers ordinaires et aciers spéciaux, ...).
- Aciers alliés (faiblement et fortement alliés).

Le tableau ci-dessous donne un aperçu sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers alliés et non alliés.

% des éléments d'addition	Acier non allié	Acier faiblement allié	Acier fortement allié
Al	< 0,3		> 0,3
B			> 0
Co	< 0,2	0,2 à 0,3	> 0,3
Cr	< 0,3	0,3 à 0,5	> 0,5
Cu	< 0,4		> 0,4
Mn + Si	< 1,5	1,5 à 3	> 3
Mo	< 0,05	0,05 à 0,1	> 0,1
Ni	< 0,3	0,3 à 0,5	> 0,5
Pb	< 0,4		> 0,4
V	< 0,05	0,05 à 0,1	> 0,1
W	< 0,2	0,2 à 0,3	> 0,3

3.1.1. Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique

Les aciers ordinaires correspondent à des produits de grande consommation. Ils sont obtenus dans les convertisseurs, fours martin. Ce sont des aciers qui n'ont pas fait l'objet d'une addition volontaire d'éléments d'alliage et qui ne doivent pas dépasser les valeurs limites comme le montre le tableau ci-dessous.

Eléments	P+S	Si+Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Al	Ti	Cu	Pb
%	0,20	2	0,5	0,25	0,10	0,05	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,10

Deux solutions se présentent pour les désigner :

a. La lettre A : est utilisée pour les aciers de constructions mécaniques.

Cette nuance est indiquée par la lettre A suivie d'un nombre correspondant à la limite minimale de résistance à la rupture par traction R_m exprimée en daN/mm², éventuellement suivie des chiffres 1, 2, 3 ou 4 (indice de qualité des propriétés mécaniques).

Le chiffre 4 indique la plasticité la plus élevée. On utilise ces chiffres car deux aciers ayant la même charge de rupture peuvent avoir des plasticités différents.

Exemple : A 60 – 3

A : Acier ordinaire.

60 : Résistance minimale à la rupture à la traction 60 daN/mm².

3 : Indice de qualité.

Leur désignation peut être aussi des indices d'utilisation comme :

S : soudable

M : moulable

L'indice de qualité est défini selon l'expression suivante :

$$N = 2,5 A + R$$

N : nombre définissant l'indice de qualité.

A : allongement en %.

R : résistance en hbar.

Qualité	1	2	3	4
$N \geq$	96	108	114	118

Exemple de nuances normalisées : A33, A34 , A50, A52, A60, etc.

b. La lettre E : est utilisée pour désigner les aciers destinés à la construction métallique.

Cette nuance est désignée par la lettre E suivie d'un nombre correspondant à la limite d'élasticité minimale à la traction et éventuellement suivie d'un chiffre 1, 2 3 ou 4.

Exemple : E 24 – 2

E : Acier ordinaire.

24 : limite d'élasticité minimale de 24 daN/mm².

2 : Indice de qualité.

La catégorie de certains aciers retenus par la norme AFNOR sont :

E 24 – 1 E 26 – 2 E 36 – 2

E 24 – 2 E 26 – 3 E 36 – 3

E 24 – 3 E 30 – 3

Pour distinguer la pureté chimique en soufre et en phosphore des aciers, leur désignation peut être éventuellement suivie d'une lettre minuscule indiquant la pureté en P et S comme indiqué sur le tableau ci-dessous.

Symbole	a	b	c	d	e	f	g	h	k	m
P + S	0,140	0,120	0,100	0,090	0,070	0,065	0,060	0,055	0,045	0,035

3.1.2. Désignation des aciers pour traitements thermiques

Cette catégorie d'aciers est apte aux traitements thermiques la teneur en carbone et en impuretés est contrôlée, on distingue deux nuances :

a. Les aciers courants :

Ils sont désignés par les lettres CC suivis d'un nombre qui désigne la teneur moyenne du carbone en centième pour cent (100 fois la teneur en carbone).

Exemple : CC 35

CC : Acier ordinaire pour traitement thermique.

35 : contenant 0,35 % de carbone.

