

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

27/87

1 ex

وزارة التعليم و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

الدراس والبحوث التطبيقية
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : **GENIE MECANIQUE**

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

INFLUENCE DU TRAITEMENT
THERMIQUE SUR LES PROPRIETES
MECANIQUES ET LA STRUCTURE
DES ACIERS

Proposé Par :

Pavlov

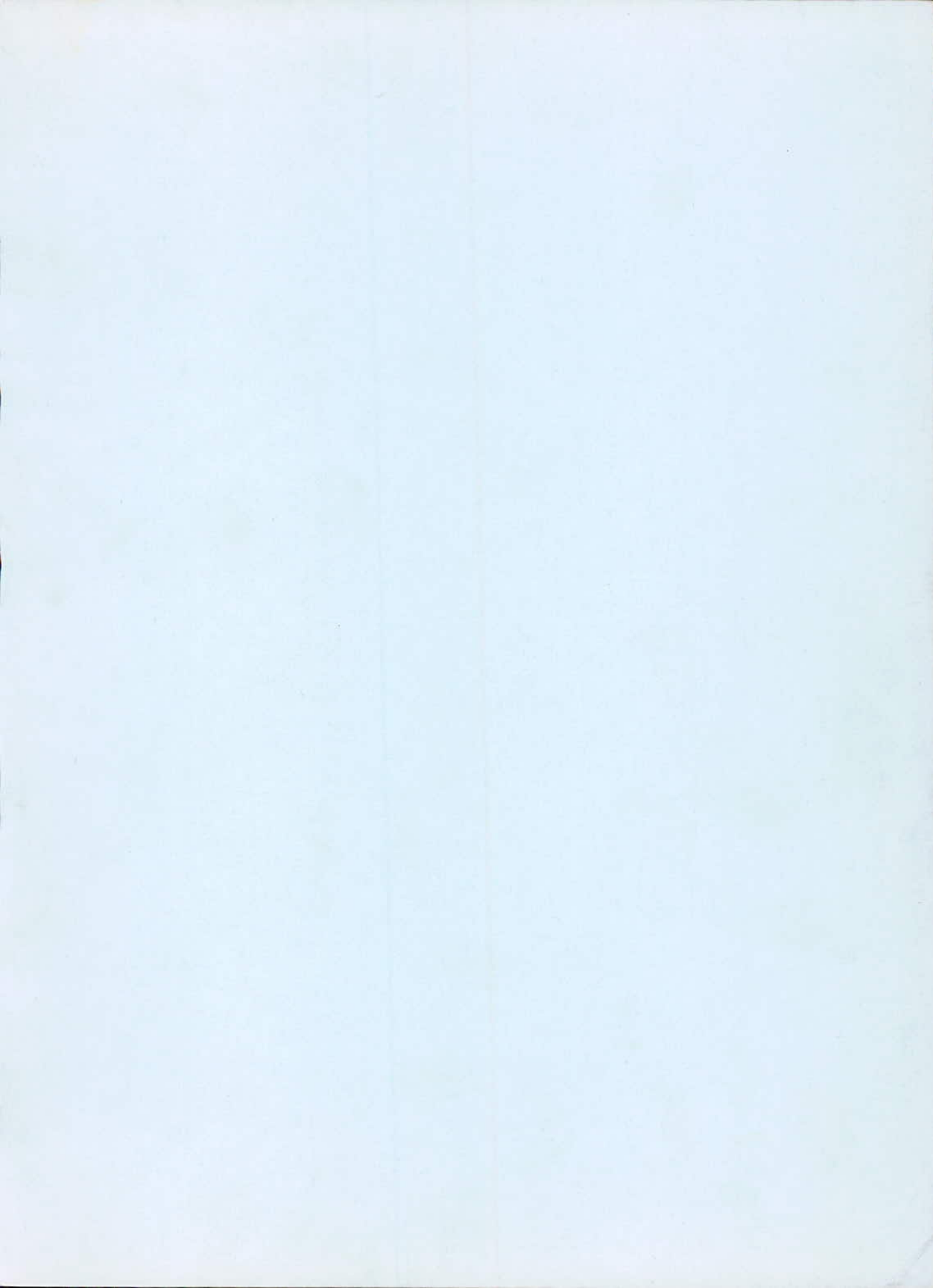
Etudié par :

**Bouyoucef
Abdelhafid**

Dirigé par :

Pavlov

PROMOTION : **Janvier 87**



REMERCIEMENTS.

Je ne saurais présenter ce travail sans exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui y ont contribué.

Mes remerciements vont particulièrement à Messieurs:

- M^r PAVLOV, mon promoteur et professeur à L'ENP
- M^r AÏT MESSAOUD HAMID.

et à tout les professeurs qui ont contribué à ma formation, et à tous les professeurs du département de Genie - mécanique.

Mes remerciements vont également à tout le personnel du laboratoire de métallurgie du CVI

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR.

وزارة التعليم العالي

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات

Département: Génie Mécanique.

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

فرع: الميكانيك

Promoteur: M^r PAVLOV.

الموجه: بافلوف

Élève Ingénieur: M^r Bouyoucef Abdelhafid

تلميذ مهندس: بوبوسف عبد الحفيظ

الموضوع: دراسة تأثيرات المعالجة الحرارية على الخصائص الميكانيكية وبنية الفولاذ

الملخص: إن بنية الفولاذ تحدد سلوك القطع الميكانيكية عند التشغيل، إن مشروعنا هذا يتناول دراسة العلاقة بين وسائط، عملية المعالجة الحرارية وخصائص الفولاذ XC48، بالإضافة إلى فحص آلة تجريب الكلال.

Sujet: Etude de l'influence du traitement thermique sur les propriétés mécanique, et la structure des aciers.

resumé: la structure de l'acier détermine les propriétés et fiabilités du travail des pièces de constructions. Ce projet étudie la relation entre le régime du traitement thermique et les propriétés, d'acier XC48; Avec l'examen de la machine de fatigue.

Subject: Influence study of thermal treatment upon mechanical characteristics and steel structure.

Abstract: steel structure determines work characteristics and work efficiency of steel parts Construction, this project studies the relation between the process of the thermal treatment and the steel characteristics XC48 with the investigation of the steel strength Test machine.

TABLE DES MATIERES.

Introduction:	1
Chapitre I: Transformations des phases dans l'acier.	
I. Etude des phases de transformation des aciers au carbone.	3
I.1. Transformations isothermiques	7
I.2. Transformations polymorphes	10
I.3. Transformations à solubilité variable	10
II. Transformation perlitique	11
III. Transformation martensitique	13
IV. Transformation bainitique	16
Chapitre II: Influence du regime de la trempe sur les Propriétés mecaniques et la structure des aciers.	
I. Etude de la température et la durée de chauffage	19
II. Changement de la structure pendant le chauffage de 20 à 850°	20
III. Influence de la vitesse de refroidissement	21
IV. Agents de refroidissement pour la trempe	23
V. Penetration de la trempe	24
VI. Contraintes internes d'un acier trempé	24
VII. Procédés de trempe	26
Chapitre III: Influence du regime du revenu sur les propriétés mecaniques et la structure des aciers.	
Generalité sur le revenu	28
I. Revenu à basse température	29
I.1. Changement de la structure	29
I.2. Changement des Propriétés mecaniques	30
II. Revenu à température intermediaire	30

II-1. Changement de la structure	30
II-2. Changement des propriétés mécaniques	32
III. Revenu à haute température	32
III-1. Changement de la structure	32
III-2. Changement des propriétés mécaniques	32
IV. Influence de la vitesse refroidissement	32

Chapitre IV: Methode d'experience.

I. Mesure de la durete	34
II. Mesure de la resilience	34
III. Essai de traction	35
IV. Micrographie	38
V. trempe	39
VI. Revenu	39

Chapitre V: Resistance à la fatigue.

I. Generalité	40
II. Essai de fatigue	41
III. Machine à flexion rotative	41
IV. Calcul de roulement	43

Chapitre VI: Resultats experimentaux.

I. Resultats des essais de durete:	46
I-1. Durete en fonction de la temperature de chauffage de trempe	46
I-2. Durete en fonction de la vitesse de refroidissement	47
I-3. Durete en fonction de la temperature de revenu	49
II. Resultats des essais de resilience	51
III. Resultats des essais de traction	52
IV. Resultats de la micrographie	54
Conclusion	57

INTRODUCTION.

Le traitement thermique est la technique de la transformation de la structure et les propriétés mécaniques des métaux, Ainsi dans son ouvrage publié en 1868 D. Tchernov a montré que pendant le chauffage, et le refroidissement jusqu'à des températures définies appelés par la suite points critiques, l'acier à l'état solide est le siège des transformations de phases, qui modifient sensiblement ses propriétés.

L'acier que nous proposons d'étudier est un acier à 0,48% de carbone (XC48), vu son utilisation accrue pour les pièces de constructions telles que : vilebrequin, arbres à cames, bielles, pignons, tiges, disques de friction, tringles, traverses, moyeux, essieux, l'acier XC48 est utilisée pour ces pièces de constructions après avoir subi certain traitement thermique telle que : normalisation ; amélioration ; et trempe superficielle.

On étudiera en premier lieu l'influence de la température de chauffage, et la vitesse de refroidissement, lors de la trempe et du revenu sur la dureté et la structure de cet acier, ceci pour déterminer la température de chauffage, et la vitesse de refroidissement qui correspondent à la dureté la plus élevée lors de la trempe, Pour avoir une résistance à l'usure après revenu plus ou moins appréciable, après cela on déterminera les caractéristiques mécaniques, résistance à la rupture, la limite d'élasticité, dureté, l'allongement, de cet acier

ayant subi le traitement thermique appelé amélioration, l'amélioration est le traitement thermique constitué de trempe et de revenu à haute température, il est appliqué aux aciers de constructions au carbone moyen [0,3 à 0,5%] qui doivent satisfaire aux prescriptions élevées de la limite d'élasticité, de la limite de fatigue, et de la résilience, ceci au dépend de la dureté, qui sera dans ce cas peu élevée, c'est pour cela que la température de chauffage et la vitesse de refroidissement, lors de la trempe doivent correspondre à la dureté la plus élevée. Et en dernier lieu, on fera une étude sur le fonctionnement de la machine de fatigue à flexion rotative. Tous les essais ont été effectués, au CVI au laboratoire de métallurgie.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Chapitre I

Transformations des phases dans l'acier.

I / ETUDE DES PHASES DE TRANSFORMATION DES ACIERS AU CARBONE

Les différentes phases observées ; lors de l'étude du diagramme Fer-carbone sont : la Ferrite- α - ; l'austénite- γ - ; et la cémentite- Fe_3C -.

* Ferrite:

C'est une solution solide d'insertion du carbone et d'autres inclusions dans le fer α , le fer α est une forme polymorphe du fer, le fer α a un réseau cubique centré. On distingue la ferrite α , à une température inférieure à $911^\circ C$, avec une solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02% et ceci à la température $727^\circ C$. Aux températures élevées c'est à dire entre $1392^\circ C$ et $1539^\circ C$ on a la ferrite δ , avec une solubilité du carbone allant jusqu'à 0,1%, ceci à la température $1499^\circ C$.

Dans le réseau cristallin de la ferrite (fig 2), le carbone occupe le centre d'une face du cube, où s'inscrit une sphère de rayon $0,29R$ (R : rayon atomique du fer). Le point de curie de la ferrite, est le point qui correspond à la perte des propriétés magnétiques soit à $728^\circ C$, au dessus de cette température la ferrite perd ses propriétés magnétiques. Les propriétés mécaniques caractéristiques de la ferrite sont: la dureté et la résistance à la rupture faibles, la plasticité et la résistance élevées (Tableau 1). La Ferrite est une phase de base pour les Aciers

* AUSTENITE

C'est une solution solide d'insertion du carbone et d'autres inclusions dans le fer γ , qui est une forme polymorphe du fer et ayant un réseau cristallin cubique à face centré. L'austénite existe à des températures élevées, supérieure à $727^\circ C$. La solubilité limite du carbone dans le fer γ est de 2,14%, ceci à la température $1147^\circ C$. Dans le réseau de l'austénite, le carbone occupe le centre d'une maille élémentaire, où s'inscrit une sphère de $0,41R$: R rayon atomique du fer

Fig (3)

La différence de volume des sphères élémentaires des c.c et c.f.c a prédéterminé la solution sensiblement plus grande du carbone dans le fer γ par rapport au fer α , l'austenite est paramagnétique, Les propriétés mécaniques caractéristiques de l'austenite sont :
plasticité élevée, la limite d'élasticité et la charge à la rupture faible (tableau 1)

* CEMENTITE

C'est une combinaison chimique du fer et du carbone de formule chimique Fe_3C , Sa structure cristalline diffère de celle du fer et du carbone, elle est orthorhombique avec une maille composée de douze atomes de fer, entre lesquelles sont insérés quatre atomes de carbone (Fig 4), la teneur de la cémentite en carbone est de 6.69% Les propriétés chimiques de la cémentite ne sont connues qu'approximativement, on adopte que sa fusion a lieu à peu près à 1260°C (fusion par laser).

Le point de Curie de la cémentite est situé très bas, c'est à 210°C que le carbone cesse d'être ferromagnétique; la propriété physique la plus importante de la cémentite est sa solubilité dans le fer γ .

Les propriétés mécaniques caractéristiques de la cémentite sont : dureté élevée, plasticité faible (Tableau 1)

La cémentite est une phase fragile, résistante qui augmente les propriétés résistances et diminue les propriétés ductiles, dans les aciers la cémentite à la forme sphérique ou lamellaire.

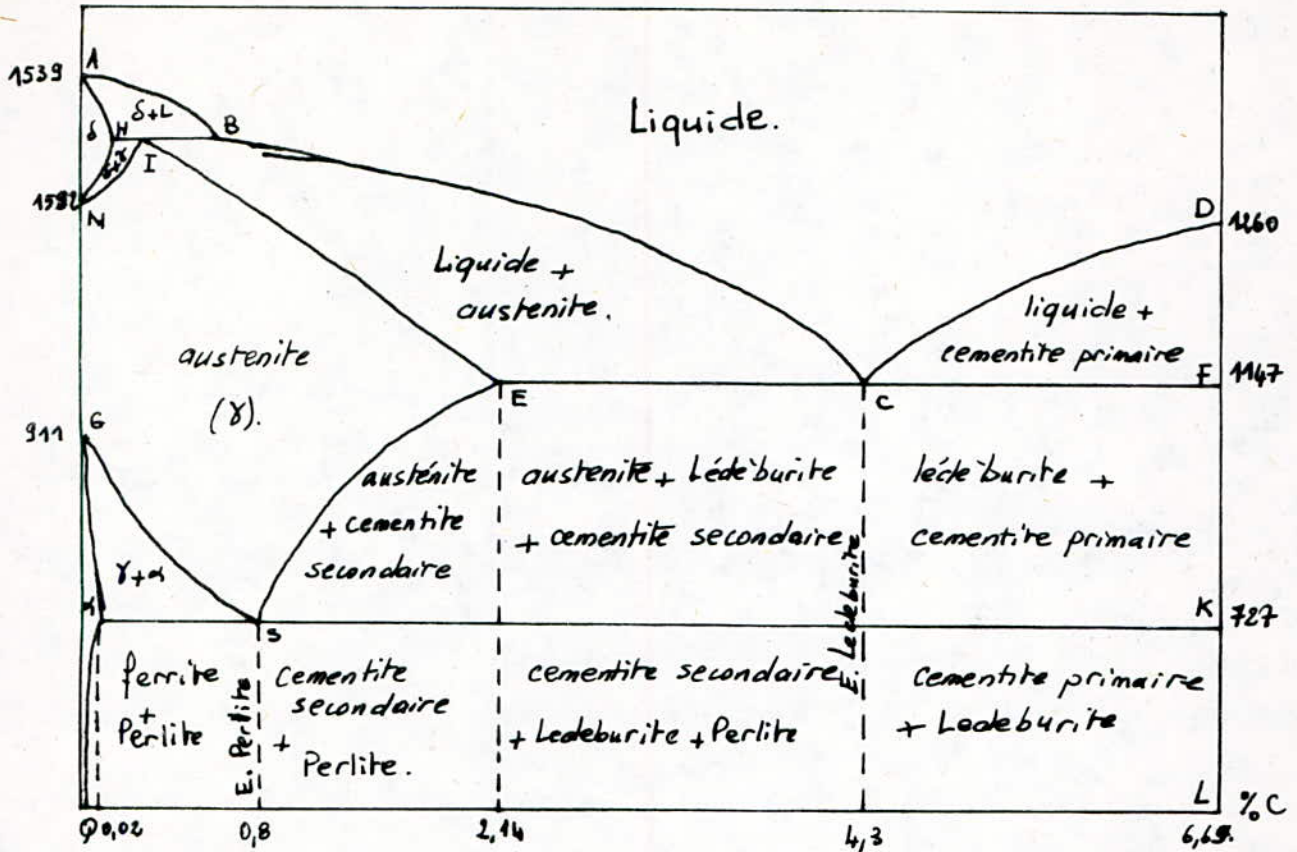
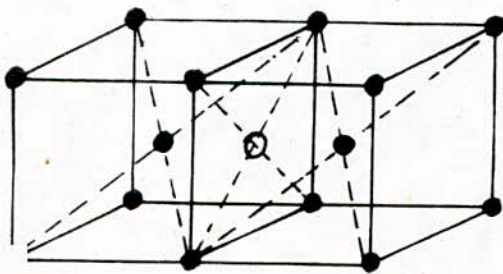
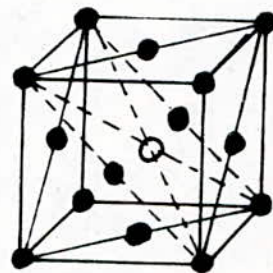


Diagramme Fer - cementite (fig 1)



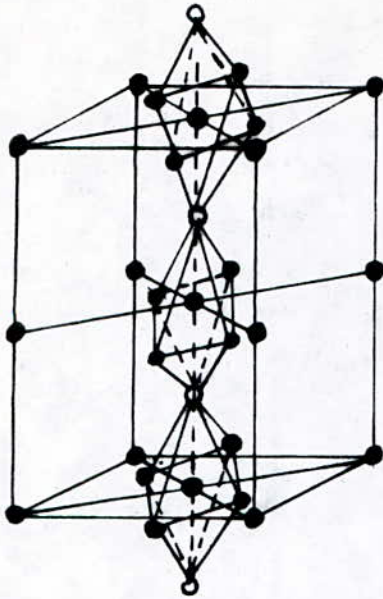
resau cristallin de la ferrite.
 en blanc: atome de carbone
 en noir : atome de Fer.

