

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

2FD

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة - BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

INFLUENCE DU TEMPS DE
MAINTIEN SUR LA TREMPE
ET LE REVENU DES ACIERS
A OUTILS

Proposé par :
LA B.C.A

Etudié par :
Mr. A. RANEM
Mr. M. KEDDAM

Dirigé par :
Mr. N. MESRATI

R E M E R C I E M E N T S

Au terme de cette étude, nous tenons à exprimer nos plus vives remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé à accomplir ce travail dans de bonnes conditions :

= Notre promoteur, Mr MESRATI, pour les multiples conseils qui nous à prodigué, aussi dans la bonne ambiance dans laquelle a été accompli ce travail .

= Melle KERBOUB, Mr METSAHA et Mr SEBIHI, ingénieurs de la B.C.A pour leur précieuse aide et fructueuses discussions .

= Capitaine GHRIBI, Lieutenant IRKI, Mr kerbache et Mr Bekka pour leur très fructueuse collaboration, au niveau de la B.C.L de Beni-Mered .

= Mr BELADJET, chef de service d'administration de l'E.M.B .

= Mr BOUDAUD, chef de service de sécurité (SNVI), pour sa bonne compréhension .

= Mr CHABANE, chef de service de l'A.R.M. (SNVI) .

= Mr OUNANE, chef de service, Mr RAMI et Mr MOUSSA responsable au niveau du C.F.M. (SNVI) .

= Mr AMRAOUI, chef de service, Mr SIAM responsable au niveau du C.V.I. (SNVI) .

= Mr SALEM, chef de service à EL-HADJAR .

= A tous les enseignants du département métallurgie pour leur communication d'un grand intérêt qui a fait la valeur de cet enseignement .

= A tous les techniciens de, la B.C.A, la B.C.L, l'E.M.B, SNVI (ARM, CFM, CVI), E.N.P (Atelier mécanique) et à EL-HADJAR, qui ont apporté leur concours aussi modeste qu'il soit .

= A tous les amis et proches qui nous ont soutenu durant ce travail .

A. RANEM

M. KEDDAM

NOMENCLATURE

- t : temps de maintien du traitement (mn).
 T : Température de traitement (°C).
 tp(t1):trempe(t1):trempe après une durée d'austénitisation t1=10mn
 tp(t2):trempe(t2): ' t2=20mn
 tp(t3):trempe(t3): t3=30mn
 rl(t1):Premier revenu avec une durée du palier de revenu t1=30mn
 rl(t2): t2=60mn
 rl(t3): t3=90mn
 r2(t1):Deuxième revenu avec une durée du palier de: t1=30mn
 r2(t2): : t2=60mn
 r2(t3): : t3=90mn
 (Bib:i):Reference de la bibliographie numero .i.
 Y :Fraction massique de l'austénite transformée
 Ms :Température de debut de la transformation martensitique
 Mf :Température de fin de la transformation martensitique
 Mt :Martensite de trempe.
 Mr :Martensite de revenu.
 P :Parametre d'austénitisation
 Vc :Vitesse critique de trempe martensitique.
 Q :Energie d'activation apparente pour l'austénitisation.
 Or :Température de revenu.
 tr :Durée de maintien du revenu.
 $\frac{\Delta V}{V}$:Variation relative de volume.
 Pr :Parametre d'équivalence du revenu.
 T1,T2:Température de travail(traitement).
 t1,t2:Durée de travail (traitement).
 tv :Temps de maintien du palier avant austénitisation.
 tp : pendant l'austénitisation.

SOMMAIRE

Nomenclature

INTRODUCTION

1

CHAPITRE I : ETUDE DE LA TREMPE

3

1	Etude globale du materiau propose	3
1-1	Classification des aciers choisis	3
1-2	Choix du matériau	3
1-3	Proprietés générales du matériau	5
1-4	Elements d'alliage des aciers choisis	6
2	Austénitisation.....	8
2-1	La transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ au cours du chauffage	8
2-2	Equivalence entre la température et le temps de maintien..	8
3	La trempe	9
3-1	Choix des conditions de trempe	9
3-2	La trempe martensitique	9
3-3	Description de la transformation martensitique	10
3-4	Exploitation des courbes TRC	10
3-5	Lois de refroidissement au cours de la trempe	11
3-6	Influence de la trempe sur les proprietes mécaniques..	13

CHAPITRE II : ETUDE DU REVENU

14

1	Revenu des aciers à outils	14
2	Differents types du revenu	14
2-1	Cas particuliers du revenu	16
2-1.1	Double revenu	16
2-1.2	Revenu de durcissement des solutions solides sursaturées	17
3	Description qualitative des phenomenes se produisant au cours du revenu	17
3-1	Revenu de la martensite	17
3-2	Revenu des structures contenant de l'austénite résiduelle.	20
3-3	Revenu des solution solides sursaturées en éléments d'alliage	22
4	Action des éléments d'alliage sur le revenu	23

5	Influence du revenu sur les propriétés mécaniques.....	24
6	Fragilité du revenu des aciers	25
6-1	Le premier type de fragilité	26
6-2	Le deuxième type de fragilité	26
7	Variations dimensionnelles au cours du revenu	27
8	Stabilité dimensionnelle des aciers	27
9	Equivalence entre la température et la durée de revenu..	28

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III : PRATIQUE DU CYCLE THERMIQUE 29

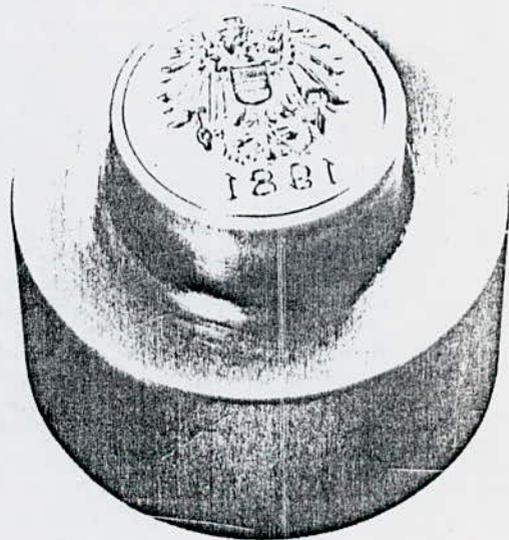
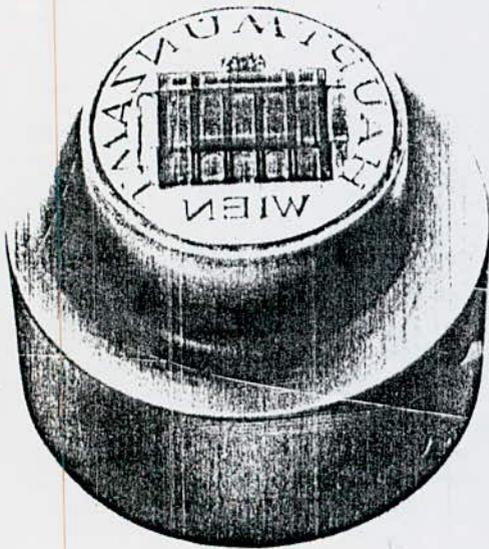
1	Traitement thermique préliminaire	29
2	Trempe	29
2-1	Importance du palier avant austénitisation.....	29
2-2	Détermination des paramètres d'austénitisation.....	30
2-3	Estimation de la trempabilité	30
3	Revenu	30

CHAPITRE IV / MESURE ET CONTROLE DES PIECES 33

A // METHODES D'ESSAIS MECANQUES :

1	Essai de dureté	33
1-1	Essai au cone de diamant (Rockwell C)	33
1-2	Préparation des échantillons	34
1-3	Exploitation des résultats	34
2	Mesure des duretés HRC	35
2-1	Représentation graphique des résultats de dureté	38
3	Essai de traction	47
3-1	Forme de l'éprouvette	47
3-2	Diagramme conventionnel	48
4	Présentation des résultats pratiques de traction	48
4-1	Résultats à exploiter sur les diagrammes	51
5	Relation entre les résultats de dureté et de traction.	58
6	Essai de résilience	60

6-1	Essai charpy	61
7	Valeurs des résiliences(KCU) avant et apres les traitements	62
B //	<u>METHODES D'EXAMÉNS METALLOGRAPHIQUE :</u>	65
1	Examen macroscopique	65
1-1	Préparation des échantillons	65
1-2	Structure macrographique	65
2	Examen par microscopie optique	69
2-1	Préparation de la surface d'examen	69
2-2	Structure micrographique	69
	<u>CONCLUSION</u>	83
	Recomendation pour l'utilisation des coins pour la frappe monétaire.	86
	ANNEXES : A,B,C et D. Bibliographie.	



INTRODUCTION :

Les aciers à outils sont destinés au travail à froid, leurs applications sont diverses, telles que coins, poinçons, cisailles, etc...

Dans l'industrie monétaire, les coins destinés à la frappe des pièces monétaires sont fabriqués à base d'aciers à outils.

Dans ces conditions, les parties du coin au contact de la pièce monétaire à frapper sont soumises à des sollicitations et à des efforts d'enfoncement considérables ainsi qu'à des abrasions. C'est pour résister à de telles conditions de travail, que ces aciers contiennent une certaine teneur en éléments d'alliage, qui alliée à une autre teneur en carbone, forme des carbures très durs conférant à l'acier une dureté ainsi qu'une résistance à l'abrasion, élevées.

En outre, ces aciers doivent avoir une certaine ductilité à coeur afin de résister aux efforts répétés d'enfoncement.

La structure de l'acier, la composition des constituants subissent des modifications au cours des traitements thermiques. Ces facteurs exercent une influence sur les propriétés mécaniques.

Le but de notre travail est l'étude des performances de deux nuances d'aciers proposées par la B.C.A qui sont respectivement 55WC20 et 50NC13 .

Dans un premier temps, nous avons présenté un rappel succinct sur la famille d'aciers considérés, leur classification

et une étude consacrée au matériau utilisé. Ensuite, nous nous sommes intéressés aux divers traitements thermiques subis par ces deux nuances d'aciers en particulier la trempe et le double revenu. Nous avons abordé le dernier chapitre en présentant les résultats obtenus lors d'essais mécaniques.

CHAPITRE I : ETUDE DE LA TREMPE

1 -ETUDE GLOBALE DU MATERIAU PROPOSE :

1-1.CLASSIFICATION DES ACIERS CHOISIS : (NF.A35-590)

Les deux nuances d'aciers étudiées appartiennent à la classe d'aciers à outils alliés travaillant à froid.

Le critère qui a été retenu pour la classification de cette famille d'aciers est celui de la résistance à l'adoucissement en fonction de la température.

On distingue deux classes d'aciers appartenant à la famille d'aciers à outils travaillant à froid pour des températures n'excédant pas 150°C, qui sont caractérisés par une grande dureté à froid et une faible dureté à chaud qui sont :

__Les aciers à outils au carbone (Classe 1).

__Les aciers à outils alliés (Classe 2).

Les aciers de nuance 55WC20 et 50NC13 appartiennent donc à la classe(2).

Tandis que les aciers à outils travaillant à chaud pour des températures excédant 300°C sont classés dans la classe 3, ils sont caractérisés par de hauts niveaux de dureté à chaud.

Enfin, la quatrième classe comprend les aciers rapides qui sont caractérisés par une dureté très élevée à l'ambiante et une très bonne dureté à chaud.