Exemple de nuances normalisées : CC 10, CC 20, CC 30, CC 35, CC 55, etc.

b. Les aciers fins :

Ces aciers sont employés lorsque les caractéristiques mécaniques exigées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitement thermique, leur élaboration s'effectue dans le four Martin.

Leur désignation commence par les lettres XC suivis d'un nombre indiquant la teneur en carbone en centième pour cent. Dans cette catégorie d'aciers, les écarts tolérés pour le carbone et les impuretés sont réduits, ces aciers présentent plus de garantie que les aciers courants vis à vis de la teneur en carbone et en impureté.

Exemple : XC 85

XC : Acier ordinaire pour traitement thermique.

85 : contenant 0,85 % de carbone.

Leur désignation peut être aussi suivie d'une lettre minuscule indiquant l'indice de pureté comme :

a : pureté minimale.

d : pureté moyenne.

m : pureté maximale.

Exemple de nuances normalisées : XC 10, XC 12, XC 18, XC 35, XC 38, etc.

Modes de traitement thermique pour les aciers au carbone :

- L'acier contenant moins de 0,30 % C est destiné à subir une cémentation est appelé acier trempé.
- Les aciers contenant 0,35 à 0,50 % C sont destinés à l'amélioration qui est la trempe suivie d'un revenu à haute température.
- Les aciers contenant 0,60 à 0,75 % C sont destinés à recevoir une trempe et un revenu à température moyenne.
- Les aciers contenant 0,8 à 1,3 % C sont dits aciers à outils et sont destinés à subir une trempe suivie d'un revenu à température basse.

3.1.3. Désignation des aciers alliés

Ces types d'aciers sont obtenus par l'addition volontaire d'éléments d'alliage. Ce sont des aciers contenant, outre le fer et le carbone un ou plusieurs éléments destinés à améliorer leurs propriétés mécaniques.

Ce sont des aciers de grande pureté. Leur élaboration s'effectue dans le four Martin, le four électrique ou le creuset.

Les principaux éléments d'alliages et leurs symboles normalisés sont présentés dans le tableau ci-dessous avec le coefficient de teneur de chaque élément.

Eléments	Symbole		Coefficient
	Chimique	Normalisé	
Aluminium	Al	A	x 10
Chrome	Cr	C	x 4
Cobalt	Co	K	x 4
Cuivre	Cu	U	x 10
Etain	Sn	E	x 10
Magnésium	Mg	G	x 10
Manganèse	Mn	M	x 4
Molybdène	Mo	D	x 10
Nickel	Ni	N	x 4
Phosphore	P	P	x 10
Plomb	Pb	Pb	x 10
Silicium	Si	S	x 4
Soufre	S	F	x 10
Titan	Ti	T	x 10
Tungstène	W	W	x 10
Vanadium	V	V	x 10
Zinc	Zn	Z	x 10
Antimoine	Sb	R	x 10
Cadmium	Cd	Cd	x 10

Les éléments d'addition sus-mentionnés agissent de deux façons principales sur l'acier.

a. Leur action sur la formation de l'austénite :

Les éléments alphagènes tels que Si, Cr, Al, W, Mo et V s'opposent à la formation de l'austénite pour une teneur suffisante, l'alliage demeure à l'état perlitique depuis la température ordinaire jusqu'à la température de fusion.

Les autres éléments gammagènes Ni, Mn et Co facilitent la formation de l'austénite au point de la rendre stable à la température ordinaire lorsqu'ils sont en proportion suffisante.

b. Leur action sur la formation de carbures complexes :

Ils facilitent la naissance des carbures complexes, généralement plus durs que le carbone de fer et qui demeurent noyés et non dissous dans le reste de l'alliage. Ces carbures influent sur les propriétés mécaniques de l'acier.

Selon les éléments d'addition et leurs quantités d'addition, on distingue deux types d'aciers :

- Aciers faiblement alliés.
- Aciers fortement alliés.