(fig 2).



resau cristallin de l'austenite.
 en blanc: atome de carbone
 en noir: atome de Fer.

(fig 3).



reseau cristallin de la cementite : orthorhombique. (fig 4).
 en blanc : atome de carbone
 en noir : atome de Fer.

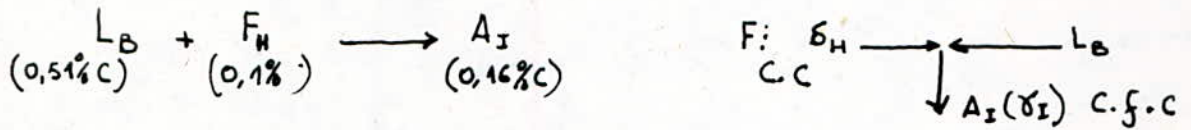
microstructure	symbole	HB $\left[\frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}\right]$	R _r [MPa]	A%	Kcu. $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}\right]$
Ferrite	Fe _α (c), α	800-100	300	40	2,5
Austenite	Fe _γ (c), γ	160-200	—	—	—
Cementite	Fe ₃ C; Cem	800	—	—	—
Pearlite	$\left[\begin{matrix} F + \text{Cem} \\ P \end{matrix}\right]$	180-220	800-900	≤ 16	—
Ledeburite	$[P + \text{Cem}]$	> 600	—	—	—

Propriétés mécaniques des phases et structure des aciers (Tableau 1-).

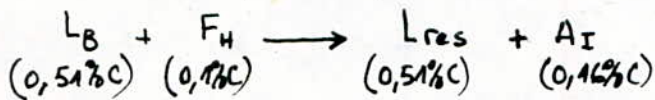
I-1/ TRANSFORMATIONS ISOTHERMIQUES

* transformation Peritectique:

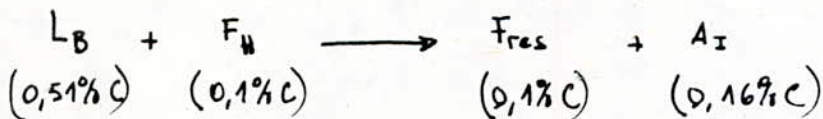
Cette transformation a lieu entre les points H et B, au point H (1499°C, 0,51% C). Pour un acier avec une teneur en carbone relatif au point I (0,16% C) on a l'interaction de la solution solide S_H (0,1% C) avec la phase liquide L_B (0,51% C), alors les cristaux de départ de la solution solide δ après transformation peritectique, se transforme complètement en austénite:



Pour un acier avec une teneur en carbone supérieure à celle du point I, et inférieure à celle du point B, la transformation fait disparaître complètement la solution solide δ , et conduit à la formation de l'austénite avec une quantité résiduelle de la phase liquide.



Pour un acier avec une teneur en carbone inférieure à celle du point I, et supérieure à celle du point H, la transformation fait disparaître la phase liquide, dont il résulte la formation d'une structure diphasé (Ferrite + solution solide Austénitique)



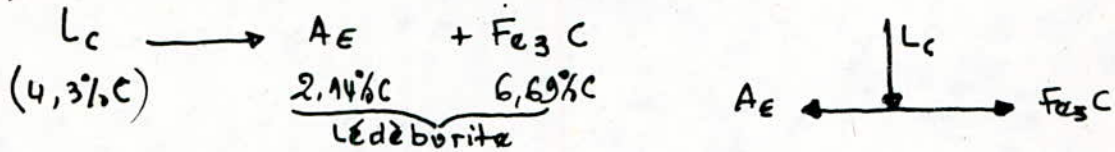
la transformation de la Ferrite δ_{res} en austénite se poursuit à l'état solide ($t < 1499^\circ\text{C}$)

Transformation eutectique:

La transformation eutectique à lieu entre les points E et F; au point E (1147°C ; $2,14\% \text{C}$); au point F (1147°C , $6,69\% \text{C}$)

les alliages ayant une teneur en carbone supérieur à $2,14\% \text{C}$, sont appelés les fontes.

Pour une teneur en carbone relatif au point C ($4,3\% \text{C}$), l'alliage liquide se cristallise en eutectique lédéburite



la lédéburite peut avoir une structure aveolaire ou lamellaire, la structure alvéolaire se compose de lamelles de cémentite transpercées de cristaux ramifiés d'austénite, cette structure est obtenue grâce à un refroidissement lent. Quand le refroidissement est rapide, on a la lédéburite lamellaire, qui se compose de minces lamelles de cémentite séparées par l'austénite. La lédéburite à une structure fragile et dure (Tableau 1).

Pour les alliages avec une teneur en carbone appartenant à l'intervalle $[2,14\% \text{C} \div 4,3\% \text{C}]$, ce sont les fontes hypoeutectiques; ils ont une structure composée, d'austénite, de lédéburite, et de cémentite secondaire; jusqu'à la température 727°C .

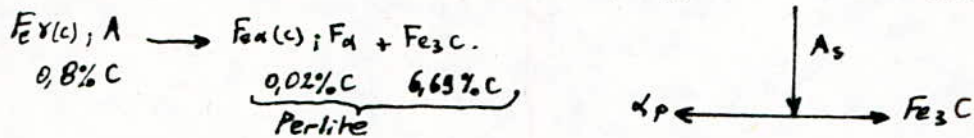
pour les alliages avec une teneur en carbone appartenant à l'intervalle $[4,3\% \text{C} \div 6,69\% \text{C}]$, ce sont les fontes hypereutectique, la solidification commence lorsque la température en baissant atteint la ligne du liquidus CD; Alors la phase liquide devient le siège de naissance et de grossissement des cristaux de cémentite primaire; avec l'abaissement de température, la concentration du carbone dans l'alliage liquide diminue avec la ligne liquidus, arrivé à la température, 1147°C , le liquide acquiert la concentration eutectique $4,3\% \text{C}$, et se cristallise avec la formation de lédéburite; après solidification les fontes hypereutectiques se composent de cémentite primaire et de lédéburite ($\gamma + C_{em}$)

Jusqu'à la température 727°C .

Transformation eutectoïde.

La transformation eutectoïde a lieu entre les points : P ($0,02\% \text{C}$; 727°C) et K ($6,69\% \text{C}$; 727°C).

Pour un acier ayant une teneur en carbone relatif au point S ($0,8\% \text{C}$), au dessus de la ligne PSK, on a l'austenite sous sa forme solide, à la température 727°C l'austenite se décompose pour donner de la ferrite α , avec une teneur en carbone de $0,02\%$ et de la cémentite.



La Perlite est un mélange de la ferrite à la concentration $0,02\% \text{C}$, avec de la cémentite, sa structure est lamellaire, elle est composée de lamelles alternantes de ferrite et de cémentite, la transformation eutectoïde se déroule avec la diffusion du carbone. Pour une concentration de carbone appartenant à l'intervalle $[0,8\% \text{C} ; 2,14\% \text{C}]$ l'acier hypereutectoïde, au dessus de la ligne SE il n'est constitué que d'austenite, aux températures qui correspondent à la ligne SE, l'austenite est saturé en carbone, ainsi avec la baisse de température elle dégage la cémentite secondaire, l'acier alors a une structure biphasé, austenite + cémentite secondaire, d'où la concentration du carbone dans l'austenite diminue suivant la ligne SE, arrivé à la ligne PSK, l'austenite titrant $0,8\% \text{C}$ se transforme en perlite, dépassant la ligne PSK on a une structure composé de la Perlite et de la cémentite secondaire, qui se dégage sous la forme d'un réseau, aux joints de l'ancien grain de l'austenite sous la formes de lamelles.

Pour une concentration de carbone appartenant, à l'intervalle $[0,02\% \text{C} ; 0,8\% \text{C}]$ l'acier hypo eutectoïde, au-dessus de la ligne PSK et au-dessus de la ligne OS, a une structure composé de ferrite et d'austenite, arrivé à la ligne PSK

l'austenite se transforme en perlite, au-dessous de la ligne PSK, on a une structure composée de ferrite et de perlite.

I.2* transformation polymorphes

Lors de la transformation polymorphe, d'un alliage ayant un certain type de réseau cristallin, on observe le changement de ce réseau c'est un processus de cristallisation secondaire qui débute par la germination et se poursuit par la croissance des germes. Les transformations polymorphes observées sur le diagramme fer-carbone sont définies par les lignes NH et GS, transformation de la ferrite δ en austenite; et de l'austenite en ferrite α .

la ligne NH est la limite supérieure de la coexistence de deux phases, ferrite δ et austenite, pendant le refroidissement, cette ligne correspond au début de la transformation polymorphe; de la ferrite δ en austenite. la ligne NI est la limite inférieure de la coexistence de la ferrite δ et l'austenite. la ligne GS est la limite supérieure de la coexistence de la ferrite α en austenite. pendant le refroidissement elle indique le début de la transformation polymorphe de l'austenite en ferrite α , la transformation a lieu dans un intervalle de température et s'accompagne de la redistribution du carbone entre la ferrite et l'austenite.

I.3* transformation à solubilité variable.

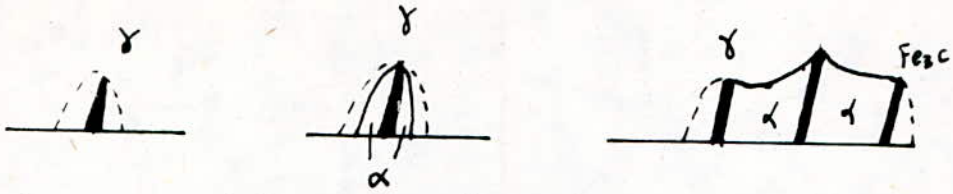
Cette transformation a lieu suivant les lignes SE et PQ, pendant le refroidissement elle s'accompagne par une précipitation de la cémentite, lors du chauffage elle s'accompagne par la dissolution complète de la cémentite. La ligne SE, au refroidissement traduit les températures qui déclenchent le départ de la cémentite secondaire à partir de l'austenite, au chauffage elle indique la fin de la dissolution de la cémentite II, dans l'austenite. la ligne PQ au refroidissement indique les températures qui déclenchent le dépôt

de la cémentite tertiaire dans la ferrite α , lors du chauffage elle indique la fin de la dissolution de la cémentite III dans la ferrite.

la cémentite apparaît aux joints des grains, la cémentite tertiaire dégrade la plasticité de la ferrite et des aciers à faibles pourcentages de carbone.

II / Transformation Perlitique:

C'est la transformation de l'austénite surfusionnée, qui s'effectue par diffusion, car l'austénite est pratiquement homogène quant à sa concentration en carbone, elle se décompose en précipitant la ferrite, et la cémentite, on obtient ainsi un mélange de phases dont la teneur en carbone est différente avec la cémentite comme constituant dominant, l'étude micrographique de la perlite avec un grand grossissement a montré que les lamelles qui la constituent sont formées alternativement de la ferrite et de cémentite la formation de ces lamelles a lieu avec l'apparition des germes de cémentite aux joints du grain austénitique, les germes de cémentite sont grossis par la diffusion du carbone provenant des volumes d'austénite adjacents, il en résulte un appauvrissement en carbone de l'austénite entourant la lamelle de cémentite, qui contribue à sa transformation en ferrite, la croissance des lamelles de ferrite enrichit la ferrite environnante en carbone, l'austénite ainsi enrichie en carbone est un domaine où naissent et se développent des lamelles de cémentite apparues auparavant. Les processus de formation et de croissance des particules de carbures assurent les conditions favorisant l'apparition de nouvelles lamelles de ferrite et l'augmentation des lamelles déjà existantes, il en résulte la croissance commune de petits cristaux de ferrite et de cémentite qui forment des colonnes de perlite (Fig 5). la perlite apparaît après refroidissement relativement long, si le refroidissement est considérablement ralenti, on observe une transformation de la cémentite constituant la perlite, cette cémentite se concentre en petites taches rondes. On désigne ce phénomène sous le nom de "sphéroïdisement" de la cémentite. il



representation schematique du mecanisme de la formation de la Perlite. (fig 5).

structure	Perlite	Sorbite	troostite
$\Delta_0 (\mu)$	0,6 ÷ 1,0	0,25 ÷ 0,3	0,1 ÷ 0,15
HB	180 ÷ 250	250 ÷ 350	350 ÷ 450.

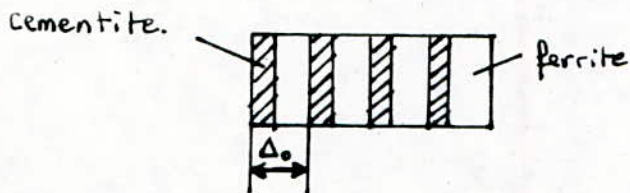


tableau.2

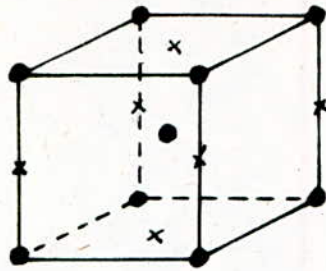
Variation de la distance interlamellaire en fonction de la structure.

S'accompagne d'une diminution de la résistance de l'acier avec un allongement supérieur. Par contre plus la surfusion est forte, plus la structure ferrite-cémentite est fine, c'est à dire plus la distance interlamellaire qui est égale à la moyenne de la somme des épaisseurs d'une lamelle de ferrite et d'une lamelle de cémentite est petite (d_0) plus la dureté est grande, les structures lamellaires de la forme eutectoïde sont définies comme perlite sorbite et troostite (Tableau 2)

lorsque la surface est forte, on a augmentation de la dureté, la charge de rupture et les limites d'élasticité (Tableau 1).