1-2.CHOIX DU MATERIAU :

La qualité du service rendu par le coin destiné à la frappe monétaire, qui se chiffre par la durée de vie, dépend

essentiellement des conditions en service. Par conséquent, le choix de l'acier à outils et de son traitement thermique influence fortement sur sa durée de vie.

Pour obtenir les propriétés mécaniques désirées, il faut donc optimiser les paramètres du cycle de traitement thermique.

Les deux nuances d'aciers choisies pour notre étude appartiennent à la classe d'aciers alliés à outils travaillant à froid. Leur choix a été fait selon un critère d'emploi bien défini, à savoir de meilleures propriétés mécaniques dans le but de prolonger la durée de vie du coin et d'augmenter sa limite d'endurance puisqu'il est soumis aux efforts cycliques, de même pour garder sa forme lors de son utilisation.

Lors du travail, la partie active du coin subit des sollicitations thermiques et mécaniques qui sont à l'origine des phénomènes de dégradation de sa partie active. En effet, il semble que la température a une moindre influence sur la durée de vie du coin car ces aciers sont usités à l'ambiante.

Pour préserver le coin des dégradations de sa surface active, il faut avoir une bonne tenue à l'usure à la périphérie de sa partie active, qui est assurée grâce à la présence de carbures alliés. Les deux nuances d'aciers choisies présentent une supériorité par rapport à d'autres classes d'aciers à outils pour maintes raisons qui sont une grande trempabilité et une faible aptitude à la formation des tapures lors de la trempe ainsi qu'une diminution d'hétérogénéité de trempe et une meilleure résilience.

1-3. PROPRIETES GENERALES DU MATERIAU :

Le coin est soumis à des sollicitations mécaniques au cours de l'utilisation en service et les propriétés requises pour de tels emplois sont les suivantes :

- La dureté.
- La tenacité.
- La résistance à l'usure.
- Une meilleure résistance au choc mécanique.

Le coin doit posséder aussi un meilleur facteur de résistance car il travaille dans des conditions de charges cycliques symétriques alternées. C'est pour résister à de telles conditions qu'il doit avoir un coeur résilient et des contraintes résiduelles de compression à la périphérie de sa partie active pour une meilleure résistance à la fatigue mécanique. C'est pour cela que ces propriétés sont autant recherchées.

Les deux nuances d'aciers 50NC13 et 55WC20 selon la norme AFNOR admettent pour composition chimique exacte les teneurs en éléments d'alliage données par le tableau 1, elles contiennent en plus du chrome d'autres éléments tels que :W,Ni, V,Mo,etc... Comme particularité, la nuance d'acier 50NC13 est une nuance offrant un maximum de tenacité et trempabilité tandis que la nuance d'acier 55WC20 est une nuance à haute résistance à l'usure.(Bib:8)

Nuance d'acier AFNOR	Composition chimique					
	C	Cr	Mo	Ni	V	W
50NC13	0,52	1,0	0,2	3,0	/	/
55WC20	0,63	1,1	/	/	0,2	2,0

Tableau 1: Analyse type de la composition chimique des aciers

1-4. ELEMENTS D'ALLIAGE DES ACIERS CHOISIS :

1-4.1. ROLES DES ELEMENTS D'ALLIAGE :

Chaque élément d'alliage présent dans nos aciers à outils a un rôle bien spécifique et une influence directe sur les propriétés mécaniques. Le carbone étant un élément durcissant confère de hauts niveaux de dureté, tandis que le chrome, élément principal dans les aciers à outils, forme des carbures de chrome qui renforcent la tenue à l'usure.

D'autre part, le nickel améliore la trempabilité et la résilience à coeur. Quant au molybdène présent dans l'acier 50NC13, il supprime la sensibilité au chauffage prolongé et forme des carbures résistants à l'usure.

La présence du tungstène dans l'acier 55WC20 lui confère des carbures de haute dureté que ceux du molybdène car il a un grand pouvoir carburigène et il diminue également la tendance au grossissement des grains par surchauffe.

Ces éléments d'alliage modifient la cinétique des transformations, ralentissent les diffusions et par suite les transformations. D'autre part, la présence d'éléments carburigènes tels Cr, Mo, W, V limite la grosseur du grain austénitique et assurent donc une marge de température de trempe importante.

Rappelons que la grosseur du grain austénitique augmente la trempabilité mais amène une diminution de la résilience, il faut donc choisir judicieusement les températures d'austénitisation .

1-4.2. INFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGE SUR LES TRANSFORMATIONS
POLYMORPHES DU FER ET DE LA PHASE CARBURE :

Tous les éléments d'alliage présents dans nos aciers à outils à l'exception du carbone forment des solutions solides de substitution. L'action exercée par ces éléments sur les variétés allotropiques du fer (Bib:4) permet de les classer en deux groupes :

-- Eléments alphagènes : tels que Cr, Mo, W, V, qui réduisent le domaine γ et élèvent les points de transformation au cours du chauffage .

-- Eléments gammagène : tels que Ni, réduisent le domaine α , abaissent le point A_3 ET élèvent le point de transformation A_4 .

Quant aux éléments carburigènes, ils sont classés en fonction de l'augmentation de leur affinité pour le carbone (Bib:3) et la stabilité des phases de carbures formées dans l'ordre croissant .

Fe → Mn → Mo → W → Nb → V → Zr → Ti

quand la teneur en éléments carburigènes est faible, ils se dissolvent dans la cémentite en substituant dans cette dernière les atomes du fer .

Les éléments fortement carburigènes tel le tungstène ne se dissolvent pratiquement pas dans la cémentite et forment des carbures correspondants qui peuvent être classés en deux groupes :

-- Le premier groupe est celui des carbures du type :

$M_3C, M_7C_3, M_{23}C_6$ et M_6C . (M: désigne l'élément d'alliage).

-- Le deuxième groupe est celui des carbures de type : MC

2 -L'AUSTENITISATION :

2-1.LA TRANSFORMATION $\alpha \rightarrow \gamma$ AU COURS DU CHAUFFAGE :

L'austénitisation est l'opération qui conduit à la formation d'austénite par chauffage de l'acier, depuis la température ambiante où il se trouve à l'état ferritique, à une température du domaine γ puis à effectuer un maintien à cette température pour permettre la transformation complète en austénite. Le maintien, à la température d'austénitisation a pour objet la mise en solution plus ou moins complète du carbone et d'autres éléments d'alliage ainsi qu'une homogénéisation complète de l'austénite .

2-2.EQUIVALENCE ENTRE LA TEMPERATURE ET LE TEMPS DE MAINTIEN :

Le temps et la température présentent certains effets similaires de telle sorte qu'il a pu être établi entre eux une certaine relation d'équivalence qui peut être exprimée par le paramètre P :

$$P = \left(\frac{1}{T} - \frac{4,58}{Q} \lg \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-1}$$

T = $A_{c3} + (30 \text{ à } 50^\circ)$: Température d'austénitisation en °K

Q = Energie d'activation apparente pour l'austénitisation.

τ_0 = Temps de maintien initial.

τ = Temps de maintien variable en heure.

P:représente la température du cycle équivalent pour lequel le temps de maintien est égal à l'unité de temps τ_0 .

Cette équivalence d'effet, a pu quelque fois être relié aux phénomènes fondamentaux de la diffusion sachant que l'aust-

énitisation d'un acier est régie par un phénomène de diffusion.

3 -LA TREMPE :

3-1.CHOIX DES CONDITIONS DE TREMPE :

Les conditions nécessaires pour l'obtention d'un durcissement par trempe sont :

- a) La condition métallurgique : Pour pouvoir austénitiser l'acier à outils, il faut poursuivre le chauffage jusqu'au domaine γ . Le choix de la température d'austénitisation est fonction de la teneur en éléments d'alliage, elle est d'autant plus élevée que leurs teneurs est importante.
- b) La condition thermique : Afin d'obtenir une structure entièrement martensitique, il faut choisir une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse critique de trempe.
- c) Choix du milieu de refroidissement : De nombreux facteurs interviennent dans le refroidissement d'une pièce : sa masse, sa chaleur massique, sa conductibilité thermique et sa température. Par conséquent, le choix du milieu de refroidissement repose sur celui possédant un pouvoir refroidisseur suffisant pour éviter les constituants intermédiaires en passant de l'austénite à la martensite, mais en même temps le plus faible afin d'éviter les défauts de trempe .

3-2.LA TREMPE MARTENSITIQUE :

Après chauffage jusqu'à la température d'austénitisation, l'acier à outils subit un maintien isotherme, suivi d'un refroidissement rapide qui doit être suffisant pour éviter toute

transformation de l'austénite avant le début de la transformation martensitique. Le choix de la vitesse de trempe est conditionné par la sensibilité aux défauts de trempe.

3-3. DESCRIPTION DE LA TRANSFORMATION MARTENSITIQUE :

La transformation martensitique est une transformation sans diffusion, caractérisé par sa vitesse et par les structures des produits formés. La martensite apparaît dès que l'on atteint par un refroidissement rapide, la température du début de transformation M_s , cette transformation est quasi-instantanée et à chaque température une fraction déterminée d'austénite se transforme en martensite. Cette évolution est décrite par une relation empirique de type :

$$Y = 1 - \exp(-k(M_s - \theta_i)^n) \quad , \theta_i < M_s. \text{ (Bib:10)}$$

D'autre part, plusieurs formules ont été proposées pour la détermination du point M_s qui dépend de la teneur en carbone et en éléments d'alliage.

$$M_s(^{\circ}C) = 535 - 325.\%C - 35.\%Mn - 35.\%Cr - 65.\%Mo - 20.\%Ni$$

(Formule de PAYSON-SAVAGE)

$$M_s(^{\circ}C) = 500 - 300.\%C - 33.\%Mn - 22.\%Cr - 17.\%Ni - 11(\%Si + \%Mo)$$

(Formule de GRANGE-STEWART)

DE point de vue structural, le cisaillement complexe du réseau de l'austénite engendre une nouvelle structure :
La martensite, de structure quadratique centrée.

3-4. EXPLOITATION DES COURBES TRC POUR LES TRAITEMENTS

THERMIQUES :

Dans la pratique, le problème consiste en général à déterminer le traitement thermique à réaliser afin d'obtenir telles ou telles caractéristiques. Pour cela, il suffit de déterminer sur le diagramme TRC de la nuance d'acier considérée, la courbe de refroidissement permettant d'obtenir les structures et les caractéristiques désirées. (Fig. 1 et 2).