3.1.3.1. Désignation des aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dont la teneur en n'importe quel élément d'addition ne doit pas dépasser 5 %, ils sont désignés par :

- Un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone exprimé en centième pour cent (multiplié par 100).
- Suivi de symboles normalisés des éléments alliés dans l'ordre des teneurs décroissantes, c'est à dire, le premier élément indique toujours l'élément dont la teneur est la plus élevée.
- Les symboles sont suivis par des nombres indiquant la teneur moyenne des éléments d'additions multiplié par 4 pour les éléments C, K, M, N, S et par 10 pour tous les autres éléments.

Remarque :

La désignation des éléments mentionnés ci-dessous est négligée dans le cas où leur teneur est égale ou inférieure à celle mentionnées ci-dessous.

M, S	N	C	D, V
1 %	0,5 %	0,25 %	0,10 %

Exemples :

45 CD 20 – 4

C'est un acier faiblement allié contenant :

- 0,45 % de carbone.
- $20/4 = 5$ % de chrome (C).
- $4/10 = 0,4$ % de molybdène (D).

20 NC 6

C'est un acier faiblement allié contenant :

- 0,20 % de carbone.
- $6/4 = 1,5$ % de nickel (N).
- Le pourcentage de chrome (C) est inférieur à 1,5 %.

Exemples de nuances d'aciers faiblement alliés selon AFNOR :

18 CD 4, 10 NC 6, 16 NC 6, 14 NC 11
20 NCD 2. 45 S 7, 38 C 4, 100 C 6, 25 CD 4
35 CD 4, 42 CD 4, 20 NC 6, 30 NC 11 etc.

3.1.3.2. Désignation des aciers fortement alliés

Ce sont des aciers caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs éléments d'addition et au moins un de ces éléments a une teneur supérieure à 5 %. Dans cette catégorie, on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique etc.

Leur désignation normalisée est toujours précédée par le lettre Z suivie :

- D'un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone au centième pour cent.
- Des symboles normalisés des éléments d'addition rangés dans l'ordre de teneur décroissante.
- Des chiffres indiquant la teneur moyenne en pour cent des éléments d'addition.

Dans le cas des aciers fortement alliés, les chiffres indiquent directement la teneur en % des éléments d'addition, donc il n'est pas nécessaire de diviser par les coefficients 4 ou 10 comme dans le cas des aciers faiblement alliés.

Exemples :

Z 160 CDV 12

Z : symbole de l'acier fortement allié contenant :

- 1,60 % de carbone.
- 12 % de chrome

Z 6 CN 18 – 09

C'est l'acier inoxydable courant contenant :

- 0,06 % de carbone
- 18 % de chrome.
- 9 % de nickel.

Exemple de nuances d'aciers fortement alliés :

Z 115 WC 05, Z 200 C 13, Z. 200 CKDV 1-4,
Z 150 CKD 14, Z 85 WDCV 06-05-04-02,
Z 130 WCV 12-04-04, Z 110 DKCWV 00-08-04-02.

3.2. Désignation normalisée des fontes

La fonte est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Eventuellement une fonte contient d'autres éléments introduits volontairement ou non. Les fontes se divisent en deux groupes selon leur mode d'élaboration, suivant l'état d'existence du carbone sous forme de cémentite ou de graphite.

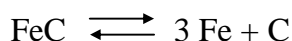
a. Fontes blanches :

La totalité du carbone se trouve sous forme de cémentite Fe_3C . Ces fontes sont obtenues lorsque le refroidissement est assez rapide et la température de coulée est assez basse. La cémentite n'a pas de temps pour se décomposer et l'on obtient une fonte sans graphite. Cette fonte est dite blanche car la cassure présente un aspect métallique blanc. Il y a absence du carbone libre.

La teneur en Si, C, P est relativement faible, tandis que la teneur en Mn est élevée. Ces types de fontes sont obtenues dans le haut-fourneau et sont généralement utilisées pour l'élaboration de l'acier ou de la fonte grise.

b. Fontes grises :

La totalité du carbone est libre et se trouve sous forme de graphite. Elles sont obtenues lors du refroidissement lent avec une température de coulée assez élevée, alors la cémentite peut se décomposer en donnant du carbone libre sous forme de graphite.