III / Transformation Martensitique:

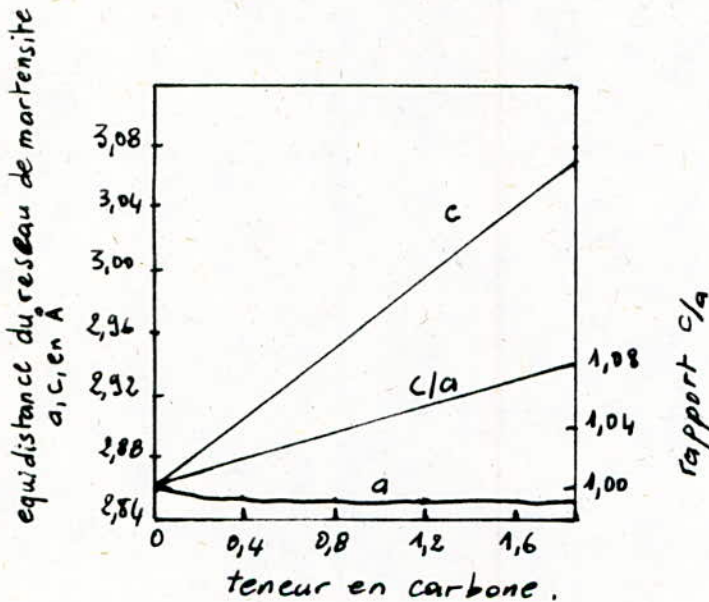
Cette transformation a lieu lorsque un refroidissement rapide produit la surfusion de l'austénite jusqu'à basse température, qui rendent impossible la diffusion du fer et du carbone, donc on n'a pas redistribution des atomes de carbones cette transformation se réalise par glissement, sans modifier la composition de la solution solide; on a basculement coopératif des atomes qui participent à la formation des lentilles ou plaquettes de martensite, dans ce mouvement, le déplacement de chaque atome est inférieur à une distance interatomique. La transformation martensitique s'accompagne de changement de volume du métal. Donc la martensite est une solution solide interstitielle sursaturée en carbone dans le fer; la teneur en carbone du fer dans ce cas peut atteindre 2,14%; donc la maille de la martensite est une maille de ferrite légèrement déformée, le réseau devient quadratique centré et les atomes de carbone occupent quelques sites octaédriques (fig 6) Les dimensions de la maille dépendent essentiellement de la teneur en carbone on a l'équidistance "c" est plus grande que l'équidistance "a", avec l'augmentation de la teneur en carbone, la hauteur "c" augmente, alors que les dimensions "a" diminuent et finalement le rapport "c/a" augmente linéairement La transformation martensitique se déroule dans un intervalle de température, la transformation s'amorce dès la température M_s et prend fin



(fig 6)

●: Position des atomes de fer
 x: position possibles des atomes de carbone

Maille de Martensite



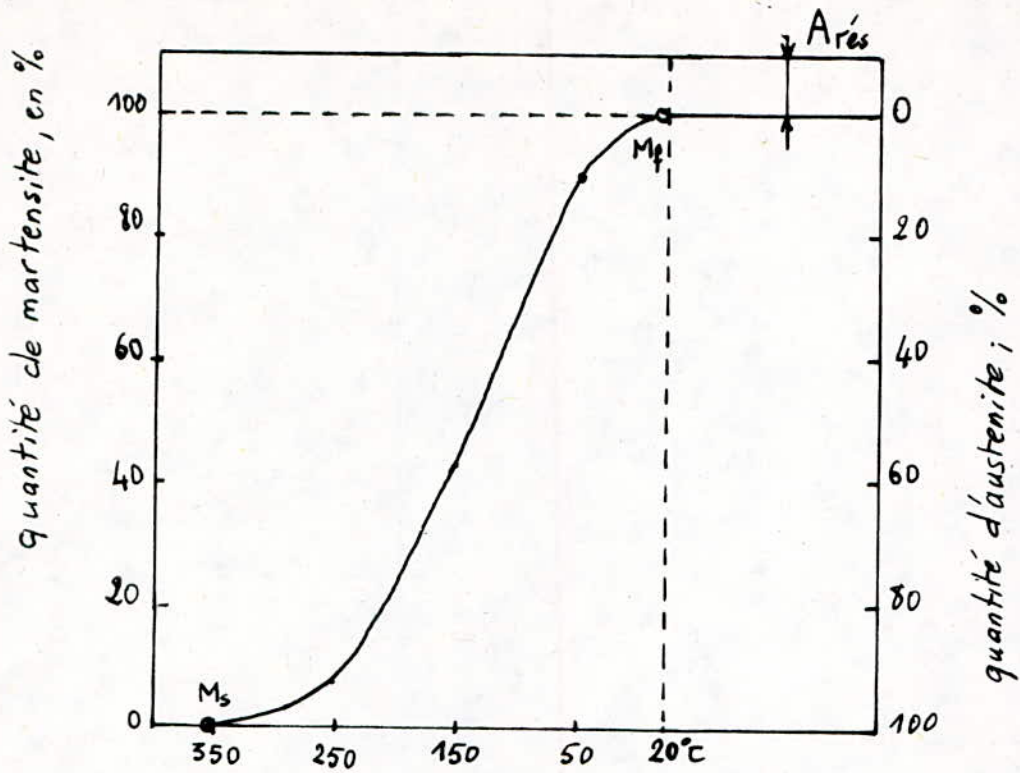
(fig 7)

Variation des paramètres de la maille de martensite en fonction de la teneur en carbone.

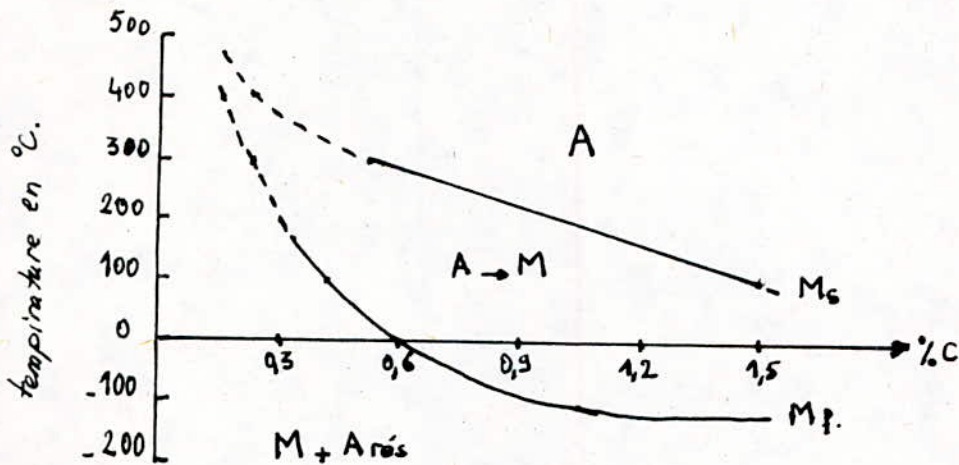
% C	0,4	0,6	0,7	0,85	1,2.
augmentation du volume en %	0,4	0,46	0,85	1,13	0,9

Tableau: 3

Changement du volume du métal lors de la transformation Martensitique en fonction du % de carbone



Courbe martensitique pour les aciers a bas carbone (fig 8)



Tempiratures des Points martensitiques M_s et M_f .
- influence de la teneur en carbone. (fig 9)

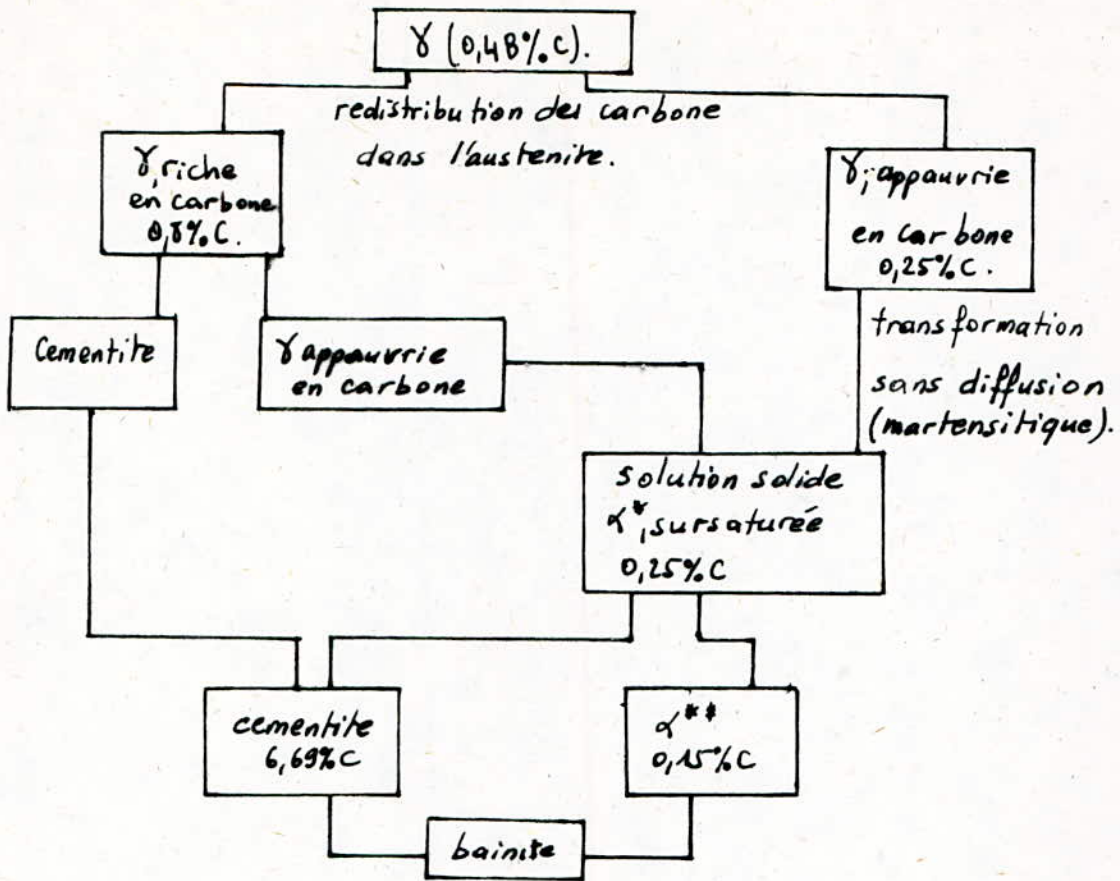
à la température M_f , Pour cela le refroidissement doit être continu, une interruption dans le refroidissement met pratiquement fin à la transformation martensitique ainsi la quantité de martensite formée peut être exprimée en fonction de la température de refroidissement de l'échantillon par une courbe dite martensitique (fig 8); la température des points M_s et M_f est d'autant plus basse que la teneur de l'austenite en carbone est plus élevée. la transformation martensitique ne se poursuit pas jusqu'à la fin, c'est pourquoi dans un acier trempé dont le point M_f est inférieur à 20°C et notamment dans les aciers au carbone à plus de 0,4 ou 0,5%, on constate la présence de l'austenite résiduelle sa quantité est d'autant plus grande que les points M_s et M_f se trouvent plus bas (fig 9); la transformation martensitique provoque l'augmentation de contraintes internes dans le métal.

La martensite est caractérisée par la dureté, et une résistance élevée, la dureté de la martensite croît avec l'augmentation de sa teneur en carbone l'augmentation du taux de carbone dans la martensite renforce son aptitude à la rupture fragile, la plasticité de la martensite est faible.

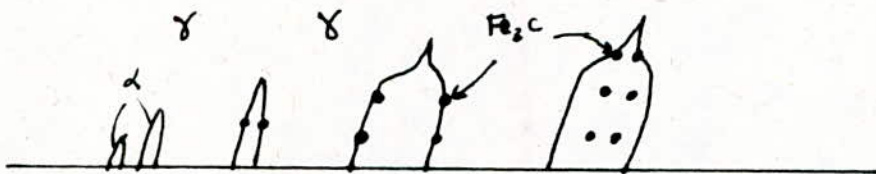
IV/ Transformation Bainitique (intermédiaire):

Cette transformation a lieu aux températures qui rendent impossible, l'auto-diffusion du fer; alors que la diffusion du carbone est encore assez élevée, l'austenite devient d'abord le siège d'une redistribution par diffusion du carbone ce qui conduit à l'apparition de plages riches et pauvres en carbone, les plages d'austenite appauvries en carbone dont le point M_s se situe, dans le domaine des températures de transformation Bainitique subissent la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$, qui se déroule suivant le mécanisme martensitique, la transformation d'une austenite surfusionnée cumule les éléments des transformations perlitique et martensitique. Cette transformation se produit dans un domaine de températures qui se situent entre les transformations perlitiques et martensitiques, la bainite à une structure composée de

Solution solide α , ayant subi une transformation martensitique et légèrement sursaturée en carbone, et de particule de cémentite, on a la bainite supérieure qui apparaît entre 500°C et 350°C , elle a une forme de paille coupée (fig 11), dans laquelle les particules de cémentites forment des particules étroites isolées, la bainite inférieure apparaît aux températures variant de 350°C et celle du point M_s , elle a une forme lamellaire, les particules de carbures se déposent dans les lamelles de la phase α (fig 11). La bainite supérieure, parmi ses propriétés mécaniques, on a la dégradation de la plasticité, et de la résilience, la dureté et la résistance mécanique ne changent pas, ou diminuent légèrement par rapport aux produits de décomposition austénitiques obtenus dans le domaine perlitique (sorbite, troostite). Pour la bainite inférieure, la dureté et la résistance mécanique augmentent alors que la résilience reste élevée.



Transformation bainitique (fig 10).



Représentation schématique de la formation de la bainite (fig 11)

Chapitre II

Influence du régime de la trempe sur les propriétés mécaniques et la structure des aciers.

I - Etude de la température et la durée du chauffage:

- Choix de la température de chauffage:

Pour un acier hypoeutectoïde la température de chauffage doit être de 30 à 50°C au-dessus de A_{c3} (fig 12); la structure initiale de l'acier étant Perlite + ferrite, devient austénitique qui se transforme en martensite lorsqu'on refroidit, à une vitesse plus grande que la vitesse critique de trempe, si l'acier hypoeutectoïde est chauffé au-dessus de A_{c1} , mais au-dessus de A_{c2} , il garde après la trempe, en plus de la martensite, des plages de ferrites; la présence de la ferrite diminue la dureté de l'acier après trempe, les aciers hypereutectoïde doivent être chauffés de 50°C à 70°C au-dessus de la ligne A_{c1} (fig 12), à ces températures on a l'apparition de l'austenite avec une certaine quantité de cémentite secondaire, après trempe la matrice martensitique compte des particules de cémentite non dissoutes lors du chauffage, cette structure assure une dureté et une teneur à l'usure élevées, avec une charge à la rupture limitée.

- Influence de la température de chauffage:

Plus la température de chauffage est grande, plus les grains d'austenite formés sont plus grands, si on prolonge le séjour isotherme; on a aussi grossissement du grain d'austenite, pour un chauffage continu la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ a lieu dans un certain intervalle de température; Plus la vitesse de l'échauffement est grande, plus la température de la transformation de la perlite en austenite est grande, l'intervalle de température de cette transformation est d'autant plus grand que le chauffage est plus rapide; la croissance du grain d'austenite est spontanée, elle est à l'origine du système qui ayant tendance à diminuer d'énergie libre, les grains grossissent en acceptant d'autres grains plus petits, donc moins stables du point de vue thermodynamiques. Lorsqu'on a un gros grain on a diminution de la résilience surtout dans le cas d'une dureté élevée, et élève le seuil de fragilité

a froid ; Plus le grain est gros, plus l'aptitude de l'acier aux déformations de trempe est grande.

- Dureté de chauffage :

On a la durée générale du chauffage : $T_{gen} = T_{éc} + T_{si}$

$T_{éc}$: étant la durée de l'échauffement d'acier jusqu'à la température donnée, elle est définie par la forme et les dimensions de la pièce ; le type de four ; la composition et les températures et propriétés des aciers

T_{si} : la durée du séjour isotherme à la température donnée dépend de la composition et de l'état initial de l'acier.

T_{gen} : doit assurer le chauffage d'une pièce à cœur et l'achèvement des transformations de phases sans être trop long pour ne pas provoquer le grossissement de grain et la decarburation des couches superficielles de l'acier.

Pour déterminer T_{gen} , on utilise le tableau suivant.