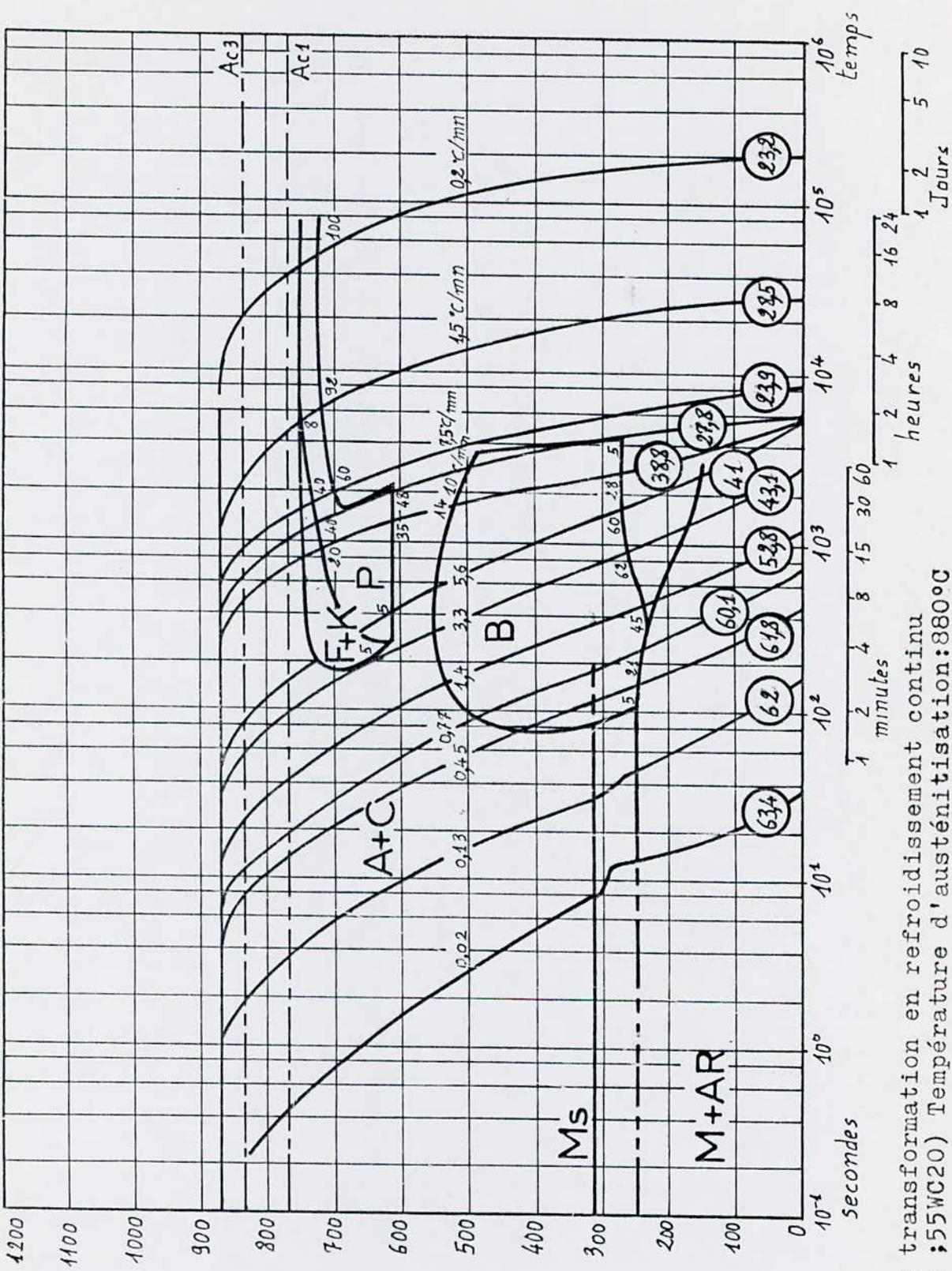
Les diagrammes TRC sont donc parfaitement adaptés pour prévoir les caractéristiques mécaniques et structurales d'un acier à l'issue de n'importe quel traitement de refroidissement.

3-5. LOIS DE REFROIDISSEMENT AU COURS DE LA TREMPE :

En exploitant les diagrammes TRC des deux nuances d'aciers étudiées, on peut faire varier les vitesses de refroidissement.

Par exemple, si la vitesse de refroidissement permet la transformation à une température inférieure au point de transformation A_{r1} , la décomposition sera de type perlitique donc pour des vitesses de refroidissement moyennes, l'austénite peut se décomposer légèrement avant d'atteindre la transformation martensitique.

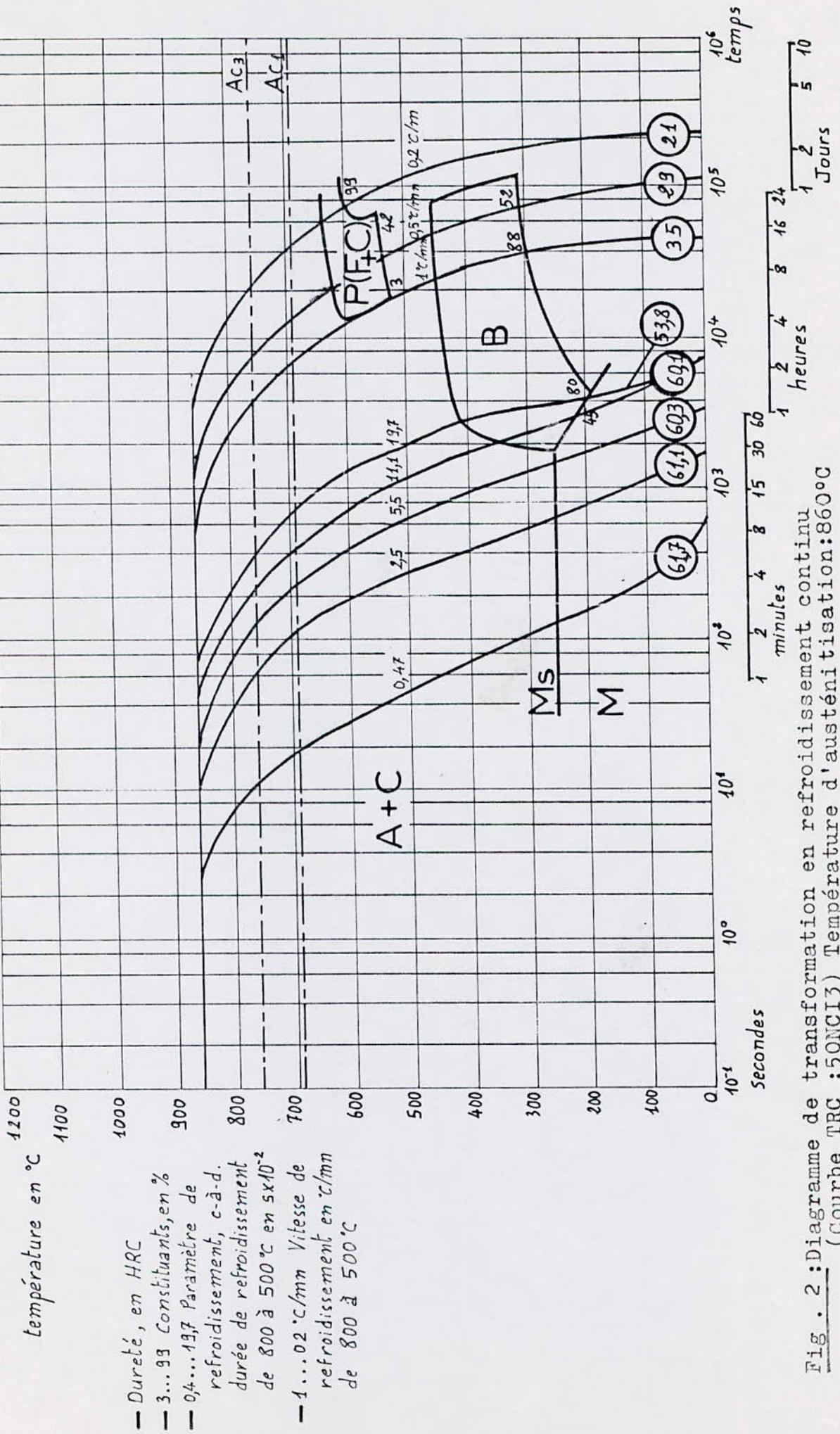
La vitesse minimale de refroidissement qui correspond à la transformation de toute l'austénite surfusionnée jusqu'au point M_s en martensite est dite vitesse critique de trempe. Quand la vitesse de refroidissement dépasse cette vitesse critique, l'austénite ne subit que la transformation martensitique. (Fig. 1 et 2). Une relation a été établie, exprimant cette vitesse critique de trempe à 700°C ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) en fonction de la composition chimique et du paramètre d'austénitisation P , la structure martensitique est obtenue si la condition suivante est



température en °C

- Dureté en HRC
- 5... 35 constituants, en %
- 0.02... 14 Paramètre de refroidissement, c-à-d. durée de refroidissement de 800 à 500°C en $s \times 10^{-2}$
- 10... 0.02 °C/min Vitesse de refroidissement en °C/min de 800 à 500°C.

Fig. 1: Diagramme de transformation en refroidissement continu (Courbe TRC ; 55WC20) Température d'austénitisation: 880°C



température en °C

- Dureté, en HRC
- 3... 99 Constituants, en %
- 04... 19,7 Paramètre de refroidissement, c-à-d. durée de refroidissement de 800 à 500 °C en $s \times 10^{-2}$
- 1... 02 °C/mm Vitesse de refroidissement en °C/mm de 800 à 500 °C

Fig. 2 : Diagramme de transformation en refroidissement continu (Courbe TRC ; 50NC13) Température d'austénitisation: 860°C

remplie : $V_r^{700^\circ} > V_c$

$$\lg(V_c) = 9,81 - (4,62.\%C + 1,05.\%Mn + 0,54.\%Ni + 0,5.\%Cr + 0,66.\%Mo + 0,00138.P)$$

$$\text{où } P = \left(\frac{1}{T} - \frac{4,581 \lg(t)}{Q} \right)^{-1}$$

t = Durée de maintien inférieur à 1(h) à la température d'austénitisation. (en heures)

3-5.1. INFLUENCE DES LOIS DE REFROIDISSEMENT SUR LES TAUX D'AUSTENITISATION :

Il a été établi qu'il existe fréquemment de l'austénite résiduelle dans les aciers à outils, ce qui influe négativement sur la stabilité dimensionnelle et la dureté de ces aciers. Pour cela, on a recours au traitement à froid dans certains cas où la transformation de l'austénite a lieu à une température inférieure au point M_f avec formation de la martensite. Pour un refroidissement rapide à partir de la température d'austénitisation jusqu'à une température inférieure au point M_s , la fraction massique de l'austénite résiduelle est donnée par la relation de Koistinen : (Bib:10).

$$Y = \exp(-0,01(M_s - \theta_i))$$

Le taux d'austénite résiduelle doit être limité afin de ne pas dégrader la limite d'endurance du coin. Ou bien, on a recours à un autre traitement; le double revenu qui permet d'éliminer une grande proportion d'austénite résiduelle.

3-5.2. INFLUENCE DES LOIS DE REFROIDISSEMENT SUR LES CONTRAINTES INTERNES :

Le refroidissement rapide crée un gradient thermique entre la surface et le coeur de la pièce qui engendre des contraintes thermiques et structurales considérables qui sont à

l'origine de l'apparition des défauts de trempe. Au début, seules les couches superficielles se transforment en martensite et exercent une traction sur le coeur de la pièce qui cède devant les efforts transmis par les couches externes.

Puis, les couches internes se transforment à leur tour, la dilatation correspondante peut exercer sur les couches superficielle plus froides un effort de traction qui peut être considérable, le centre étant en état de compression. Il est donc impératif de choisir une loi de refroidissement adéquate afin d'éviter les chocs thermiques.

3-6. INFLUENCE DE LA TREMPE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES :

La décomposition de l'auténite au cours de la trempe influe sur toutes les propriétés mécaniques en particulier la dureté et la charge à la rupture, elle permet d'assurer un haut niveau de dureté mais diminue d'autre part la résilience.