L'aspect de la cassure a une couleur grise, ce qui prouve la présence du carbone libre. L'élément indispensable pour obtenir une fonte grise est le silicium jusqu'à une teneur de 3 %, ensuite viennent le cuivre et le nickel dont le premier possède un pouvoir antiferritisant énergétique au cours du refroidissement mais facilitant la formation de carbure libre (point dur) et la ferrite libre (point doux) et le second (nickel) possède un pouvoir graphitisant plus meilleur que celui du cuivre, mais un pouvoir antiferritisant négligeable.

Généralement les fontes grises sont obtenues dans des fours appelés cubilots. Pour leur désignation normalisée, les fontes sont classées en deux catégories :

- Fontes non alliées.
- Fontes alliées

3.2.1. Désignation des fontes non alliées

a. Fontes grise à graphite lamellaire :

Pour leur désignation on utilise le symbole normalisé Ft suivi de la valeur en daN/mm² de la résistance minimale à la rupture de traction. Elles possèdent une excellente coulabilité et usinabilité mais présentent des propriétés mécaniques assez défavorables (fragiles et non malléables).

Exemple : Ft 25

Ft : symbole normalisé de fonte grise à graphite lamellaire.

25 : Rm (résistance minimale à la rupture de traction) = 250 MPA.

Exemple de nuances des fontes grises à graphite lamellaire :

Ft 10, Ft 15, Ft 20, Ft 25, Ft 30, Ft 35, Ft 40 etc.

b. Fontes à graphite sphéroïdal :

Les fontes à graphite sphéroïdal possèdent de bonnes propriétés mécaniques par rapport aux fontes Ft. Plus la sphéricité des particules est élevée, plus les propriétés sont bonnes.

La modification de la structure du graphite (passage du graphite lamellaire au graphite sphéroïdal) est obtenue par addition d'éléments d'alliages dans le métal liquide lors de sa coulée. Le premier élément ayant été utilisé est le cérium, mais aujourd'hui on utilise, le plus souvent, le magnésium sous forme d'alliages nickel-magnésium ou ferrosilicium-magnésium. Le procédé d'obtention des fontes à graphite sphéroïdal consiste à un traitement, au préalable, de la fonte tels que :

- La désulfuration.
- La démanganisation, si nécessaire, car la teneur en manganèse doit être fixée à l'avance si on veut obtenir des structures ferritiques ou perlitiques. Pour les structures critiques (Mn = 0,10 à 0,30 %), pour les structures perlitiques (Mn jusqu'à 0,90 %).

L'introduction du magnésium s'effectue lors de la coulée et à une température de 1350 à 1500°C et selon différentes méthodes.

a. Méthode sandwich :

Avant la coulée, le magnésium est introduit dans la poche sous forme d'alliage recouvert de rébus de tôles d'acier. La fonte à modifier est coulée directement sur ce sandwich.

b. Méthode plongeur :

Une cloche en réfractaire percée de trous et contenant le magnésium est entraînée mécaniquement vers le fond de la poche remplie de fonte liquide.

Les fontes à graphite sphéroïdal sont désignées par le symbole FGS suivi de la valeur en N/mm² de la résistance minimale à la rupture de traction et de la valeur de l'allongement après rupture en %.

Exemple : FGS 400 – 012

FGS : fonte à graphite sphéroïdal

400 : Résistance minimale à la rupture de traction = 400 N/mm².

012 : Allongement (A= 12%).

Exemple de nuances : FGS 370-17, FGS 500-17, FGS 600-3, FGS 700-2, etc.

3.2.2. Désignation des fontes alliées

Les fontes alliées sont obtenues par addition d'éléments d'alliages lors de la fusion. Ces éléments sont le Ni, CR, Mo, Ti, Va, Si, etc. Elles possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles des fontes déjà considérées. Elles sont à graphite lamellaire ou sphéroïdal et ferritiques ou austénitiques. Elles sont désignées par :

- La lettre L ou S : lamellaire ou sphéroïdal.
- Symboles normalisés des éléments d'addition rangés par teneur décroissante.
- Teneur moyenne en % des éléments d'addition rangés dans le même ordre que ces éléments sans facteur multiplicateur.