Chauffage	Durée de chauffage (s) par 1mm d'épaisseur ou de section		
	ronde	carrée	rectangulaire
dans un four électrique	40 à 50	50 à 60	60 à 75
dans un four à flamme	35 à 40	45 à 50	55 à 60
dans un bain de sel	12 à 15	15 à 18	18 à 22
dans un bain de plomb	6 à 8	8 à 10	10 à 12

choix de durée de chauffage des pièces en acier au carbone

II - Changement de la structure pendant le chauffage de 20° à 850°

le chauffage effectué est fait aux températures qui correspondent à l'existence de l'austénite (austénisation).

pour un acier eutectoïde, on a un mélange de ferrite-cémentite (perlite) qui se transforme en austénite ; le chauffage jusqu'à la $T_p A_1$ déclenche la dissolution d'une certaine quantité de cémentite suivant

la ligne de solubilité P_0 dans la ferrite; lorsque la température monte au dessus de Ac_1 ; la concentration du carbone dans des secteurs isolés de la ferrite augmente, ce qui fait que ces secteurs instables; alors ils subissent la transformation en austénite stable. Les germes d'austénite apparaissent à la surface de séparation de la ferrite et de la cémentite, lorsque la surface de séparation entre la ferrite et la cémentite, où se forme l'austénite, disparaît alors on a la croissance des grains d'austénite sans l'apparition de nouveaux germes, l'austénite ainsi formée est inhomogène, quant à la teneur en carbone, dans les secteurs qui adhèrent aux particules de la cémentite la concentration du carbone dans l'austénite est plus élevée, que dans les secteurs qui adhèrent à la ferrite, après la transformation polymorphe de la ferrite en austénite, la structure de l'acier garde une certaine quantité de cémentite; un prolongement du séjour isotherme est nécessaire pour dissoudre cette cémentite dans l'austénite (fig 14), l'austénite ainsi formée est hétérogène quant à sa composition, donc il faut, un temps supplémentaire pour assurer son homogénéisation, lors du chauffage des aciers hypoeutectoïdes et hypereutectoïdes, le processus d'austénisation est rendu plus compliqué par la transformation de la ferrite libre en austénite et la dissolution de la cémentite excédentaire

III / Influence de la vitesse de refroidissement:

La vitesse de refroidissement minimale, pour la trempe, qui correspond à la transformation de toute l'austénite surfusionnée en martensite s'appelle la vitesse critique de trempe, la valeur de cette vitesse diffère suivant les aciers et dépend de la stabilité de l'austénite, déterminée par la composition de l'acier, plus la stabilité de l'austénite est grande, plus la vitesse critique de trempe est faible; plus le grain d'austénite est gros et son homogénéité plus marquée, c'est à dire la température de son échauffement plus élevée. Pour les aciers au carbone cette vitesse est élevée et elle varie dans l'intervalle $[800 \pm 200 \text{ } ^\circ\text{C/s}]$

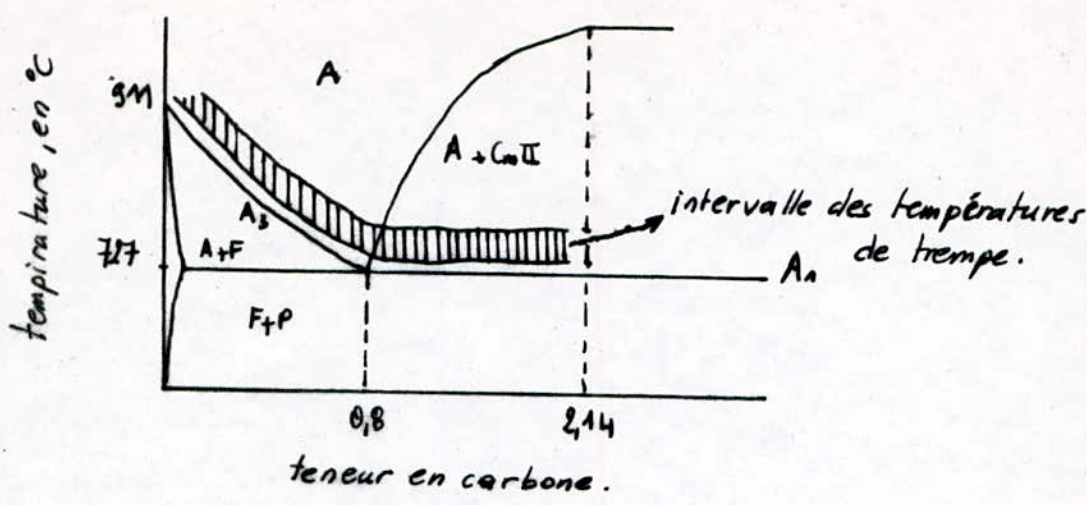
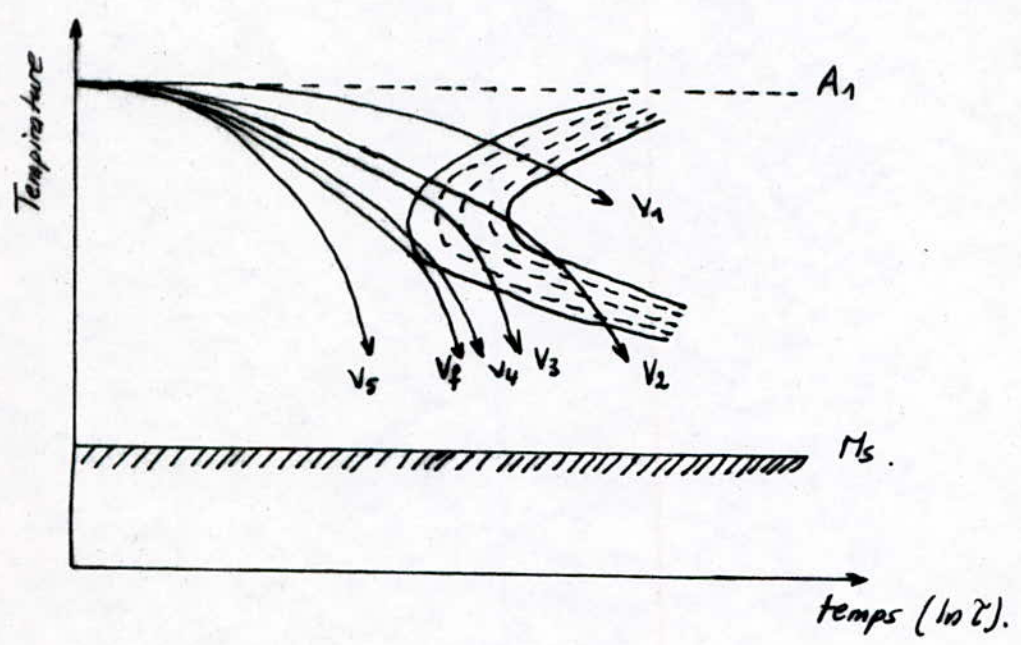


Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C indiquant les températures de trempe (fig 12).



Schema cinétique de la transformation de l'austénite surfusionnée. (fig 13).

Pour des vitesses de refroidissement différentes on obtient des structures différentes (fig 13), Pour une faible vitesse de refroidissement (V_1, V_2) on a une transformation perlitique de l'austenite, un refroidissement à une plus grande vitesse (V_3) produit une transformation perlitique qui s'accompagne de transformation bainitique; dans ces conditions, une partie de l'austenite qui n'a pas subi de décomposition dans les domaines perlitiques et bainitiques se transforme en martensite, L'acier reçoit alors la structure de perlite, bainite, martensite, et d'une certaine quantité d'austenite résiduelle (fig 14) la transformation partielle dans le domaine bainitique modifie la composition de l'austenite, elle s'enrichit en carbone ce qui abaisse le point martensitique et augmente la quantité d'austenite résiduelle. lorsque la vitesse de refroidissement devient encore plus grande (V_4); la transformation bainitique n'a plus lieu et on ne constate qu'une décomposition partielle dans le domaine perlitique, il en résulte que la grande partie de l'austenite se surfusionne jusqu'au point M_s et se transforme en martensite après refroidissement, l'acier prend la structure troostite + Martensite + austenite résiduelle, lorsque la vitesse de refroidissement dépasse la vitesse critique de trempe (V_5), l'austenite ne subit que la transformation martensitique.

IV - Agents de refroidissement pour la trempe:

Le meilleur des refroidissements est celui qui se fait à grande vitesse, dans l'intervalle $A_1 - M_s$, pour étouffer la décomposition de l'austenite surfusionnée dans le domaine des transformations perlitiques intermédiaires, et qui est ralenti dans l'intervalle de la transformation martensitique $M_s - M_f$, une grande vitesse dans cette intervalle est indésirable, car elle accroît brusquement les contraintes résiduelles, et peut produire des fêlures, par contre un refroidissement trop long dans l'intervalle $M_s - M_f$, peut donner lieu à un revenu partiel de la martensite et augmenter la quantité d'austenite

résiduelle, ainsi la dureté se dégrade. Généralement on utilise pour les bains de trempe des liquides qui peuvent bouillir; eau; huile; solutions aqueuses de sels et d'alcalis. lors du refroidissement dans l'un de ces agents on a 3 périodes:

-refroidissement pelliculaire ou caléfaction qui forme à la surface de l'acier une gaine de vapeur, en cette période, la vitesse de refroidissement est relativement faible.

-ebullition qui survient lorsque la gaine de vapeur se rompt et la surface se refroidit jusqu'à une température inférieure à la température critique, on a l'évacuation de chaleur se fait rapidement.

-échange de chaleur par convection qui correspond aux températures inférieures aux températures d'ébullition de l'agent refroidisseur, en cette période, la vitesse d'évacuation de la chaleur est minimale.

V Penetration de la trempe:

La penetration de la trempe est déterminée par la vitesse critique de refroidissement, si la vitesse réelle de refroidissement au cœur de la pièce, est supérieure à la vitesse critique de trempe $v_c (v_s)$ (fig 15) l'acier reçoit une structure martensitique sur toute la section, et sa penetration de trempe est totale, maintenant si la vitesse réelle de refroidissement du cœur est inférieure à $v_c (v_s, v_e)$; la trempe ne penetre qu'à une certaine profondeur dans la pièce, alors dans ce cas le cœur sera le siège d'une décomposition d'austénite avec précipitation d'un agrégat ferrite + cémentite, la profondeur d'une couche trempée par convention c'est la distance de la surface trempée à la zone demi-martensitique (50% de martensite + 50% de troostite).

VI - Contraintes internes d'un acier trempé:

ona 2 sortes de contraintes; contraintes thermiques; contraintes structurales

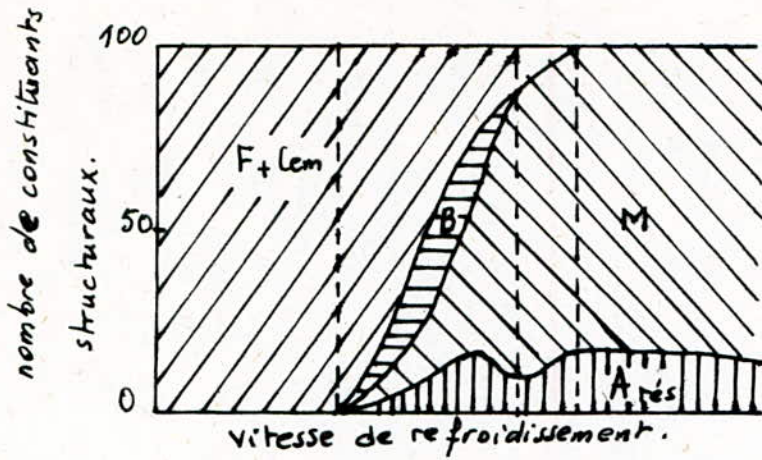
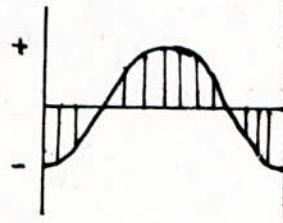
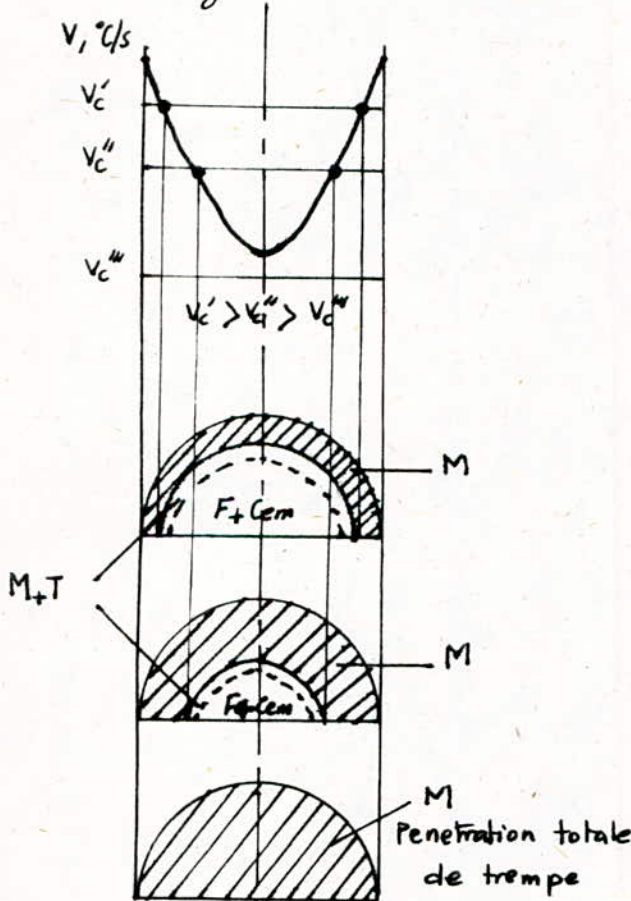
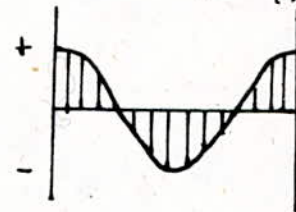


Diagramme structurale de l'acier. (fig 14)



schematisation des contraintes thermiques (fig 16)



schematisation des contraintes structurales (fig 17).

Rapport entre la penetration de trempe et la valeur de la vitesse critique de trempe v_c (fig 15)

- Contraintes thermiques:

Une distribution non uniforme des températures suivant la section de la pièce lors d'un refroidissement rapide donne lieu à une modification de volume (Tableau), dans les couches superficielles apparaissent alors des contraintes de traction momentanées, et dans les couches internes des contraintes de compression momentanées, lorsque le refroidissement de la surface et la modification du volume prennent fin; le cœur de la pièce continue de subir une contrainte thermique de compression, alors les contraintes commencent à diminuer à un certain moment changeant de signe, à la surface et à l'intérieur, donc les contraintes résiduelles sollicitant la surface sont celles de compression, et les contraintes qui agissent sur le cœur sont celles de traction (fig 16).

- Contraintes structurales:

Ces contraintes ont lieu dans le cas de la trempe totale, alors les contraintes thermiques, ne sont pas prise en considération, on a la transformation austénite en martensite s'accompagne de l'augmentation de volume qui produit à la surface des contraintes de compression momentanées et à l'intérieur des contraintes de traction momentanées, à mesure que la transformation évolue, les contraintes à la surface et au cœur de la pièce changent de signe, les contraintes structurales changent dans l'ordre inverse par rapport aux contraintes thermiques (fig 17). Elles peuvent provoquer des tapures et diminuer la limite de fatigue de l'acier; en pratique on diminue la vitesse de refroidissement dans l'intervalle $M_s - M_f$, et on fait un choix de températures de chauffage pour réduire les contraintes internes dans les pièces trempées, et surtout pour les pièces ayant des formes compliquées.

VII Procédés de trempe:

- Trempe continu:

C'est le procédé le plus utilisé, dans ce cas la trempe se fait dans un

milieu refroidissant unique, utilisé pour les pièces de forme simple, on obtient de très grandes contraintes thermiques et structurales.

Trempe à deux bains:

la pièce trempée suivant ce mode est refroidit d'abord à l'eau, juste au-dessus du point M_s , puis placé rapidement dans l'huile, où à l'air où elle se refroidit jusqu'à 20°C , on utilise ce procédé pour les outils ex: taraud

Trempe suivi d'auto-revenu:

On a le refroidissement de la pièce dans un bain de trempe est interrompue, lorsqu'elle garde encore de la chaleur à l'intérieur, en se dégageant cette chaleur élève la température des couches superficielles plus refroidit et produit ainsi l'auto-revenu, la dureté est plus faible au cœur qu'à la surface. Ce mode de trempe est utilisée pour les pièces devant supporter des charges dynamiques, et qui doivent combiner une dureté superficielle élevée à ductilité accrue au cœur (EX: burin).

Trempe isotherme martensitique: (trempe étagée).

La pièce prévue pour être trempée par ce procédé est refroidie dans un bain, dont la température est légèrement supérieur au point M_s , et maintenue à cette température un temps relativement court, pour obtenir une même température par section de la pièce, ensuite la pièce est refroidie à l'air jusqu'à la température ambiante, on a la diminution des contraintes.

Trempe isotherme bainitique:

elle s'effectue en principe de la même manière que la trempe martensitique, mais elle impose un séjour plus long au dessus de M_s .

Chapitre III

Influence du regime du revenu sur les propriétés
mecaniques et la structure des aciers.

Generalites sur le revenu.