Par suite, l'acier à outils se trouve dans un état fragilisé; cette situation peut être remédiée par un traitement de revenu qui atténue cette fragilité tout en évitant le domaine de fragilité irréversible.

-----00000000-----

CHAPITRE II : ETUDE DU REVENU

1 -REVENU DES ACIERS A OUTILS ':

Le revenu est un traitement thermique effectué après durcissement par trempe en continu, il consiste en :

- Un réchauffage à une température θ_r inférieur à AC_1 .
- Un maintien de durée t_r à la température θ_r .
- Un refroidissement jusqu'à la température ambiante selon une loi programmée ou non.

Le revenu provoque l'évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physico-chimique d'équilibre (Bib:10) sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci. Le choix de θ_r et t_r permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre, il permet :

- La transformation de l'austénite résiduelle, en bainite pendant le maintien ou en martensite secondaire au cours du refroidissement, ce qui entraîne un durcissement (Bib:15)
- La relaxation des contraintes internes due à la transformation de l'austénite en martensite et les contraintes dues à la différence de refroidissement entre la surface et le coeur de la pièce, d'où diminution de la fragilité.
- Un faible adoucissement pour les aciers martensitique.

2 -DIFFERENTS TYPES DE REVENU :

Les propriétés d'un acier obtenues par revenu dépendent surtout de la température. Il existe trois types de revenu :

- a) --Le revenu à basse température: Il s'effectue avec un chauffage inférieur à 250°C . Ce revenu diminue les contraintes internes, transforme la martensite de trempe en martensite de

revenu. Il augmente la résistance et améliore quelque peu la ductilité sans altérer sensiblement la dureté, donc garde une tenue à l'usure élevée. Pourtant, dans le cas d'un coeur non ductile la pièce ne supporte pas de charges dynamiques importantes.

b) --Le revenu à température intermédiaire: Il se fait entre 350 et 500°C, il permet d'obtenir une limite d'élasticité importante, une résistance à la fatigue et à la relaxation élevées. La structure assurée par ce traitement est la troostite de revenu ou troostomartensite où la dureté de l'acier est inférieure à celle du revenu à basse température.

La température de revenu doit être choisie de façon qu'elle ne provoque pas de fragilité de revenu irréversible. Le refroidissement après revenu à 400 ou 450°C se fait à l'eau, contribue à la formation à la surface des contraintes de compression résiduelles qui élèvent la limite de fatigue.

c) --Le revenu à haute température: Il se fait entre 500 et 680°C, il donne à l'acier la structure de sorbite de revenu, et crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité, c'est un traitement appliqué aux aciers qui doivent satisfaire également aux prescriptions élevées de la limite d'élasticité, de la limite de fatigue et de la résilience (Bib:14). Toutefois, la dureté peu élevée de l'acier fait que sa tenue à l'usure est plutôt faible .

Suivant le temps de revenu, les contraintes résiduelle peuvent être supprimées presque complètement.

2-1.CAS PARTICULIERS DE REVENU :

Deux cas particuliers peuvent être mentionnés lorsque l'on décrit les revenus après trempe, il s'agit des doubles revenus et des revenus de durcissement par précipitation de composés intermétalliques.

2-1.1.DOUBLE REVENU :

On réalise un double revenu lorsque l'austénite résiduelle présentée après trempe est déstabilisée au cours du premier revenu et transformée en martensite secondaire pendant le refroidissement qui achève ce premier revenu. Pour ne pas conserver une telle martensite à l'état brut de formation, on la soumet à un revenu (le deuxième), qui peut être exécuté à une température légèrement inférieure à celle du premier revenu pour ne pas imposer un adoucissement supplémentaire à la martensite primaire (Bib:4), qui a déjà subi le premier revenu.

Le double revenu est surtout réalisé lors du traitement thermique des aciers à outils alliés (Fig.3).

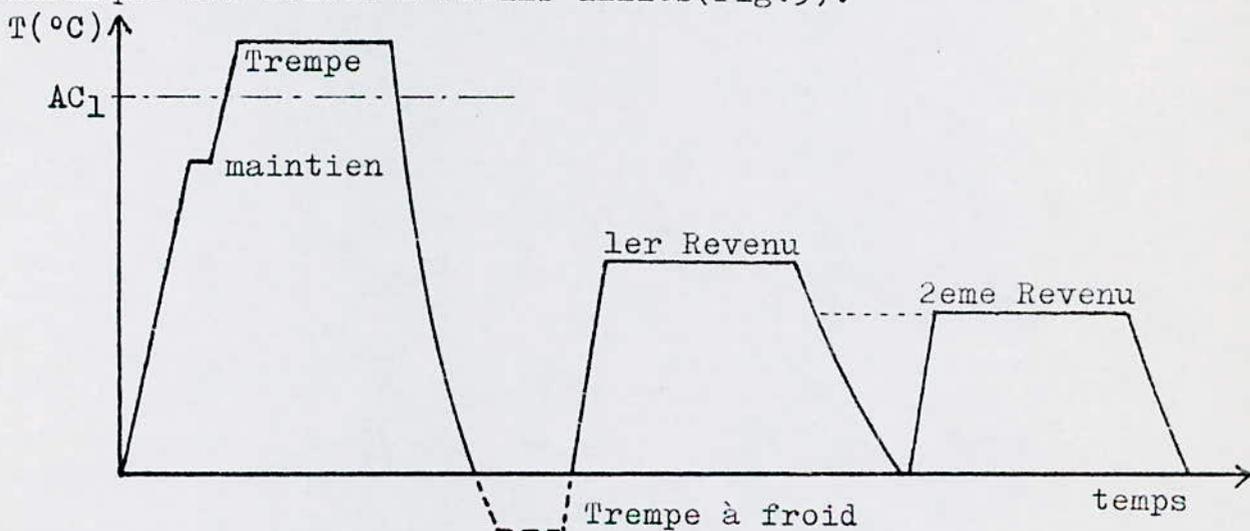


Fig.3 :Représentation schématique d'un cycle complet de traitement thermique (Trempe + deux revenus).

2-1.2. REVENU DE DURCISSEMENT DES SOLUTIONS SOLIDES SURSATUREES:

Un tel revenu a pour objet d'engendrer un durcissement par précipitation de composés intermétalliques préalablement mis en solution à haut température et maintenus en solution solide sursaturée grâce à une trempe.

Le durcissement maximal est obtenu lorsque les précipités sont fins et nombreux, donc quand le revenu est exécuté à une température relativement peu élevée. La température optimale varie avec la composition des précipités, mais son ordre de grandeur change sensiblement lorsque la précipitation a lieu dans le fer(α) ou dans le fer(γ) .

Pour les alliages ferreux à structure ferritique ou martensitique, les températures optimales se placent généralement dans l'intervalle 400-500°C alors que pour les alliages ferreux austénitiques elles sont plus élevées et de l'ordre de 650-750°C.

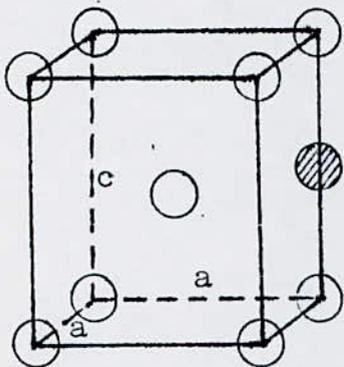
3 -DESCRIPTION QUALITATIVE DES PHENIMENES SE PRODUISANT AU COURS DU REVENU :

Selon la loi de refroidissement adoptée à la trempe, il découle plusieurs structures (Martensite, Austénite résiduelle, ...) qui nécessitent un revenu pour des raisons de structure et de propriétés mécaniques.

3-1. REVENU DE LA MARTENSITE :

On peut lorsque l'on décrit le revenu de la martensite d'un acier au carbone distinguer trois étapes dans son évolution en fonction de la température.

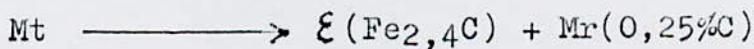
a) -PREMIER STADE : A des températures inférieures à 150°C, le carbone a tendance à quitter les sites "Z" (Fig:4) qu'il occupe préférentiellement dans la maille quadratique de martensite, il ségrège sur les défauts cristallins (dislocations), qui pour une teneur d'environ 0,25% la ségrégation s'arrête. Cette étape ne conduit pas à une maille cubique car ce déplacement n'est accompagné d'aucune précipitation décelable, c'est une étape de préprécipitation, où le déplacement du carbone entraîne une relaxation des contraintes propres à l'échelle de la maille.



Fig,4: Maille de la martensite

- atome de fer
- ◐ atome de carbone(site Z)

b) -DEUXIEME STADE : A partir de 130°C environ jusqu'à 250-300°C il y a précipitation du carbure ξ ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$). (Fig:5).



puis pour certains aciers du carbure χ de Hägg ($\text{Fe}_3\text{C}_{1,05}$) aux joints de macles de la martensite (Bib:29). Cette précipitation conduit à une contraction volumique dont l'amplitude augmente avec la teneur en carbone. Il est intéressant de remarquer que lors de la transformation martensitique entre M_s et M_f et pour des refroidissement lents, il peut y avoir un auto-revenu de la martensite avec préprécipitation et même précipitation d'une partie du carbone sous forme de carbure ξ .

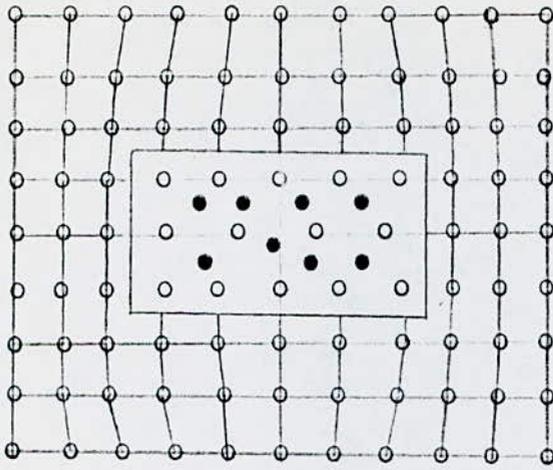


Fig.5: Naissance d'un germe de carbure ϵ par suite d'une distorsion du réseau.

- o Atome de Fer
- Atome de Carbone

c) -TROISIEME STADE : Entre 300 et 450°C, dans ce domaine de température la fin du processus de séparation du carbone dans la solution α (Martensitique) s'accompagne de rupture de la cohésion et de l'isolation des réseaux de ferrite et de carbure, cette isolation est due à la marche simultanée de la transformation de carbure qui conduit à la formation de la cémentite:



Les précipités de Fe_3C formés au cours de cette période ont la forme de plaquettes qui sont d'autant plus grosses que la température de revenu est plus élevée dans l'intervalle considéré. Il y a retour de la maille de martensite à sa forme cubique et relaxation des macro et micro-contraintes, où toute la phase de précipitation de Fe_3C est marquée par une contraction volumique.

d) -QUATRIEME STADE : Il se situe à des températures supérieures à 450°C, lorsqu'un acier allié contient des éléments carburigènes tels que Cr, Mo, V, W, Nb... une nouvelle évolution va apparaître, la plus sensible est le durcissement secondaire. En effet, à des températures supérieures à 450°C, la diffusion des atomes des

éléments carburigènes devient possible et l'affinité de ces derniers pour le carbone peut se manifester, on assiste alors à un échange du carbone entre la cémentite et les éléments carburigènes. (Bib:6)

Ainsi, la cémentite disparaît et de nouveaux carbures précipitent, cette transformation peut se faire selon deux processus différents :

--Les particules de cémentite peuvent se transformer en particules de carbure allié, la germination de ces dernières se faisant à l'interface ferrite-cémentite.