Exemple : L - NSC 30 – 5 – 5 : Fonte austénitique à graphite lamellaire ayant des teneurs moyennes en Ni (30%) en Si (5%) et en Cr (5%).

3.2.3. Désignation des fontes malléables

La fonte malléable est une fonte initialement blanche, qui à subit ultérieurement un recuit en atmosphère oxydante ou neutre. Il existe plusieurs procédés pour obtenir les différents types de fontes malléables.

a. Le procédé européen :

Pour obtenir la fonte malléable à cœur blanc (fonte malléable européenne) on élimine, en majeure partie, le carbone. Dans ce procédé les pièces moulées en fonte blanche sont

emballées dans de l'oxyde de fer et portées vers 980 à 1050°C durant 80 à 100 heures. Les pièces, après ce long recuit, sont refroidies à la vitesse de 5 à 10 °C par heure et déchargées du four à 650°C pour ensuite les refroidir à l'air, alors on obtient une matrice complètement ferritique avec éventuellement quelques nodules de graphite au cœur de la pièce moulée.

b. Le procédé américain :

Il est destiné à obtenir des fontes malléables à cœur noir perlitiques (fontes malléables américaines). Dans ce procédé, les pièces coulées en fonte blanche subissant un recuit en atmosphère neutre à une température de 870 à 950°C durant 8 à 60 heures. Après ce recuit, elles sont refroidies aussi vite que possible jusqu'à la température de 760°C, ensuite elles sont refroidies à une vitesse de 3 à 10°C par heure afin d'obtenir une ferritisation complète. La descente lente de la température est souvent remplacée par un maintien à 720°C, ensuite les pièces peuvent refroidir à l'air. On obtient finalement une matrice ferritique ou tout le carbone se présente sous forme de nodules de graphite déchiquetés (fonte malléable à cœur noir). On peut supprimer la ferritisation eutectoïde en parcourant rapidement le domaine ($\alpha+\gamma+g$) pour que l'austénite se transforme en perlite, ce qui donne une fonte malléable perlitique.

Pour leur désignation, on utilise :

- La lettre M : fonte malléable.
- Les lettres B, N ou P : à cœur Blanc, Noir ou Perlitique.
- La résistance minimale de rupture à la traction R_m en daN/mm².
- L'allongement après rupture en %.

Exemples :

MB 35 – 10 : fonte malléable à cœur blanc.

MN 38 – 18 : fonte malléable à cœur noir.

MP 55 – 5 : fonte malléable perlitique.

BIBLIOGRAPHIE

1. Einführung in die werkstoffwissenschaft, Prof. Dr. W.Schatt, édition Veb Deutscher Verlag Leipzig, 1973.
2. Werkstoffkunde stahl und eisen I, Eckstein, édition Veb, Deutscher Verlag Leipzig, 1971.
3. Matériaux, J.Lignon et M.Mijon, édition librairie Delagrave, 1967.
4. Werkstoffkunde stahl und eisen II, Eckstein, édition Veb, Deutscher Verlag Leipzig, 1972.
5. Matériaux, tome 1 et 2, N.Bouaoudja, édition OPU, 1992.
6. Métallographie, Schuman, édition Veb Deutscher Verlag Leipzig, 1975.
7. Métallurgie, élaboration des métaux, C.Chaussin et G.Hilly, édition Dunod Paris, 1972.
8. Métallographie et traitements thermiques des métaux, I.Lakhtine, édition Mir Moscou, 1978.
9. Modellbau fier giesserei, édition Veb Fachbuchverlag Liepzig, 1972.
10. Giessereitechnik, R.Helmut, édition Fur Hochschulwesen Karlmarx Sstadt, 1976.
11. Technologie professionnelle générale, A.Castel et A.Dupont, édition Desfarges Paris, 1980.
12. Korrosion und korrosionschutz, Collectif d'auteurs, édition Veb Deutcher Verlag Leipzig, 1973.
13. Matériaux et Corrosion, édition Masson Paris, 1989.
14. Corrosion et chimie de surface des métaux, Diter Landolt, édition presses polytechniques et universitaires romandes.
15. Corrosion et protection, H.Uhlig, édition Dunod Paris, 1970.