La fragilité est un inconvénient pour les pièces qui ont d'assez gros efforts à supporter, c'est pourquoi on est toujours obligé de faire subir aux aciers trempés, un second traitement thermique appelé revenu, qui a pour but de supprimer l'excès de dureté due à la trempe et d'atténuer les tensions internes et obtenir les propriétés les plus convenables, d'après les conditions de travail des pièces.

L'opération consiste à chauffer en dessous de la ligne AC_1 , soit 680°C au maximum, la température de revenu devra être plus élevée que l'on voudra garder moins de dureté au profit de la résilience et la ductilité.

Notons que les revenus après la trempe des aciers de constructions mi-durs et durs, au carbone, ne se font généralement pas au dessous de 400°C à cause de la fragilité, qui même à cette température est excessive, en principe lorsqu'on vise la dureté, la fragilité ne venant qu'en second lieu, on emploie des températures de revenu entre 120°C , 250°C et 400°C , lorsqu'on a besoin d'une dureté moyenne, associée à une bonne résilience, on choisit le revenu à des températures appartenant à l'intervalle $[550^\circ\text{C} \div 650^\circ\text{C}]$.

I/ Revenu à basse température:

Ce revenu s'effectue avec un chauffage inférieur à 250°C , c'est-à-dire à des températures appartenant à l'intervalle $[120^{\circ}\text{C} \div 250^{\circ}\text{C}]$.

I-1/ changement de la structure:

Lors du revenu à basse température on a la transformation de la martensite de trempe en martensite de revenu; lors de la décomposition de la martensite de trempe, au chauffage; on a une précipitation des carbures à partir de la martensite qui s'appauvrit en carbone (fig 18), à ces températures de revenu, la diffusion du carbone augmente et les cristaux des carbures grossissent, sous l'effet de l'apport des atomes de carbone à partir des volumes de la solution solide (martensite) à concentration accrue de carbone; finalement dans les cristaux de martensite, cette concentration devient presque homogène.

Les particules de carbures formées par revenu à basse température se distinguent de la cémentite par leur structure cristallographique, et leur composition; donc lors du revenu à basse température on a la formation dans la martensite d'un carbure "E" hexagonale, probablement le Fe_2C ; la formation au revenu d'un carbure "E" au lieu d'une cémentite plus stable, est due au fait qu'à la surface de séparation entre la solution et le carbure "E", la cohésion des réseaux est meilleur, et par conséquent l'énergie superficielle est plus basse, qu'à la surface de séparation entre la martensite et la cémentite, ce qui fait que les fluctuations d'énergie nécessaires pour faire naître, un germe critique de ce carbure, sont moins importantes.

la martensite de revenu se distingue de la martensite de trempe, par une faible concentration de carbone et des inclusions de petits cristaux, dispersés de carbure E la teneur en carbone de la martensite de revenu, est déterminée par la température, et la durée de chauffage, ainsi que la composition de la martensite initiale. Plus la température de revenu est élevée, plus la teneur en carbone de la martensite est petite (fig 18); à chaque température de chauffage correspond une teneur bien déterminée, de la martensite en carbone, avec l'augmentation

du séjour à ces températures, on constate d'abord une précipitation intense de carbone; puis ce processus ralentit, et en pratique cesse complètement lorsque la durée du séjour devient importante (fig 19).

I.2/ changements des propriétés mécaniques

Le revenu à basse température diminue les contraintes internes, augmente la résistance et améliore quelque peu la ductibilité, et surtout la résilience, sans altérer sensiblement la dureté, ce revenu est appliqué aux outils de coupe et aux instruments de mesure en aciers peu alliés et au carbone, ainsi qu'aux pièces ayant subi une trempe superficielle, la durée usuelle de revenu est de 1^h à 2^h30 mn. Pour les instruments de mesure et les pièces de grande section, il faut choisir des durées de revenu plus grandes.

II Revenu à température intermédiaire:

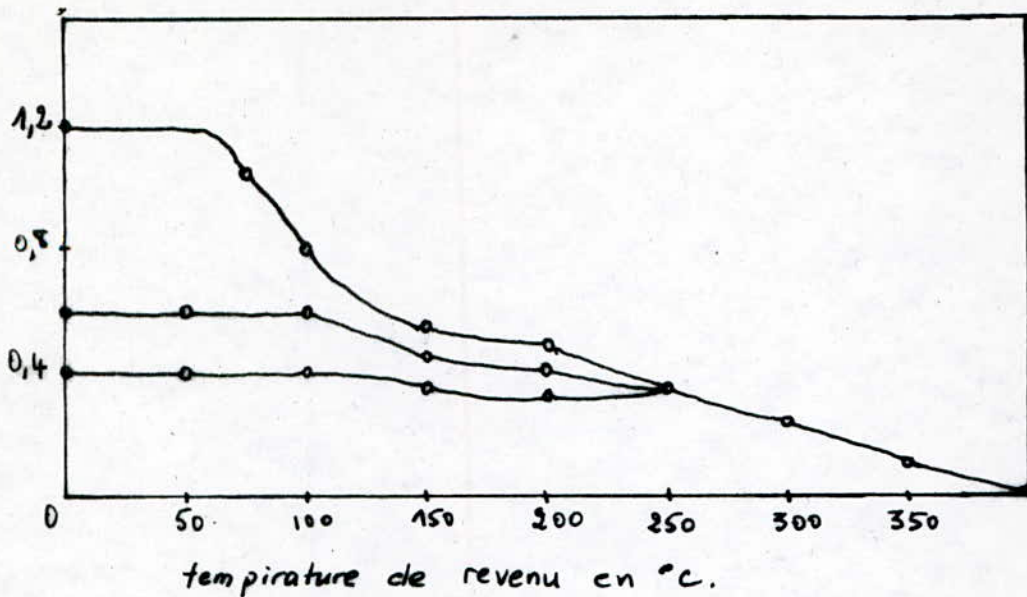
Le revenu à température intermédiaire nécessite, un chauffage à des températures appartenant à l'intervalle [400°C + 450°C].

II-1/ Changement de structure:

La fin du processus de séparation du carbone dans la martensite, s'accompagne de rupture de la cohérence, et l'isolation des réseaux, de ferrite et de carbure cette isolation est due, à la marche simultanée de la transformation de carbure qui à la formation de la cémentite ϵ $Fe_xC \rightarrow Fe_3C$

Les dimensions des particules de carbures changent et acquièrent une forme sphéroïdale, cette transformation des carbures aux températures de revenu, s'accompagne encore de modification, de la structure qui consiste en une polygonisation de la phase α , le structure obtenu s'appelle troostite de revenu; les carbures de troostite de revenu ont une structure granulaire et non lamellaire.

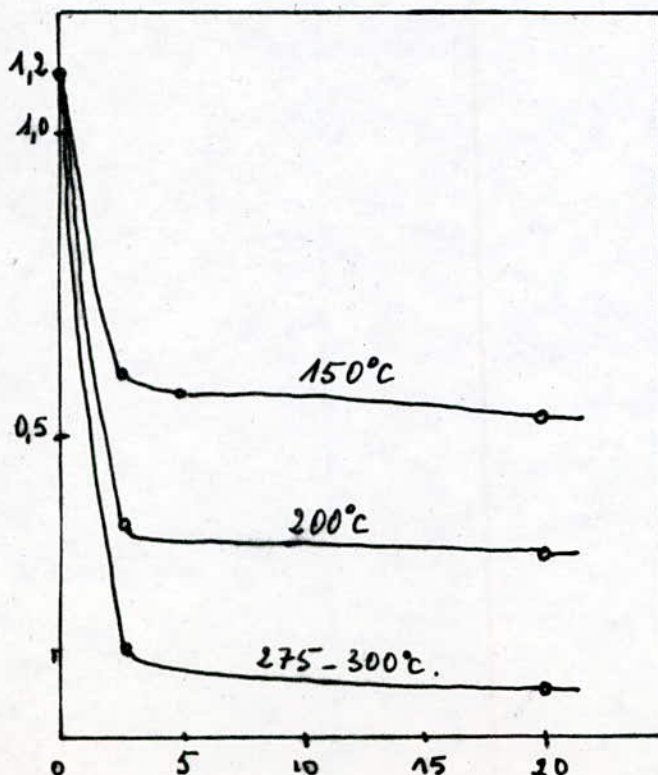
Teneur de la martensite
en carbone, en %.



Teneur en carbone de la martensite en fonction de la
température de revenu [acier à 0,4 ; 0,6 et 1,2% C].

(fig 18)

Teneur de la martensite en carbone, en %



Teneur de
la martensite en carbone
en fonction de la durée
du revenu.

(fig 19)

[acier 1,2% C].

II.2 Changement des propriétés mécaniques:

Ce revenu permet d'obtenir une limite d'élasticité importantes, les résistances à la fatigue, et à la relaxation élevées, ils s'emploient pour des ressorts de types variés.

III. Revenu à haute température:

Le chauffage pour ce revenu, s'effectue aux températures appartenant -ant, à l'intervalle $[550^{\circ} \div 680^{\circ}C]$.

III.1. Changement de la structure:

Au cours du revenu, on a la migration, des atomes de carbone à travers la solution solide α' , qui s'accompagne de la dissolution des particules plus petites, et du grossissement des particules, plus grosses de cémentite; cette solution devient plus pauvre en carbone, la structure d'un acier pro-duite; par le revenu à haute température, s'appelle sorbite de revenu; les carbures de sorbite de revenu, ont une structure granulaire.

III.2. Changement des propriétés mécaniques:

Le revenu à haute température crée, un meilleur rapport la résistance, et la ductilité de l'acier; on obtient alors un meilleur ensemble, des Propriétés mécaniques; la trempe suivit de revenu à haute température améliore par rapport à l'état normalisé, ou recuit; les limites de ruptures et d'élasticité; surtout la résilience, et la limite de fatigue (σ_0), voilà pourquoi le traitement thermique, qui contient trempe et revenu à haute température, porte le nom de "amélioration"
la résistance à l'usure diminue, à cause de la dureté, qui varie de 25 à 35 HRC.

IV. Influence de la vitesse de refroidissement:

La vitesse de refroidissement après revenu exerce une action importante

- Sur la valeur, des contraintes résiduelles, 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, le refroidissement à l'air engendre, à la surface des contraintes de compression 7 fois inférieur, à celle produite par l'eau, et le refroidissement par l'huile 2,5 inférieurs à celles produites par l'eau.

Chapitre IV

Methode d'experience.

I. Mesure de la dureté:

La dureté peut-être définie comme étant la résistance, qu'oppose un matériau, à sa pénétration par un corps plus dur que lui.

- Principe de l'essai de dureté Brinell.

Cet essai est simple, et très rapide, il consiste à imprimer dans la pièce une bille en acier dur, de diamètre "D", sous une charge "F", et à mesurer le diamètre "d" de l'empreinte, après suppression de la charge "F". Le nombre de Brinell est définie par le quotient de la charge "F", exprimée en [daN] par l'aire en [mm²], de l'empreinte considéré, comme une calotte sphérique d'où:

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

on a effectué l'essai Brinell suivant la norme : NFA 03-152.

- une bille de 10mm de diamètre.
- une charge de 3000 kgf.
- une durée d'application de la charge de 10 secondes.

- Principe de l'essai de dureté Rockwell:

il permet, une mesure chiffrables en plusieurs points, il est très apprécié pour la vérification de dureté en series, dans cette méthode la charge est appliquée à un pénétrateur en diamant, ayant la forme d'un cône de 120°, la valeur de la pénétration est enregistré directement, sur un cadran gradué en unité Rockwells HRC, la charge appliquée dans ce cas est de 150 kgf; les essais sont effectués sur des pièces, après avoir été meulés à l'endroit choisi.

II. Mesure de la résilience:

La résilience, C'est le choc auquel peut résister l'acier, et sa valeur

Permet de définir, une mesure de la fragilité du métal; une éprouvette de section donnée; est soumise à un choc capable de la rompre d'un seul coup, une partie de la force vive totale est absorbée par le choc, la masse frappante est plus ou moins amortie, ne laissant disponible qu'une force vive restante, qui est mesurable, le travail absorbé est d'autant plus grand, que l'acier est plus tenace, donc moins fragile.

Le type le plus répandu, des appareils à essayer les métaux aux chocs, est le mouton Charpy, il se compose d'un pendule formé par une masse, pouvant osciller à l'extrémité d'un levier mobile, la masse porte le couteau de choc, l'éprouvette est placée dans un logement sur le socle de l'appareil; on relève le pendule puis on l'abandonne à l'action de la pesanteur, en soulevant le doigt d'accrochage le couteau vient frapper l'éprouvette, qui est rompue, et le levier remonte d'un angle, qui mesure l'énergie restante; et comme on connaît la force vive du pendule, on peut avoir le travail absorbé (travail de rupture) T .

La résilience K_H : $K_H = \frac{T}{S}$ T : travail absorbé [dJ]
 S : section de l'éprouvette [mm^2].

L'éprouvette utilisée est du type "Mesnager" (fig 20).

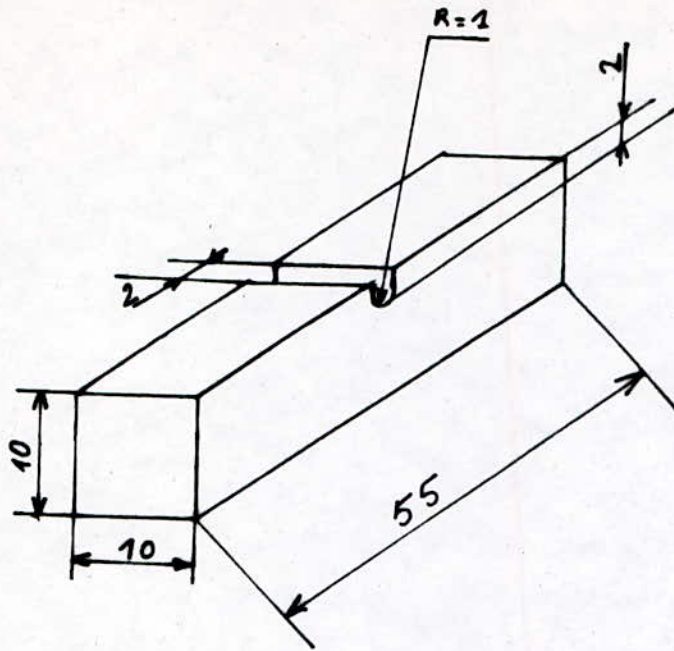
III. Essai de traction:

Cet essai est effectué de la manière suivante: On découpe dans le métal à essayer une éprouvette de section constante, sur laquelle on exerce un effort de traction, dirigé suivant l'axe, il faut que l'effort qui allonge le barreau soit continu.

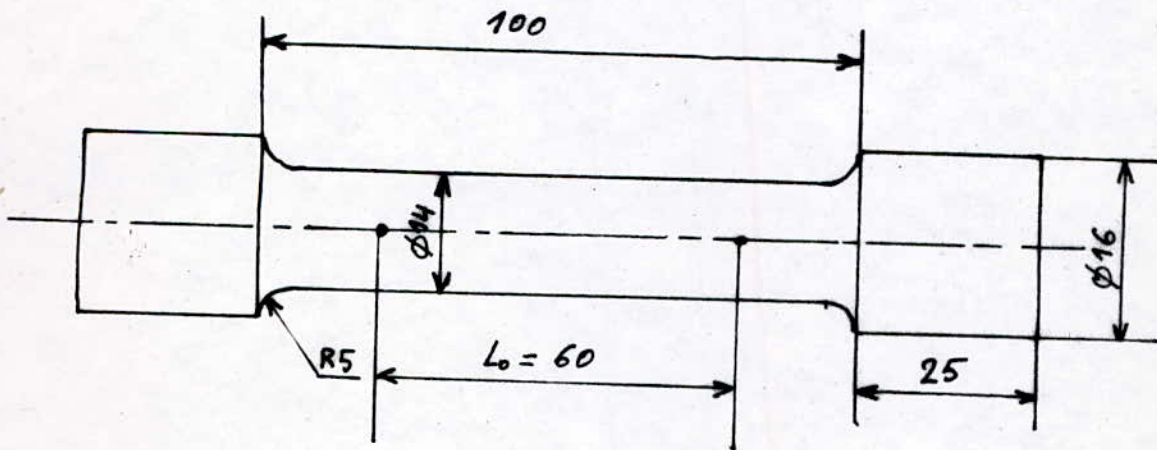
Les caractéristiques fournies par l'essai de traction sont:

- la limite élastique ---- R_e .
- la charge de rupture --- R_r .
- l'allongement - - - - - $A\%$
- striction - - - - - $\Sigma\%$

l'éprouvette utilisée est du type E.
 fig (21).