--Les particules de cémentite se redissolvent dans la matrice ferritique et les nouveaux carbures alliés germent et se développent sur de nouveaux sites (essentiellement sur les dislocations).

Le remplacement de la cémentite déjà coalescée par des précipités fins et cohérents de carbures alliés tels Mo_2C , V_4C_3 , W_2C , TiC , engendre un relèvement des caractéristiques de résistance d'autant plus important que l'acier est plus riche en carbone et en éléments carburigènes.

Il faut signaler ici l'effet limité de la précipitation du carbure de chrome Cr_7C_3 qui n'engendre pas de durcissement secondaire et ne fait que retarder légèrement l'adoucissement dû au revenu, ce fait est la conséquence des conditions de coalescence de ce carbure, qui commence dès 550°C et ne permet donc pas la formation d'un précipité fin.

3-2. REVENU DES STRUCTURES CONTENANT DE L'AUSTENITE RESIDUELLE :

L'austénite résiduelle éventuellement maintenue à l'état

métastable à l'ambiante peut retrouver au cours du revenu, des conditions permettant sa transformation. En effet, un revenu est un maintien isotherme et l'évolution de l'austénite suivra une cinétique voisine de celle décrite par les courbes TTT isothermes lors d'un austempering (Les temps d'incubation sont en général raccourcis à cause de la présence de martensite et de ses produits de transformation au revenu). (Bib:10)

--DEUX CAS SONT A ENVISAGER :

-x Le diagramme TTT présente une transformation bainitique de durée relativement courte: dans ce cas la transformation de l'austénite en bainite se produit entre 200 et 400°C environ. Cette circonstance est celle de la majorité des aciers non alliés ou faiblement alliés (Fig:5 et 6).

-x Le diagramme TTT présente un temps d'incubation très élevé pour la transformation bainitique. Cette circonstance intervient pour certaines nuances très alliées: aciers à outils à 12%Cr, ... Dans ce cas la transformation de l'austénite est reportée vers 650 à 700°C avec formation d'agrégats (F + Cem) tels que le décrit le diagramme TTT.

En outre pour cette catégorie d'aciers un phénomène particulier peut intervenir en modifiant les conditions de transformation de l'austénite résiduelle. Celle-ci se trouvant en état de sursaturation par rapport à l'équilibre (Fig:7), une précipitation de carbures peut se produire vers 500 à 600°C dans la matrice austénitique qui se trouve ainsi appauvrie en carbone. Il en résulte une élévation du points Ms.

Lors du refroidissement ultérieur l'austénite donne naissance à de la martensite dite secondaire :

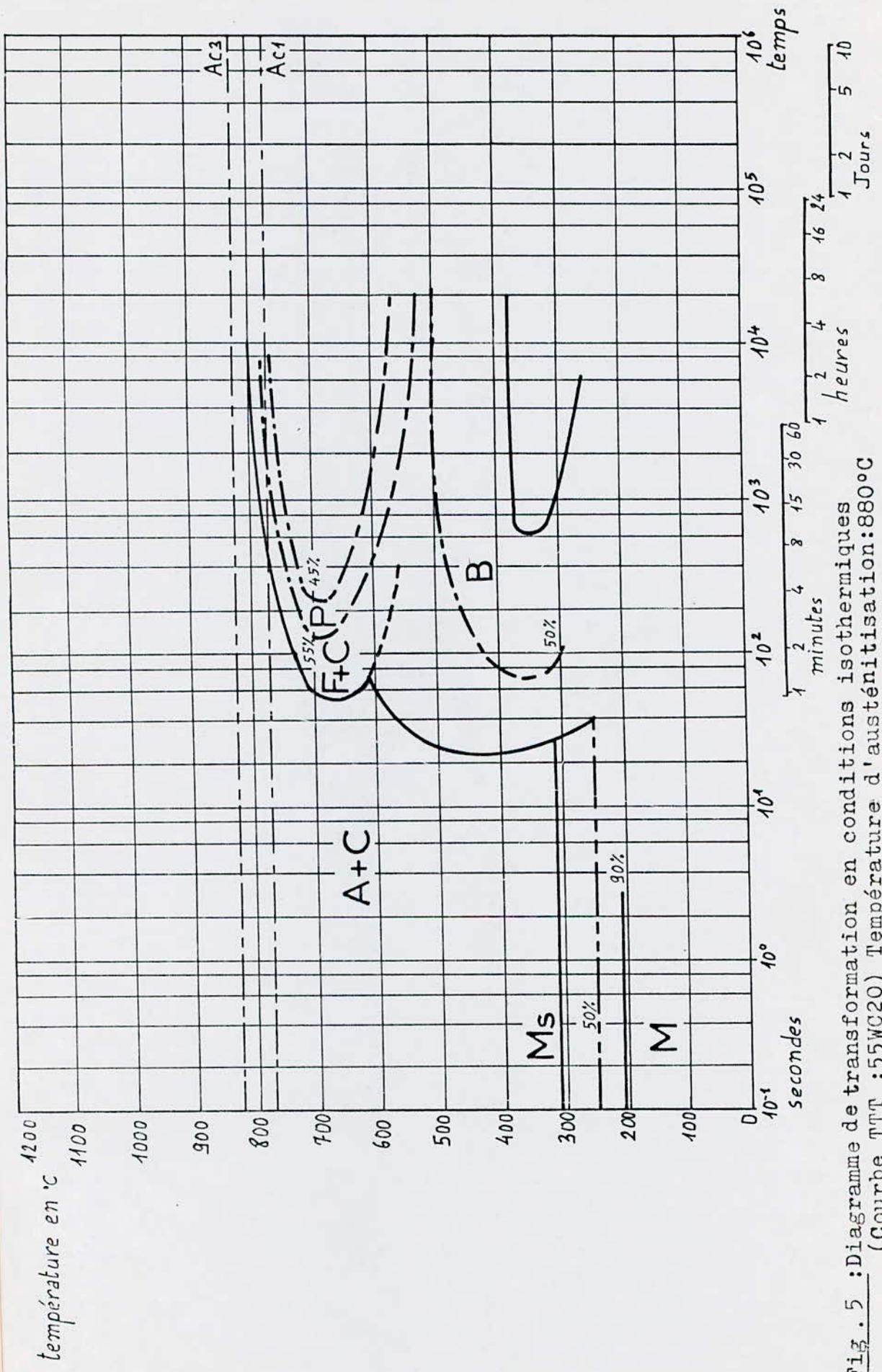


Fig. 5 : Diagramme de transformation en conditions isothermiques
 (Courbe TTT ; 55WC20) Température d'austénitisation: 880°C

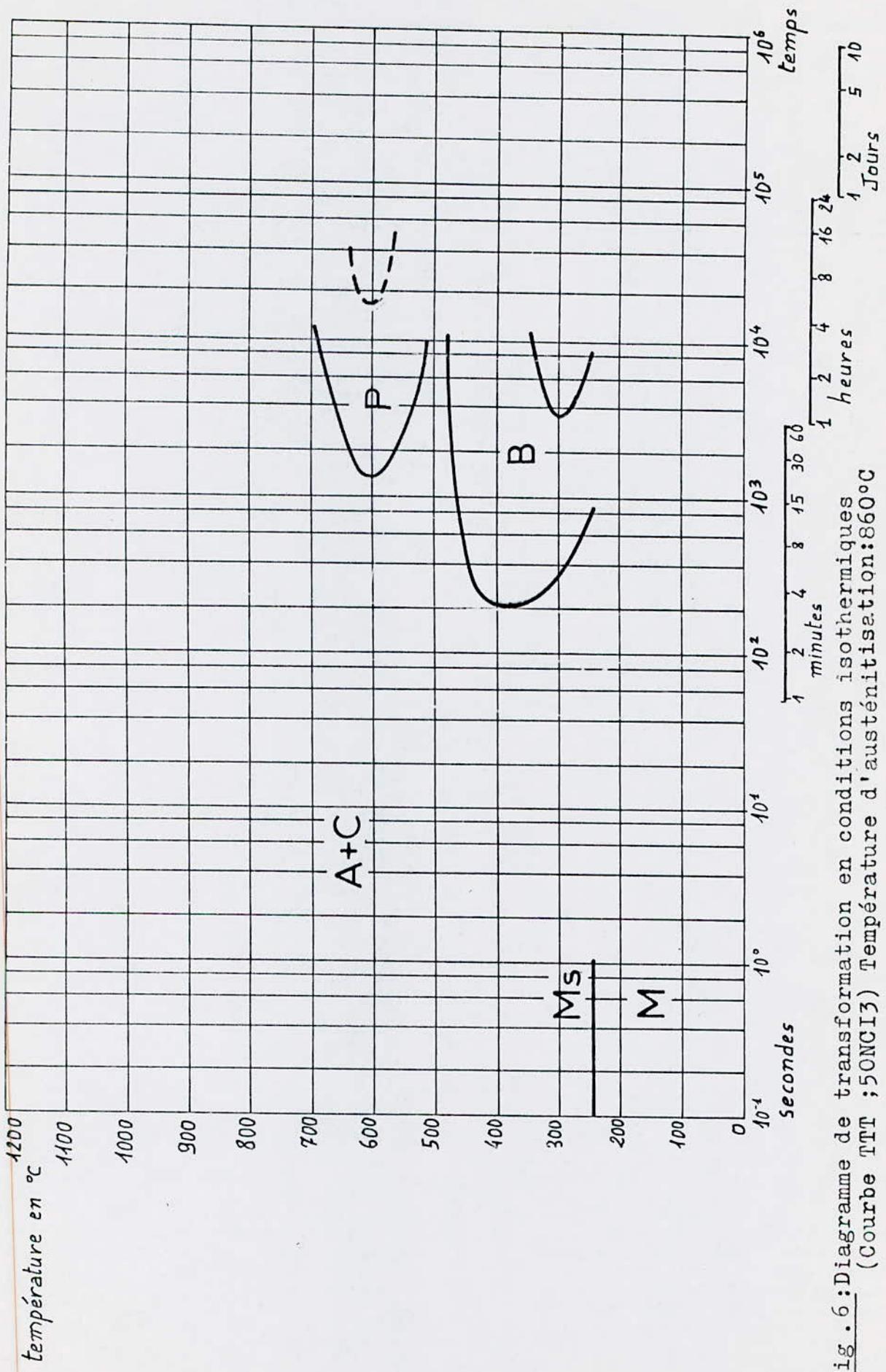


Fig. 6: Diagramme de transformation en conditions isothermiques (Courbe TTT ; 50NC13) Température d'austénitisation: 860°C

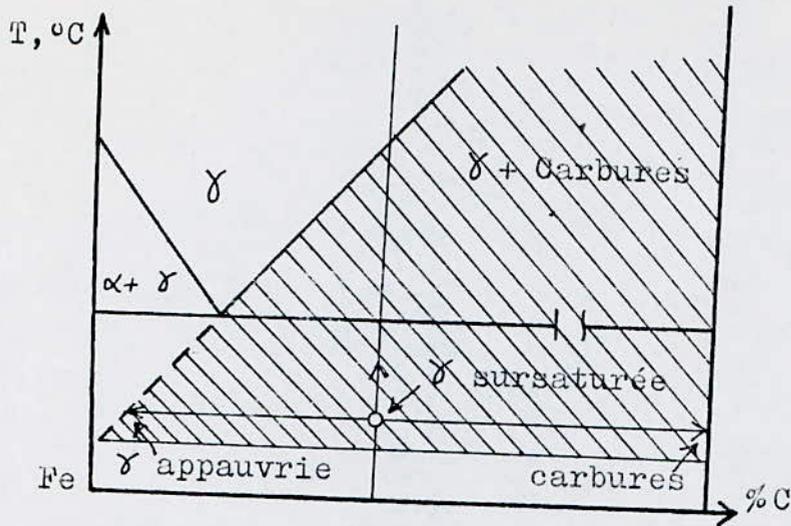


Fig.7 : Schéma

montrant la "déstabilisation" de l'austénite au revenu.