Eprouvette "Mesnager" (fig 20)



Eprouvette d'essai de traction (fig 21)

- Limite d'élasticité : R_e -

la contrainte minimale qui produit une déformation permanente du métal, exprimée en daN/mm^2 , s'appelle la limite élastique; la déformation permanente est celle qui subsiste après la cessation de l'effort; Par opposition, on appelle déformation élastique celle qui cesse, dès que l'effort n'est plus appliqué.

la limite élastique est une des propriétés capitales de l'acier, car la contrainte supportée par le métal en service ne devra jamais la dépasser, c'est elle qui est souvent considérée pour décider du choix d'un acier.

- Résistance à la rupture : R_r .

On obtient ici une caractéristique absolument nette, qui ne donne lieu à aucune difficulté d'interprétation, son grand avantage est d'être facile à définir; lorsque après avoir passé la limite élastique, on continue à exercer une tension sur l'éprouvette, la contrainte passe par un maximum pour décroître ensuite jusqu'à la rupture, cette contrainte maximale exprimée en $[\text{daN/mm}^2]$, est la résistance à la rupture, cette caractéristique mécanique sert en pratique à caractériser, la capacité d'un métal.

- Mesure des allongements : $A\%$ - $\Sigma\%$.

Le phénomène s'effectue en deux périodes : en premier lieu, allongement proportionnel, puis allongement de striction, si l'on exerce une traction sur un barreau, il s'allonge d'abord régulièrement sur toute sa longueur, la section tend alors à diminuer, mais à cause de cette tension du métal, il se produit, un écrouissage qui compense largement la diminution de section, c'est la première période des allongements proportionnels, puis arrive un moment où cette augmentation de résistance par écrouissage, ne compense plus l'effort exercé par la traction, l'allongement se localise dans une région du métal et l'étranglement du métal commence, cette allongement se poursuit

Jusqu'à la rupture de la pièce, c'est l'allongement de striction, après la rupture, on note l'augmentation, de la distance entre les repères rapportés à une longueur initiale (fig).

$$\text{allongement: } A\% = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100$$

L: longueur finale.

L_0 : longueur initiale.

$$\text{striction: } \Sigma\% = \frac{(S - S_0)}{S} \times 100$$

S: section initiale.

S_0 : section amincie.

la striction indique dans une certaine mesure, la ténacité de l'acier.

IV. Micrographie:

la métallographie microscopique, ou micrographie a pour but de mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques, pour cela on procède à l'examen au microscope optique, par réflexion d'une surface polie, et attaquée, ce microscope est muni d'une chambre photographique.

IV. 1. Prélèvement des échantillons:

les échantillons sont enrobés dans une matière plastique appelée "résine", l'opération qui vient après l'enrobage c'est le polissage, qui consiste à rendre la surface, plane et brillante, de façon à ce qu'elle ne présente aucune rayure, susceptible de gêner l'examen ultérieur, pour cela on frotte le métal, sur des abrasifs, de plus en plus fins respectivement; 80; 180; 600; 1000 [grains/mm²]; on prolonge l'action de chacun d'eux, jusqu'à ce que les raies, créés par le produit précédent aient disparu, on utilise au finissage de la pâte diamantée ≤ 3 [μm] diamètres des grains de diamants enrobés, dans liant soluble dans l'eau et l'alcool.

Attaque chimique:

l'attaque, a pour but de révéler les joints des grains, et de différencier

les constituants de l'acier ; la méthode, que nous avons utilisée consiste à tremper, la face à attaquer, dans le nital ($5\% \text{HNO}_3 + 25\% \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) pendant, un certain temps puis laver l'échantillon à l'alcool, et on le sèche à l'air comprimée, puis on passe à l'examen au microscope optique, à l'aide duquel on prend des photos pour examiner, les structures obtenus, à noter que l'attaque a lieu à température ambiante.

V. Trempe:

Pour la trempe, on utilise plusieurs températures de chauffage, les températures sont en premier lieu inférieure à A_{c1} , en deuxième lieu elles sont comprises entre A_{c1} et A_{c3} , et en dernier supérieure à A_{c3} , ce qui nous permettra de mettre en évidence, l'influence de la température de chauffage sur la structure, et les propriétés mécaniques de l'acier XC48, et de déterminer, la température T_1 pour laquelle la dureté est la plus élevée, le temps de maintien des pièces, pendant le chauffage, dépend des dimensions des pièces, ainsi on a utilisé une minute, pour une section de 1mm.

Pour le refroidissement, on utilise, l'eau ; l'huile, et l'air, ce qui nous permettra de mettre en évidence, l'influence de la vitesse de refroidissement.

VI. Revenu:

les températures utilisées varie de 200° à 600°C , le revenu est appliqué aux pièces, ayant subi la trempe, à la température T_1 puis refroidit soit à l'eau, soit à l'huile ; on utilisera plusieurs températures de chauffages pour mettre en évidence, l'influence de la température de chauffage, sur la structure, et les propriétés mécaniques, le temps de maintien dépend des dimensions des pièces ; ainsi on a pris pour les pièces, de petites dimensions, la durée est de 1h ; Pour les pièces avec des dimensions plus importantes, la durée est de 1h30mn.

Chapitre V

Resistance à la fatigue.

I. Generalité:

le metal sollicité en service par des charges variables et alternées, subit la rupture lorsque la valeur de la contrainte est non seulement inferieur à la resistance à la rupture R_r , mais encore inferieur à la limite d'élasticité, la rupture du metal sous l'effet de contraintes repetées ou alternées, s'appelle la fatigue du metal et son aptitude à resister à la rupture de fatigue porte le nom d'endurance, donc finalement la fatigue est la modification des propriétés du metal, consécutive à des variations périodiques d'efforts; exemple: cas des moteurs, des machines tournantes, des vehicules de deplacement, vibrations des organes de machines, villebrequin, arbre, segment de piston, axe, bielle, ressort, ailette de turbine.

La rupture par fatigue ne s'accompagne d'aucune modification apparente de la forme ou d'aspect de la pièce, et bien que la fissuration par fatigue soit progressive, la rupture apparait brutalement sans deformation préalable visible à l'œil, la fatigue est donc un phénomène plus redoutable que l'usure, la corrosion, ou le fluage, qui entraînent une alteration progressive des pièces permettant ainsi de les retirer du service avant rupture.

la cassure par fatigue est due à une fissure qui se propage progressivement à partir de son point d'origine, qui est souvent une zone de concentrations de contraintes, les fissures de fatigue sont extrêmement fines, et par suite difficiles à deceler. La cassure d'une pièce rompue par fatigue se compose généralement, de 2 zones distinctes: Zone lisse qui constitue la cassure de fatigue proprement dite, et zone rugueuse à grains plus ou moins apparent qui constitue, la cassure instantanéé finale, intervenant quand la section de la pièce est suffisamment reduite, Pour les metaux fragiles elle a une structure cristalline grossière

- Pour les ductiles, elle a une structure fibreuse, Pour prévenir la fatigue, on évite les concentrations de contraintes dans les régions soumises à des efforts variables.

II Essais de fatigue:

un essai de fatigue consiste à appliquer des contraintes cycliques (fréquence de 10 à 100 Hz), pendant 10^7 à 10^8 cycles, de nombreux types d'appareils permettent de pratiquer des essais selon des sollicitations de natures différentes (traction, flexion, torsion...), les résultats des essais sont portés, sur un diagramme, appelée Courbe de Wohler, qui représente la contrainte maximale σ en fonction du logarithme décimal du nombre N de cycles causant la rupture, pour chaque valeur de la contrainte σ on utilise plusieurs éprouvettes, car les résultats obtenus pour chaque valeur de σ sont dispersés, alors la courbe qu'on tracera n'a qu'une valeur moyenne correspondant à une probabilité de rupture de 50%, cette courbe de Wohler nous permet de déterminer la limite d'endurance, C'est la limite supérieure de la contrainte maximale σ , qui peut-être appliquée pendant un nombre conventionnel de cycles sans amener la rupture, Pour les aciers ce nombre est de l'ordre de 10^7 cycles

III. Machine à Flexion rotative:

Les organes essentiels des machines ont presque toujours à supporter des efforts composés, et les essais usuels, tractions et chocs, sont insuffisants pour qualifier un métal d'une façon complète, Ainsi des machines ont été étudiées, qui donnent de très bon résultats pour déterminer la résistance à la fatigue d'après la nature des efforts répétés ou alternés, les machines de flexion rotative sont les plus répandues, dans ce cas on emploie une éprouvette

- animée d'un mouvement de rotation et subissant un effort de flexion, qui provoque des contraintes alternées ; traction - compression ; la figure 22 nous présente le schéma d'installation de la machine à flexion rotative, 2 extrémités de l'éprouvette (fig 23) N°1, sont fixés dans 2 douilles (mors) N°2, on peut considérer que les mors avec l'éprouvette forment un seul corps, c'est à dire un axe rigide, qui tourne dans 4 roulements N°3 ; dans 2 sections de cet axe sont appliquées les charges, qui sont obtenus grâce au poids N°4 qui se déplace sur le levier N°5, et la charge est transmise sur l'axe grâce au système de levier N°6, la rotation de cet axe est effectuée par le moteur électrique N°8, de puissance 0,32 kW et tourne à 2760 tr/mn, et travaille avec une tension bien défini qui ne doit pas changer pendant l'essai ; la transmission du mouvement de rotation du moteur électrique à l'éprouvette est effectuée par un arbre flexible N°7, le nombre de tours de l'éprouvette est affiché par le compteur N°9, le compteur démarre automatiquement avec le moteur électrique, et il s'arrête lorsque le moteur électrique s'arrête, dans le cas où l'éprouvette se casse on a le levier N°5 qui percute un bouton, qui arrêtera automatiquement le moteur d'où on aura arrêt du compteur, alors on pourra lire le nombre de tours effectuée par l'éprouvette jusqu'à la cassure, les indicateurs N°10 nous permettent de mesurer la flèche ; Pour diminuer les vibrations pendant la rotation, dans tout le système, on utilise un amortissement avec l'huile, ou mécanique, au niveau des roulements qui se situent aux extrémités de l'axe rigide.

On peut voir d'après le diagramme des moments (fig 22), que sur la longueur de travail de l'éprouvette L , la valeur du moment

- de flexion est constante $M = PL_0$, donc on a la flexion homogène sur toute la longueur de travail de l'éprouvette, la contrainte maximum dans l'éprouvette est déterminée par la formule:

$$\sigma_{\max} = \frac{PL_0}{W}$$

W : moment de résistance de flexion par section de l'éprouvette.

$$W = \frac{\pi d^3}{12}$$

L_0 : longueur de l'éprouvette entre 2 roulements

P : charge appliquée.

IV. Calcul de roulement:

Les roulements que l'on utilisera sont des roulements à deux rangées de billes à rotule dans la bague extérieure, car les caractéristiques générales de ce roulement correspondent avec les conditions de travail dans la machine à flexion rotatives; les caractéristiques générales de ce roulement sont:

- ils supportent des charges radiales moyennes et des charges axiales faibles
 - ils conviennent pour de grandes vitesses de rotation
 - ils permettent un léger déversement de la bague intérieure par rapport à la bague extérieure.
- détermination de la charge dynamique équivalente P :

$$P = X \cdot V \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

- F_r : charge radiale en daN.
- F_a : charge axiale en daN.
- X: facteur radial.
- V: facteur de rotation.
- Y: facteur axiale

dans notre cas on neglige l'effort axiale: $F_a = 0$.

$$X = 1 ; V = 1.$$

F_r : effort radiale on prendra la plus grande charge qui peut-être appliquée sur le roulement.

$$F_r = 15 \text{ daN.}$$

$$\text{d'où } P = 15 \text{ daN.}$$

evaluation de la charge dynamique de base C:

$$C = P \left(\frac{L_h \cdot n}{16666} \right)^{\frac{1}{k}} \quad k = 3 \text{ roulement à bille.}$$

$$n = 2760 \text{ tr/mn.}$$

L_h : durée nominale en heures de travail $L_h = 10^5 h$ equivalent à 10 ans de travail. , pour nous on prendra $L_h = 10^7 h$.

$$C = 15 \left(\frac{10^7 \cdot 2760}{16666} \right)^{\frac{1}{3}} = 1774,69 \text{ daN} \quad C = 1774,69 \text{ daN.}$$

on choisiras finalement le roulement de type:

35 B5 22

$$D = 72 \text{ mm.}$$

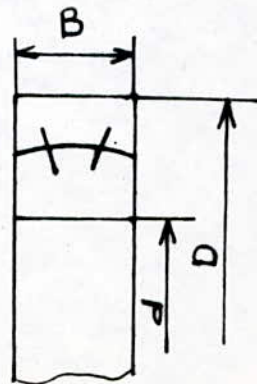
$$d = 35 \text{ mm.}$$

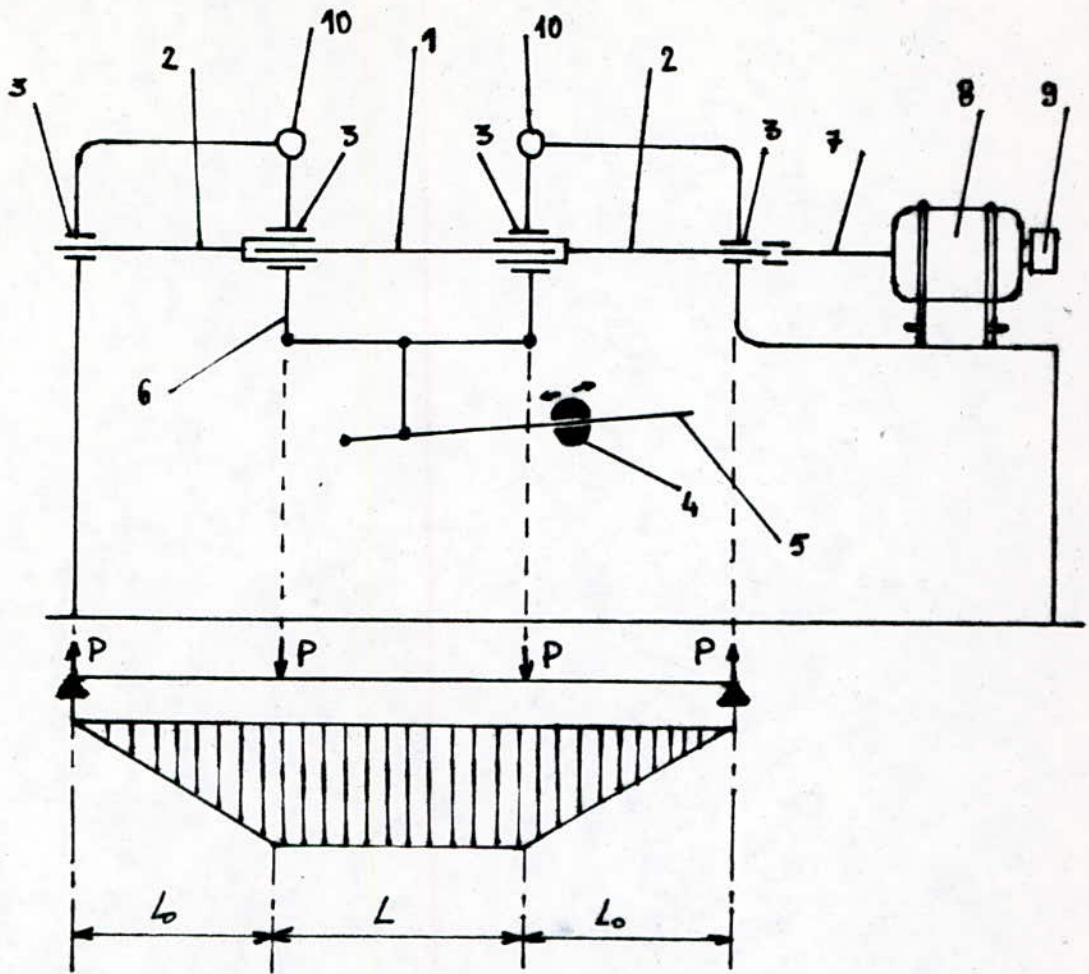
$$B = 23 \text{ mm.}$$

D: diametre exterieur du roulement.

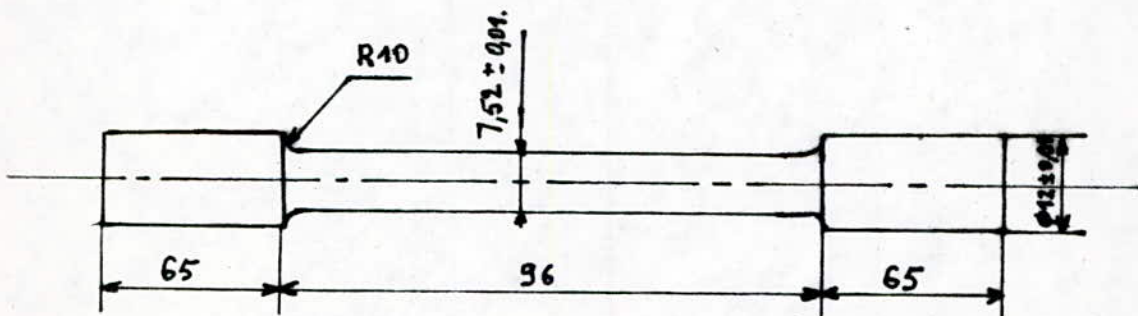
d: diametre interieur du roulement.

B: largeur du roulement.





Machine de Flexion rotative. (fig 22).



eprouvette normalise pour essai de fatigue, sur machine à flexion rotative. (fig 23).

Interpretation du Tableau.

Lors qu'on effectue la trempe sur l'acier XC48, on remarque que la résilience diminue, c'est à dire que la résistance au choc diminue ; quand on effectue le revenu, la résistance au choc de l'acier augmente considérablement, par rapport à celle de l'acier trempé ; le revenu effectué dans notre cas, est un revenu à haute température, et comme on a vu précédemment que lors du revenu à haute température d'un acier trempé on a la dureté qui diminue, donc si on veut obtenir un acier avec une bonne résistance au choc ; on sera obligé de le faire au déterminant de la dureté.

donc on peut conclure que le traitement thermique, qui consiste à tremper l'acier XC48 à 825°C à l'eau ; suivi d'un revenu à 550°C nous permet d'avoir un bon ensemble des propriétés mécaniques avec dureté élevée et résilience importante :

$$\text{HRC} = 37 \quad ; \quad K_m = 9,47 \cdot 10^{-2} \text{ dJ/mm}^2$$

III - Resultats des essais de traction.

Les essais de traction nous permettent d'étudier trois (3) propriétés mécaniques de l'acier XC48 ; on a la résistance à la rupture, la limite d'élasticité et l'allongement ; et de mettre en évidence l'influence de la trempe et du revenu sur ces propriétés ; pour cela on utilisera 3 échantillons, un échantillon pris à l'état initial, c'est à dire normalisé, un autre trempé à 825°C à l'eau, et finalement un échantillon sur lequel on appliquera le revenu à haute température, c'est à dire à 550°C qui ayant été trempé à 825°C à l'eau auparavant.

- Tableau de valeurs :

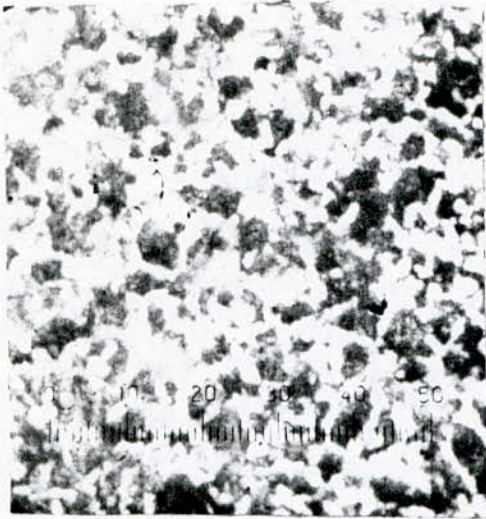
	etat normalisé	acier trempé à 825°C à l'eau	revenu à 550°C
charge de la limite d'élasticité C_e (dan)	6750	7350	5500
charge de la résis- tance à la rupture C_r (dan)	10500	9990	11350
limite d'élasticité $R = \frac{C_e}{S}$ [dan/mm ²]	43,8	47,7	35,7
résistance à la rupt- ure $R_r = \frac{C_r}{S}$ [dan/mm ²]	68,1	64,8	73,6
L_0	80	80	80
ΔL (mm)	15	1	9
A%	18,7%	1,25%	11,25%

S: section de l'éprouvette : $S = 153,86 \text{ mm}^2$

Interpretation du tableau:

lorsqu'on effectue la trempe à l'acier XC48, on a la limite d'élasticité qui augmente avec une diminution de la résistance à la rupture; lorsqu'on effectue le revenu à haute température sur un échantillon déjà trempé, on a la limite d'élasticité qui diminue conside-
-rablement, c'est à dire que l'acier devient moins élastique, mais on a la résistance à la rupture qui augmente, ce qui fait que l'acier devient plus plastique; on remarque que l'allongement pour l'acier trempé devient très faible, ceci est due à sa plasticité, par contre pour le revenu, vu que sa plasticité est importante on aura un allongement important, par rapport à celui de l'acier trempé.

Micrographie de l'acier XC48.



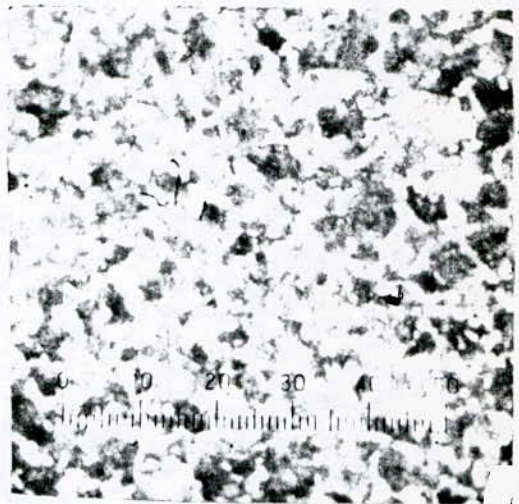
Trempe à 600°C à l'eau
structure ferrito-perlitique.



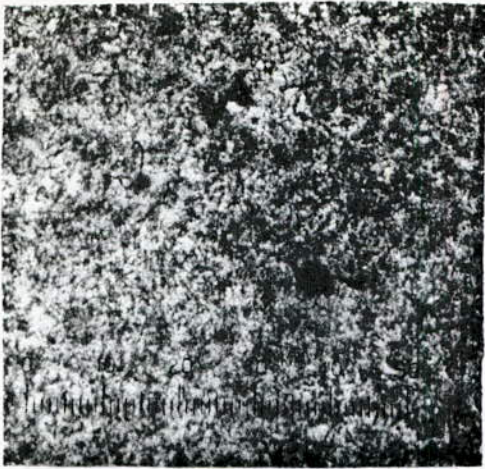
Trempe à 725°C à l'eau
Structure ferrito-perlitique.



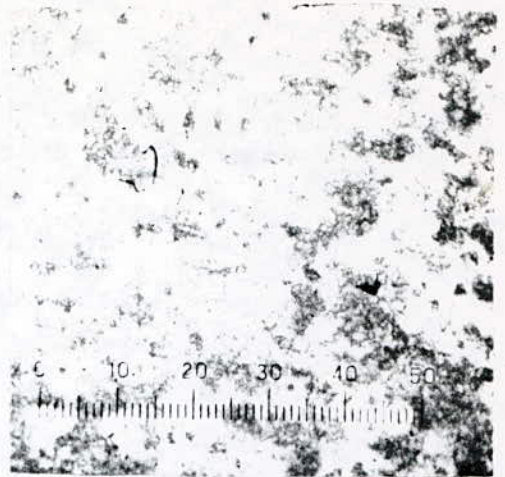
structure ferrito-perlitique.
trempe à 825°C à l'air.



structure ferrito-perlitique
etat initiale.



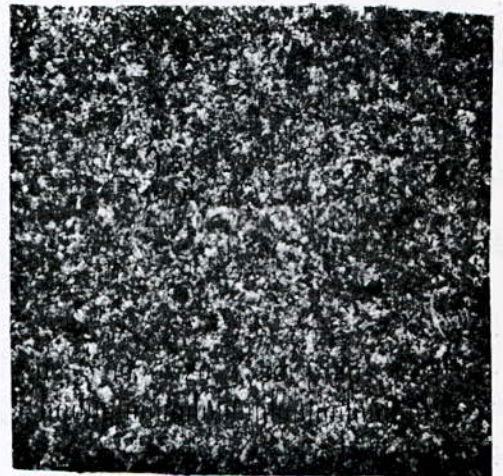
trempe à 800°C à l'eau
structure martensitique



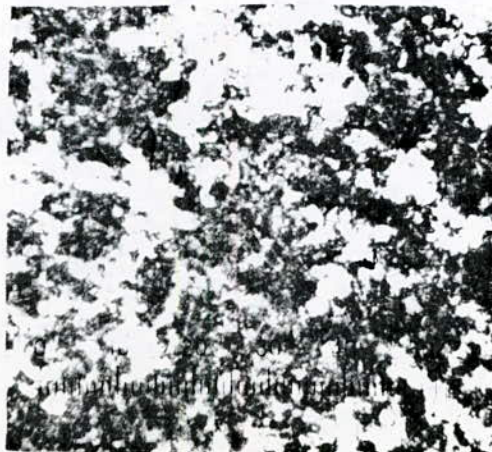
trempe à 825°C à l'eau
structure martensitique



trempe à 850°C à l'eau
structure martensitique.



trempe à 875°C à l'eau
structure martensitique.



trempe à 825°C
à l'huile
structure
martensitique-
Troostitique.

Chapitre VI

Resultats experimentaux.

I- Resultats des essais de dureté

les échantillons utilisés en acier XC48 ; pour les mesures de dureté sont des petits cylindres de 20 mm de diamètre et de 10 mm de hauteur.

I-1- Dureté en fonction de la température de chauffage de trempe à l'eau. les échantillons sont chauffés à de différentes températures, puis trempés à l'eau, alors pour chaque échantillon, on relève la dureté Brinell et Rockwell ainsi que la résistance mécanique R_m ; en prime en daN/mm^2 ce qui nous permettra de mettre en évidence l'influence de la température de chauffage sur la dureté de l'acier XC48, lors de la trempe.

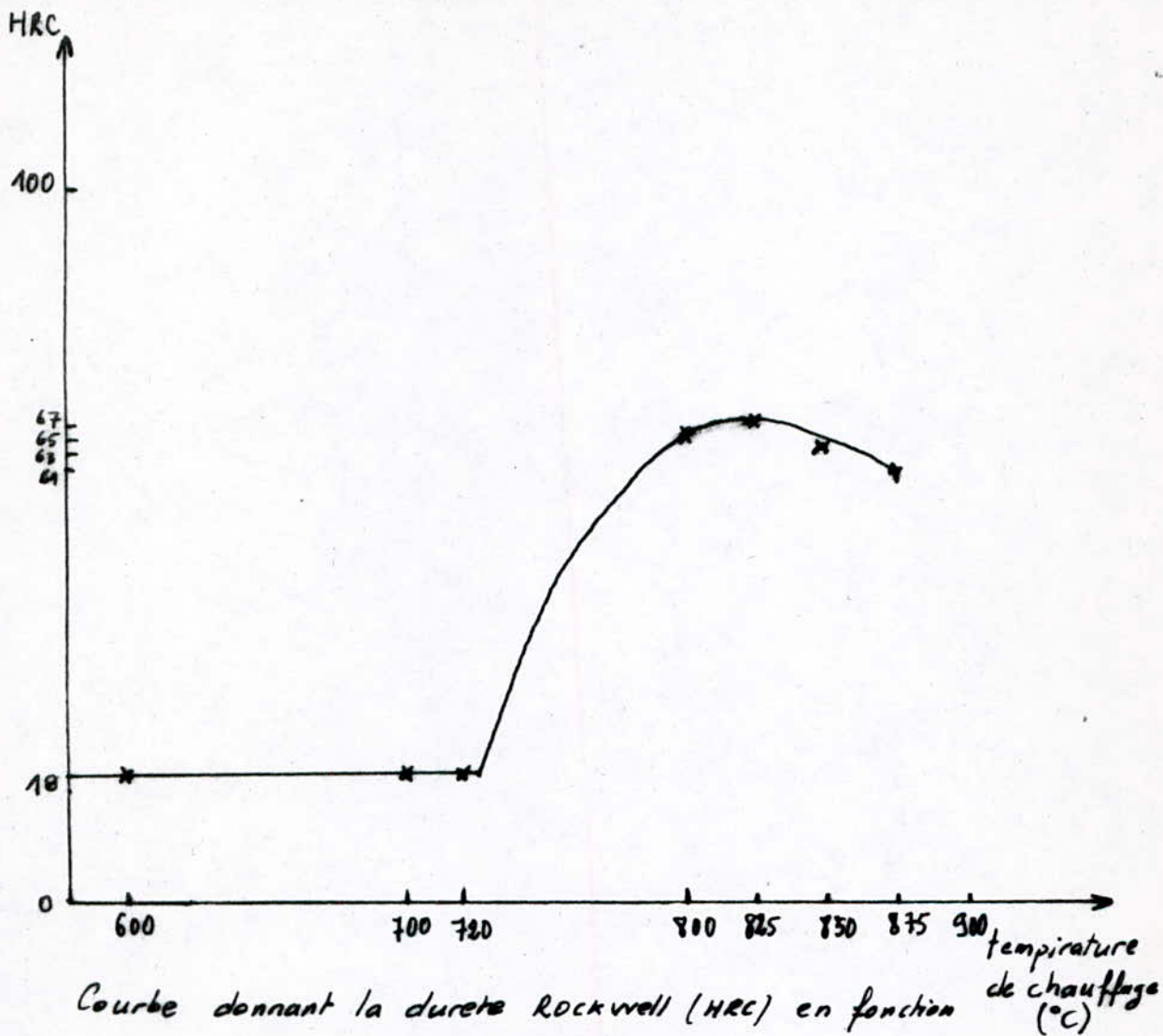
Tableau de valeurs

Température de trempe	empreinte sous $H \text{ d } 10 / 3000 \text{ kg/f}$	Dureté HB	HRC
600	42/10	207	18
720	42/10	207	18
800	23,5/10	682	65
825	23/10	713	67
850	24/10	653	63
875	24,5/10	627	61

Interpretation de la courbe: HRC en fonction de la température de chauffage.

d'après la courbe obtenue de HRC en fonction de la température de chauffage, on a pour une t_p de chauffage inférieur à A_{c1} , la dureté de l'acier ne change pas parce qu'il n'y a pas de transformation de phases, par contre en élevant la t_p jusqu'à $B_{s2}^{\circ}C$ on a l'augmentation de la dureté qui atteint la valeur de 67, en augmentant encore la t_p au-dessus de $B_{s2}^{\circ}C$, on a la diminution de la dureté ceci est due au grossissement des grains d'austénite, cette courbe nous permet de déterminer la t_p de chauffage optimale pour laquelle la dureté de l'acier XC48 est maximum,

Cette température est à peu près égale à 825°C , pour une dureté Rockwell de 67.



Courbe donnant la dureté Rockwell (HRC) en fonction de la température de chauffage.