L'austénite a subi un phénomène de déstabilisation. Il est nécessaire de procéder à un second revenu et parfois à plusieurs successifs pour transformer complètement l'austénite.

La perlite ou les agrégats (F+Cem) formés ne peuvent subir que des modifications de microstructure, la composition des carbures restant en particulier inchangée mais ils coalescent.

3-3. REVENU DES SOLUTIONS SOLIDES SURSATURÉES EN ÉLÉMENTS D'ALLIAGE

Pour les éléments d'alliage à haute température et refroidissement rapide jusqu'à la température ambiante, l'acier peut se retrouver à l'état de solution solide sursaturée susceptible de revenir à l'état d'équilibre par rejet lors d'un chauffage des éléments sursaturants qui forment des précipités.

La précipitation apparaît lorsque la température de revenu atteint un niveau suffisant pour que la germination et la croissance puissent se faire.

Au cours d'un tel revenu on assiste à une augmentation des caractéristiques de résistance (et à une diminution des caractéristiques de ductilité) pendant toute la période où les

précipités se forment et se développent. Ensuite les variations se font en sens inverse pendant la coalescence des précipités, le *maximum* de résistance atteint entre les deux étapes est d'autant plus élevée que la température de revenu est plus basse (Précipités plus nombreux et plus fins).(Bib:22 et 24)

4 -ACTION DES ELEMENTS D'ALLIAGE SUR LE REVENU :

De façon générale, les éléments d'alliage freinent l'effet d'adoucissement du revenu de manière sensible, de sorte qu'il est nécessaire de chauffer d'avantage les aciers alliés à des températures plus élevées pour obtenir les améliorations désirées des propriétés mécaniques. Le Ni, Si, ... n'ont que peu d'action sur le durcissement, par contre le chrome (Cr), le Molybdène (Mo), le Vanadium (V), ... se rencontrent en générale dans la phase carbure et retardent l'effet du revenu, en particulier aux températures élevées. Mais, non seulement ces éléments d'alliage obligent à des traitements de revenu à des températures plus élevées et pendant des durées plus longues, mais ils provoquent un durcissement secondaire, résultat d'une précipitation de fines particules de carbures de ces métaux.(Bib:17) voir Tableau.2 .

Elements	Influence exercée par l'intermédiaire des carbures durant le revenu.
Chrome	Il résiste modérément à l'adoucissement.
Nickel	Il a une faible action aux faibles pourcentages.
Tungstène	Il s'oppose à l'adoucissement secondaire.
Vanadium	Son influence sur l'adoucissement est maximum pendant la trempe secondaire.
Molybdène	Il s'oppose à l'adoucissement grâce à une trempe structurale.

Tableau.2 : Influence des éléments d'alliage au cours du revenu

5 -INFLUENCE DU REVENU SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES :

Les modifications structurales décrites au cours du revenu ont des conséquences importantes sur les propriétés mécaniques, le revenu aux températures basses (jusqu'à 200 ou 250°C) diminue la susceptibilité à la rupture fragile, dans ce cas la dureté de l'acier trempé et ayant subi le revenu ne dépend pas de la teneur en éléments d'alliage, elle est déterminée surtout par la teneur de la solution (α) en carbone. C'est ce qui fait que les aciers à haut pourcentage en carbone qui, après trempe ont une dureté élevée, la gardent aussi après revenu à basses températures.

Le revenu aux basses températures renforce légèrement la résistance et la ductilité des aciers sous l'effet de diminution des macro et micro-contraintes et de la modification de l'état structural.

En poussant la température de revenu de 200 ou 250°C à 500 ou 680°C, on altère sensiblement la dureté (HB), la charge de rupture (R_m), la limite élastique (R_e), tout en améliorant

l'allongement(A) et la striction(Z).(Fig: 8).

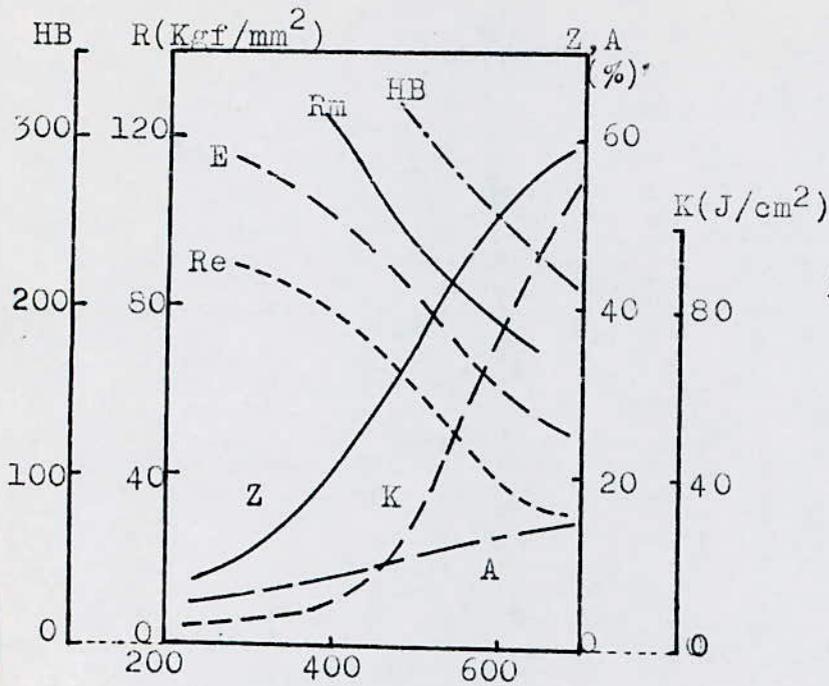


Fig.8 : Influence
type de la température
de revenu sur les
propriétés de l'acier
au carbone.

Il en est ainsi du fait que la teneur en carbone de la solution α diminue, la cohésion à l'interphase des carbures et la phase α se rompt, cette interphase étant d'abord le siège des processus de restauration suivis à haute température de recristallisation et de coalescence des carbures.

Tous les aciers alliés surtout ceux qui contiennent des éléments carburigènes après revenu aux mêmes températures, possèdent une dureté plus élevée que les aciers au carbone, ce qui est dû à la décomposition ralentie de la martensite, à la formation et à la coalescence des carbures.

6 -FRAGILITE DE REVENU DES ACIERS (Alliés) :

Le revenu de certains aciers alliés (250 à 400 et 500 à 550°C) diminue la valeur de la résilience, cette dégradation de la résilience a reçu le nom de fragilité de revenu.

la fragilite de revenu des aciers(alliés) peut être de

deux types (Fig :9).

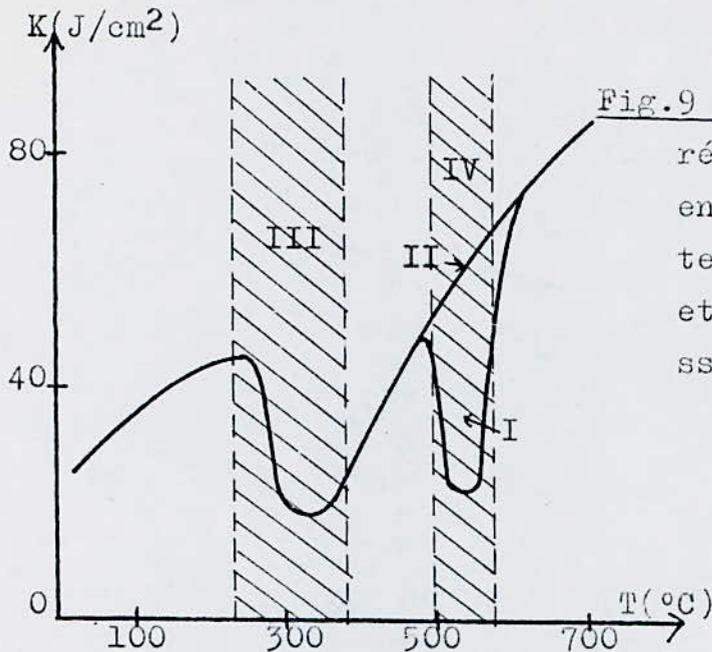


Fig.9 :Variation de la résilience de l'acier en fonction de la température de revenu et vitesse de refroidissement ultérieure.

- I :Refroidissement lent
- II :Refroidissement rapide
- III:Domaine thermique de la fragilite irreversible
- IV :Domaine thermique de la fragilite reversible

6-1.LE PREMIER TYPE DE FRAGILITE :

Le revenu qui s'appelle fragilité de revenu de premier genre s'observe après traitement effectué à 250 ou 400°C, ce qui distingue cette forme de fragilité, c'est son caractère irréversible. En reprenant l'opération à la même température, on n'améliore pas la résilience et pour corriger ce défaut il faut chauffer jusqu'à une température supérieure à 400°C, or cette température diminue la dureté.

6-2.LE DEUXIEME TYPE DE FRAGILITE :

Ce type de fragilite s'observe dans certains aciers à alliage déterminé, lorsqu'ils sont refroidis lentement dans un four ou même à l'air après revenu effectué à 500 ou 550°C, où sont maintenus trop longtemps à ces températures, ce type de fragilite en se développant dégrade fortement la résilience

Un indice important de cette fragilite est sa réversibilité, elle peut être corrigée par un revenu répété depuis 600-650°C

suivi d'un refroidissement rapide ou par un revenu supplémentaire prévoyant un séjour déterminé à 500-550°C.

7 -VARIATIONS DIMENSIONNELLES AU COURS DU REVENU :

Les données rassemblées par Desalos et Laurent (Bib:4) permettent de calculer les variations relatives de volume V que vont engendrer les différents phénomènes qui peuvent se produire au cours d'un revenu, ainsi on a les cas suivants :

xx Lorsque l'on soumet une structure totalement martensitique à un revenu de détente, on provoquera la précipitation d'une partie du carbone (quantité supérieure à 0,2%) en carbure ϵ .

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{0,08 - 0,4(\%C)}{50,8 + (\%C)}$$

xx Quand on déstabilise 1% d'austénite résiduelle qui se transforme en martensite secondaire au cours du refroidissement qui achève le revenu .

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{(1,18 - 0,18(\%C)) \times 10^2}{34,7 + (\%C)}$$

Quand au cours du revenu des carbures formés à partir d'éléments carburigènes tels Cr_2C_3 , Mo_2C , VC , W_2C ; apparaissent on doit tenir compte des caractéristiques particulières des carbures précipités, on peut admettre qu'au cours du chauffage le carbone précipite sous forme de Fe_3C , puis se produit la réaction

d'échange. Ferrite(A) + Fe_3C -----> Ferrite + Carbures

Ferrite(A) = Ferrite alliée contenant en solution solide des éléments d'alliage carburigènes.