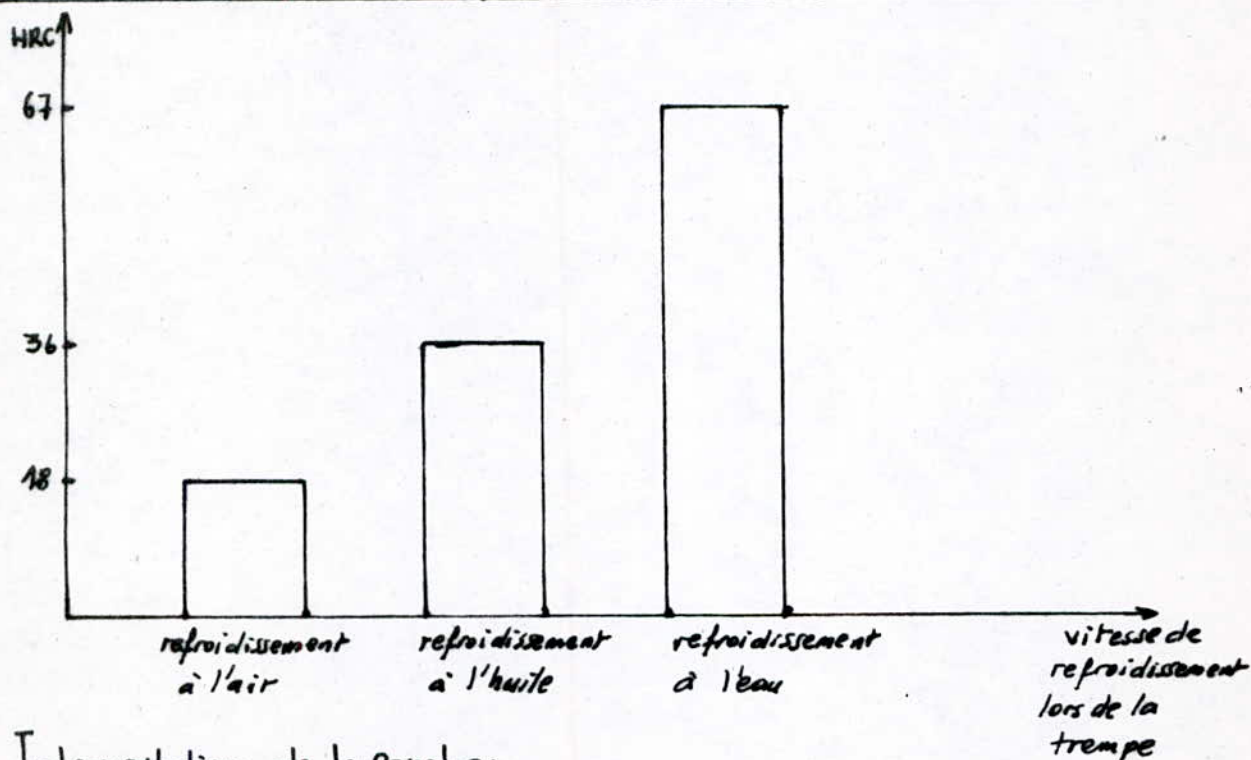
I-2- Dureté en fonction de la vitesse de refroidissement:

Les échantillons de l'acier XC48, sont chauffés à la température pour laquelle la dureté est maximum, c'est à dire à la température 825°C , après ils sont refroidis à des vitesses différentes, pour cela on utilise différents milieux de refroidissement, l'eau, l'huile, l'air, on a la vitesse de refroidissement dans l'eau est plus grande que celle dans l'huile, et dans l'huile plus grande qu'en air, après cela on mesurera les duretés correspondantes

à chaque vitesse de refroidissement, ce qui nous permettra de voir l'influence de la vitesse de refroidissement, sur la dureté de l'acier XC48 lors de la trempe.

Tableau de valeurs:

	Trempe à 825°C à l'eau.	Trempe à 825°C à l'huile	Trempe à 825°C à l'air
empreintes sous H 110/300	23/10	33,5/10	42/10
Dureté HB	713	332	207
HRC	67	36	18



Interpretation de la courbe:

La courbe HRC en fonction de la vitesse de refroidissement lors de la trempe, nous permet de voir l'influence de la vitesse de refroidissement sur la dureté. On peut conclure que plus la vitesse de refroidissement augmente, plus la dureté est importante; donc pour avoir l'acier XC48, avec la grande

dureté lors de la trempe, on doit prendre une température de chauffage égale à 825°C et le refroidissement doit se faire à l'eau.

I-3- Dureté en fonction de la température de revenu :

L'opération consiste à effectuer une trempe sur les échantillons de l'acier XC48, à la température de chauffage de 825°C suivi d'un refroidissement à l'eau pour une partie des échantillons, pour l'autre partie, se fait à l'huile, après cela on prendra les échantillons sur lesquels on effectuera le revenu à des températures de chauffage appartenant à l'intervalle $[200 \div 600]^{\circ}\text{C}$, ce qui nous permettra de mettre en évidence l'influence de la température de chauffage sur la dureté de l'acier XC48 lors du revenu, pour qui le refroidissement se fait à l'air.

Tableau de valeurs :

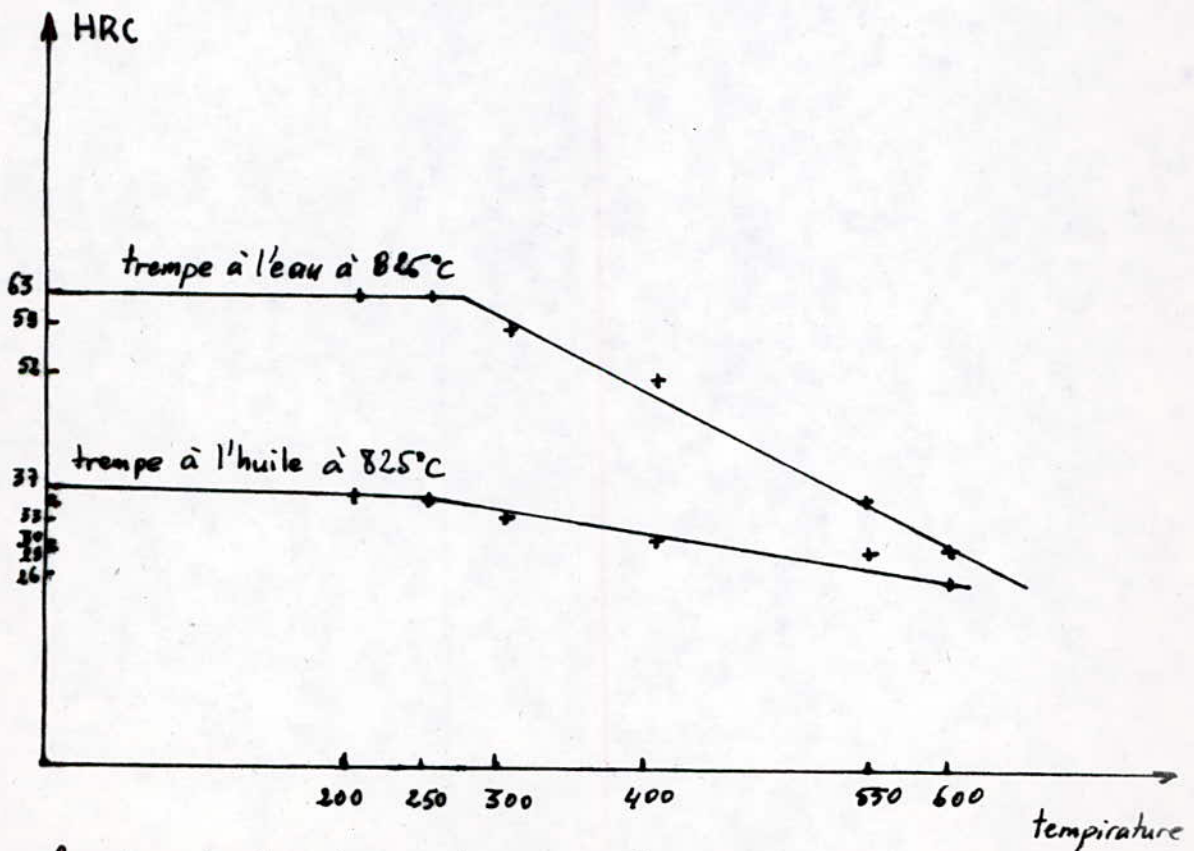
Donnant HRC en fonction de la température de chauffage lors du revenu.
(pour échantillon trempé à l'eau à 825°C).

Température du revenu	empreinte sous $\frac{40}{10} \text{ } 3000 \text{ kgf}$	Dureté HB	HRC
200	24 / 10	652	63
250	24 / 10	652	63
300	25 / 10	600	59
400	27 / 10	512	52
550	33 / 10	340	39
600	36 / 10	286	30

Tableau de valeurs:

donnant HRC en fonction de la température de chauffage lors du revenu:
(Pour échantillons trempés à 825°C à l'huile).

température de revenu	empreinte sous H ₁₀ /3000 kgf	Dureté HB	HRC
200	33,5/10	332	36
250	34/10	321	35
300	35/10	302	33
400	36,0/10	286	30
550	36,5/10	277	29
600	38/10	255	26



Courbe de la dureté (HRC) en fonction de la température de chauffage lors du revenu.

Interpretation de la courbe:

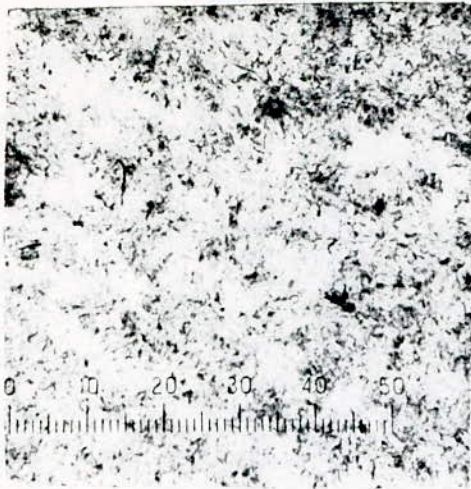
Lors du revenu à basse température, c'est à dire que la température de chauffage inférieure à 300°C ; on a la dureté de l'échantillon, qui reste pratiquement constante, aussi bien pour les échantillons qui ont subi une trempe à l'eau que pour les échantillons ayant subi une trempe à l'huile auparavant, en augmentant la température de revenu jusqu'à 600°C , on remarque qu'on a une diminution importante de la dureté pour les échantillons trempés à l'eau, alors pour ceux qui sont trempés à l'huile; la diminution de la dureté n'est pas très importante; Ceci est dû à ce que la structure de l'échantillon trempé à l'eau est plus déséquilibré que celle de l'échantillon trempé à l'huile; donc on peut conclure que l'opération du revenu à basse température n'a aucune influence sur la dureté; par contre lors du revenu à haute température, elle diminue la valeur de la dureté.

II RESULTATS des essais de resilience:

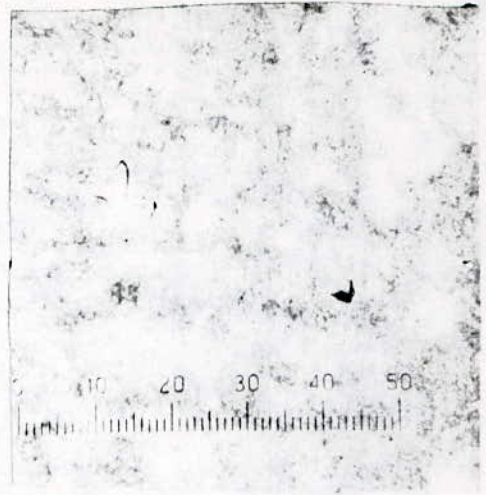
Pour les essais de resilience, on a fabriqué 3 échantillons, pour cela on déterminera la resilience K_m ; de l'acier XC48 à l'état initial c'est à dire normalisé, et après avoir effectué une trempe à 825°C avec refroidissement à l'eau, et finalement la valeur de K_m pour le revenu à 550°C ; l'échantillon ayant subi une trempe à 825°C à l'eau auparavant, ce qui nous permettra de mettre en évidence l'influence de la trempe et le revenu sur la valeur de la resilience de l'acier XC48.

Tableau des valeurs:

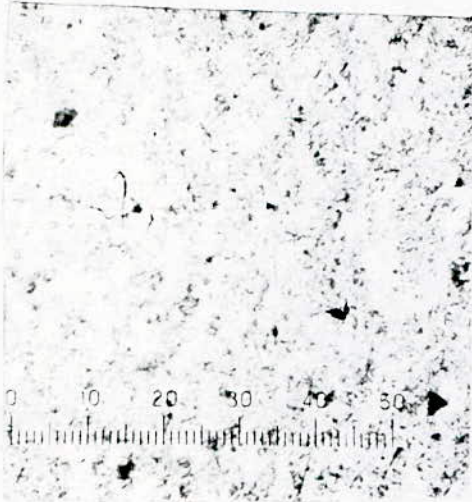
	valeur de l'angle de déviation en $^{\circ}$	Travail absorbé T [dJ]	K_m [dJ/cm ²]	$K_m = \frac{T}{S}$
ϕ initial	140°	2,67	$2,67 \cdot 10^{-2}$	T: travail absorbé S: section.
Trempe à 825°C dans l'eau.	145°	1,85	$1,85 \cdot 10^{-2}$	
revenu à 550°C	109°	9,47	$9,47 \cdot 10^{-2}$	



revenu à 200°C
Martensite de revenu



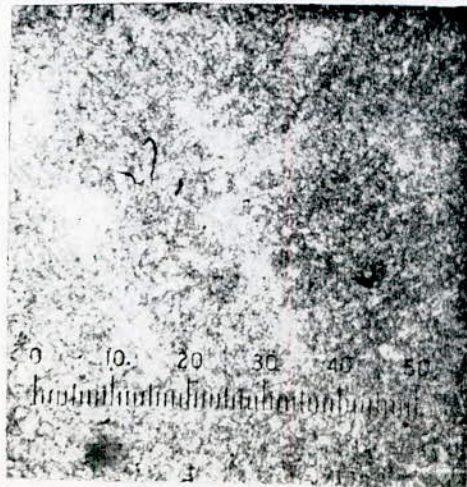
revenu à 300°C
Martensite + troostite.



revenu à 400°C
structure troostitique



Structure sorbitique
revenu à 550°C.



revenu à 600°C
structure sorbitique.

CONCLUSION.

Ce qui a été important dans mon étude, c'est le contact avec l'industrie, l'aide qui m'a été fournie par toutes les personnes que j'ai pu solliciter, m'est très précieuse aussi bien pour ma future carrière industrielle, que pour mon sujet de mémoire de fin d'étude qui m'a permis d'élargir mes connaissances dans le domaine de la métallurgie

les conclusions à tirer des résultats obtenus lors des essais de l'acier XC48 sont les suivantes : la température de chauffage qui permet d'avoir la dureté la plus élevée lors de la trempe est de l'ordre de 825°C , et le milieu de refroidissement qui permet aussi d'avoir la dureté la plus élevée est l'eau, on a pris ces deux facteurs pour avoir une dureté plus ou moins appréciable pour l'amélioration de cet acier. Ainsi la dureté la plus élevée enregistrée lors de la trempe est 67 HRC, pour ce qui est du revenu, on a vu que plus on augmente la température de chauffage plus la dureté diminue, on remarque que la diminution est plus importante pour les pièces ayant subi une trempe à l'eau à 825°C , que celle trempées à l'huile à 825°C , ceci est dû à ce que les pièces trempées à l'eau, sont dans un état plus déséquilibré que celle trempées à l'huile ; sachant que l'amélioration est constituée de trempe et de revenu à haute température, la dureté correspondante est environ de 37 HRC, pour une trempe à l'eau à 825°C suivit d'un revenu à 550°C .

ainsi on a réussi à obtenir une résistance à l'usure plus ou moins importante, qui est plus élevée que celle de l'état normalisé qui est égale à 18 HRC; Pour ce qui est des essais de résilience, Pour l'amélioration on a $K_H = 9,47 \cdot 10^2 \left[\frac{dJ}{mm^2} \right]$ qui est important par rapport à la valeur de la résilience de l'état normalisé qui est égale à $2,67 \cdot 10^{-2} [dJ/mm^2]$. Pour ce qui est des essais de traction, on a la limite d'élasticité $35,5 [daN/mm^2]$ de l'état amélioré, qui est inférieur à celle de l'état normalisé $43,8 [daN/mm^2]$; la résistance à la rupture $73,6 [daN/mm^2]$ de l'état amélioré est importante par rapport à celle de l'état normalisé $68,1 [daN/mm^2]$ et finalement l'allongement de l'état amélioré est plus faible $11,25\%$ que celui de l'état normalisé $18,7\%$; Cette comparaison entre l'état normalisé et l'état amélioré de l'acier XC48, nous permet de choisir le traitement thermique à appliquer aux pièces de constructions et cela suivant leur condition de travail et les exigences de ces conditions.

en conclusion, l'amélioration de l'acier XC48 effectué à une trempe de $825^\circ C$ à l'eau suivit d'un revenu à $550^\circ C$, nous permet d'avoir un bon ensemble des propriétés mécaniques, surtout la résistance à l'usure à laquelle on a obtenu un résultat relativement bon. Pour les essais de fatigue sur machine à flexion rotative, on a préparé des éprouvettes pour cet essai, mais vu l'indisponibilité de cette machine, qu'il a fallu réparer, les essais n'ont pu être effectués.

en conclusion, on propose qu'il est souhaitable de faire des essais sur cette machine pour l'acier XC48, et d'étudier l'influence des éléments d'addition sur les propriétés mécaniques et la structure de l'acier XC48.

BIBLIOGRAPHIE

1. G. de Smet : La pratique des traitements thermiques des métaux industriels (1979) Dunod.
2. A. roos et B. milet : Précis de Métallurgie appliquée (1982) TEC et DOC.
3. I. LakhTine : Metallographie et traitements thermiques des métaux (1982) Mir-Moscou.
4. C. Chaussin : Manuel pratique des aciers et leurs traitements thermiques (1981) Dunod.
5. C. Chaussin : G. HILLY : Métallurgie t₁ (1982) Dunod.