8 -STABILITE DIMENSIONNELLE DES ACIERS :

Pour les structures constituées de martensite de revenu et d'austénite plus ou moins stable suivant les conditions de revenu, si elles n'ont pas subi un revenu suffisamment poussé, elles sont susceptibles d'évoluer lentement à des températures voisines de l'ambiante et ces évolutions vers un état plus stable sont accompagnées respectivement d'une contraction et

d'une dilatation qui sont les causes principales des variations de dimensions des pièces .

La transformation de l'austénite en constituant(α) s'accompagne d'une augmentation de volume .

La maille quadratique de la martensite a tendance à reprendre la forme cubique centrée par précipitation du carbone sous forme de carbure ϵ . Cette transformation caractéristique de la première phase de revenu s'accompagne d'une diminution de volume total de la martensite .

Dès lors, pour conférer une bonne stabilité dimensionnelle aux différentes pièces traitées il sera nécessaire :

xx D'une part d'éliminer l'austénite résiduelle.

xx D'autre part, d'effectuer un revenu assez poussé de la martensite.

9 -EQUIVALENCE ENTRE LA TEMPERATURE ET LA DUREE DE REVENU :

La température influe directement sur les caractéristiques mécaniques (dureté, résilience, fragilité, ...), pour une durée de revenu constante. Seulement, il faut un choix judicieux entre la température et la durée de revenu pour obtenir le meilleur compromis des caractéristiques souhaitées.

Ainsi Toitot et Dor ont montré une relation d'équivalence entre le temps et la température de la forme : (Bib:4 et 10)

$$Pr = \left(\frac{1}{T(^{\circ}K)} - \frac{n \cdot R}{\Delta H} \lg \frac{t}{t_0} \right)^{-1}$$

Donc, pour deux conditions de revenu correspondant à la même énergie d'activation ΔH seront équivalentes si :

$$\frac{1}{T_1} - \frac{n \cdot R}{\Delta H} \lg \frac{t_1}{t_0} = \frac{1}{T_2} - \frac{n \cdot R}{\Delta H} \lg \frac{t_2}{t_0} \quad \text{C'est-à-dire, si}$$

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{n \cdot R}{\Delta H} \lg \frac{t_1}{t_2}$$

Ce qui nous ramène à prévoir certaines caractéristiques mécaniques tout en évitant d'autres, comme les risques de fragilisation.

-----000000000-----

PARTIE

EXPRIMENTALE



MONNAIE A L'EFFIGIE DE JUGURTHA, FACE ET REVERS.

CHAPITRE :III : PRATIQUE DU CYCLE THERMIQUE

1 -TRAITEMENT THERMIQUE PRELIMINAIRE :

Vu les critères d'emploi et les traitements ultérieurs on est obligé d'avoir au départ une bonne homogénéité chimique et structurale de l'acier qui améliore le traitement.

D'après le mode d'élaboration(aciers moulés et laminés), on est amené à réaliser le recuit de détente,dont le but est la relaxation plus ou moins complète des contraintes dues à la solidification ou aux opérations thermiques et mécaniques.

xx RECUIT DE DETENTE : Il consiste à un chauffage jusqu'à une température de 680°C, suivi d'un maintien à cette température avec un rechauffement à coeur d'une à deux heures.(Fig:10,11)

2 -TREMPE :

Notre but est d'étudier l'influence du temps de maintien sur les caractéristiques mécaniques, où le chauffage est réalisé dans un four à résistance controlable(Annexe C), suivi d'une trempe à l'eau, ou dans un four sous vide B.M.I(Annexe B), suivi d'un refroidissement à l'azote hydrogéné(N +5%H) sous une pression de 3 bars où la vitesse moyenne de trempe est estimée à 999°C/mn.

2-1.IMPORTANCE DU PALIER AVANT AUSTENITISATION

LE but de ce palier est d'éviter tout choc thermique au chauffage, qui pourra être le siège de l'apparition des microfissures et des fissures sur la pièce à traiter.

La température de ce palier est fixée à 150 - 200°C au dessous de AC₃, avec un temps de maintien de l'ordre de :

$$t_v \leq 0,8.t_p$$

t_v = temps de maintien du palier avant austénisation

t_p = temps de maintien du palier pendant l'austénisation

(Pour notre étude on a choisi 3 temps de maintien de trempe)

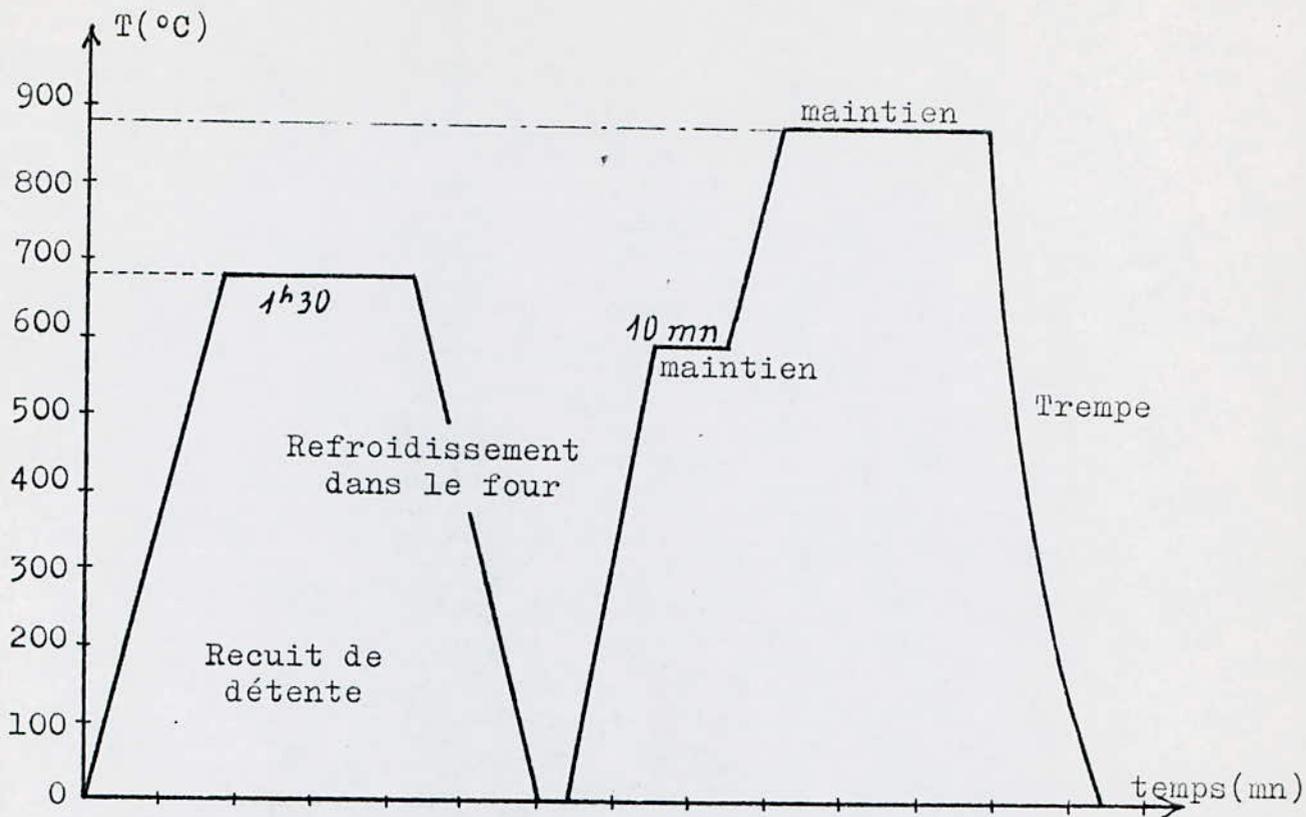


Fig.10 : Cycle de traitement de recuit suivi d'une trempe (55WC20)

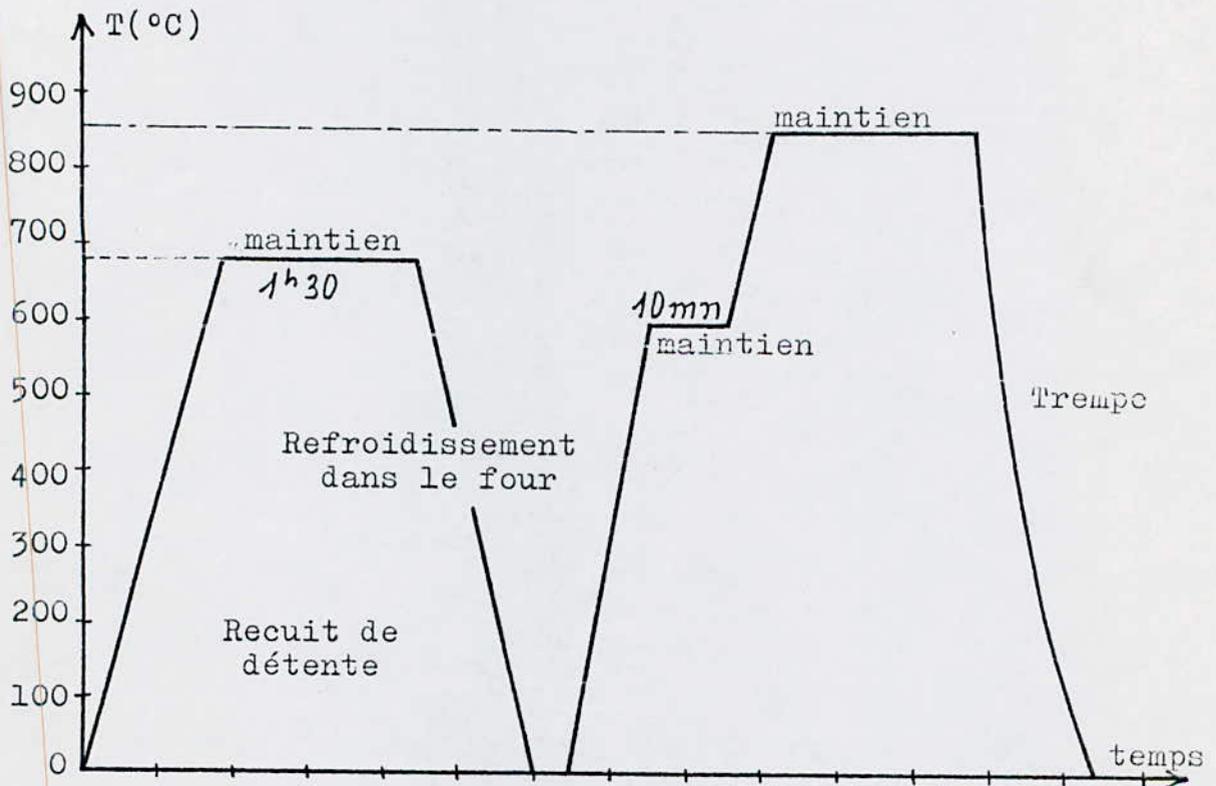


Fig.11 : Cycle de traitement de recuit suivi d'une trempe (50NC13)

2-2.DETERMINATION DES PARAMETRES D'AUSTENISATION :

×× Pour l'acier 55WC20 :

- La température d'austénisation 880°C est tire de la courbe TRC (Fig:1).
- Le temps de maintien à la température d'austénisation dépend de la dimension de la pièce (Fig:12).

×× Pour l'acier 50NC13 :

- La température d'austénisation est de 860°C d'après la courbe TRC (Fig:2).
- Le temps de maintien à la température d'austénisation après réchauffage à coeur dépend de la dimension de la pièce(Fig:12)

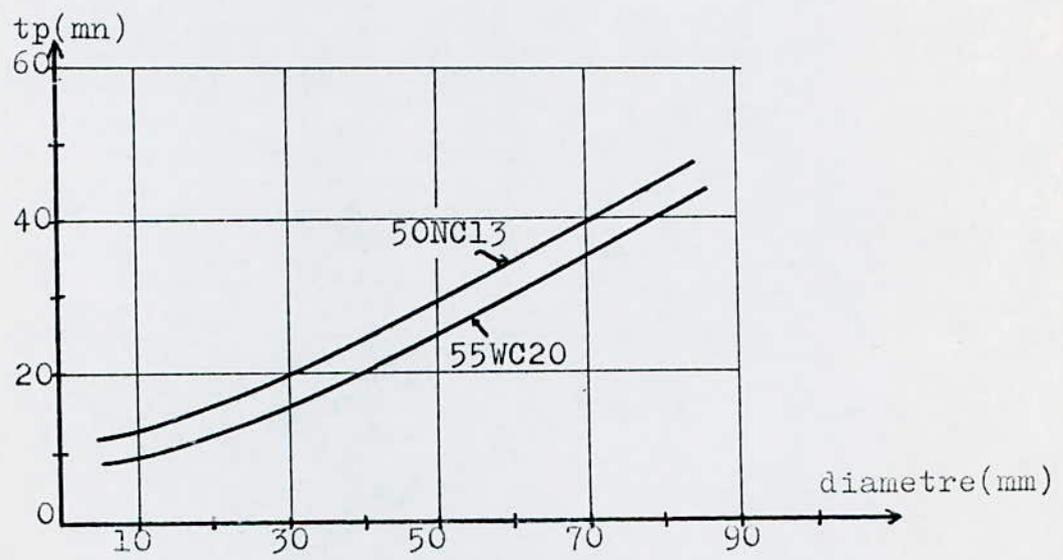


Fig.12 :Temps de maintien en fonction de la dimension de la pièce

2-3.ESTIMATION DE LA TREMPABILITE :

La courbe de pénétration de trempe est une technique d'évaluation de la dureté en fonction de la profondeur dans la pièce. Il est intéressant d'exploiter la forme de cette courbe obtenue sur des pièces cylindriques, ce qui nous permet de prévoir approximativement les autres caractéristiques de la surface au coeur de la pièce.(Fig.13 et 14).

3 -REVENU :

Le but de notre étude est de voir l'influence du temps de maintien sur les caractéristiques mécaniques où le refroidissement est réalisé à l'air.

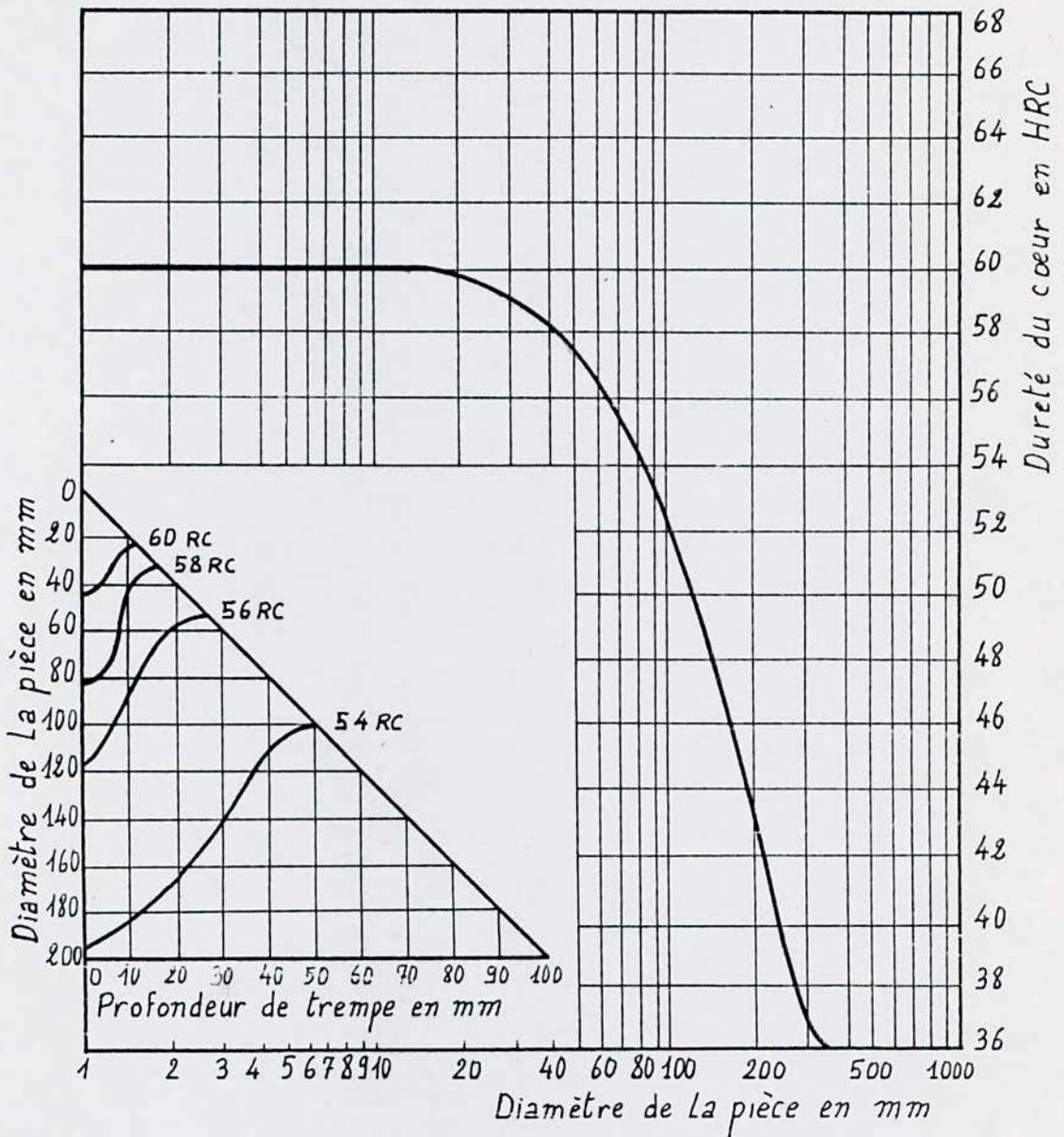


Fig .13 : Courbe de la dureté du coeur et de la profondeur de trempe en fonction du diamètre de la pièce.(55WC20)

Température de trempe : 880°C

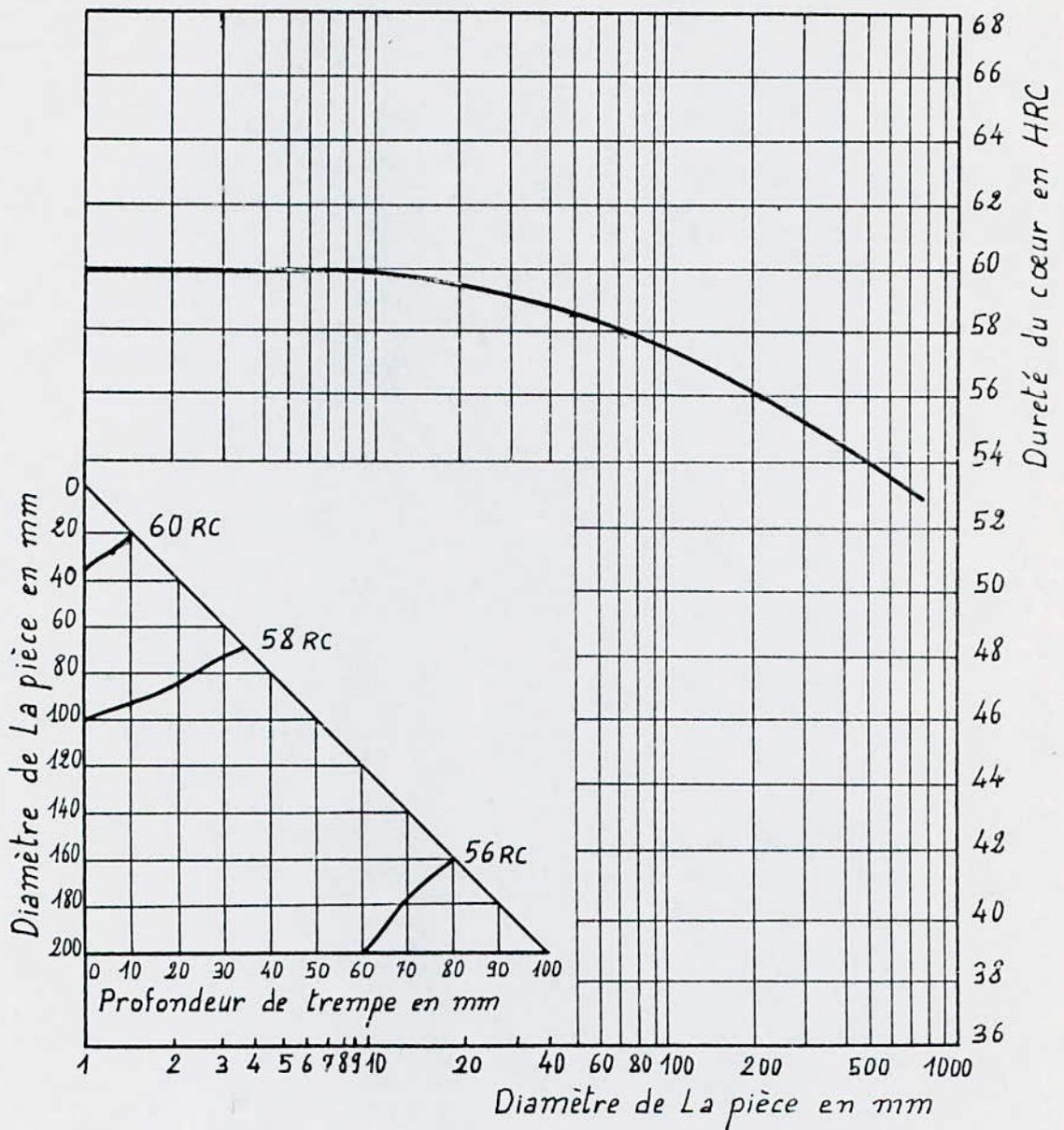


Fig.14 : Courbe de la dureté du coeur et de la profondeur de trempe en fonction du diamètre de la pièce. (50NCL3)

Température de trempe : 860°C

Le revenu doit se faire immédiatement après la trempe (Fig:15), en se référant au diagramme de revenu pour le choix de la température et les valeurs approximatives de la dureté à atteindre (Fig:16 et 17).

- Le temps de séjour dans le four : à chaque 20mm d'épaisseur lui correspond un temps de maintien d'une heure (Pour les deux nuances d'aciers), (Fig:18).

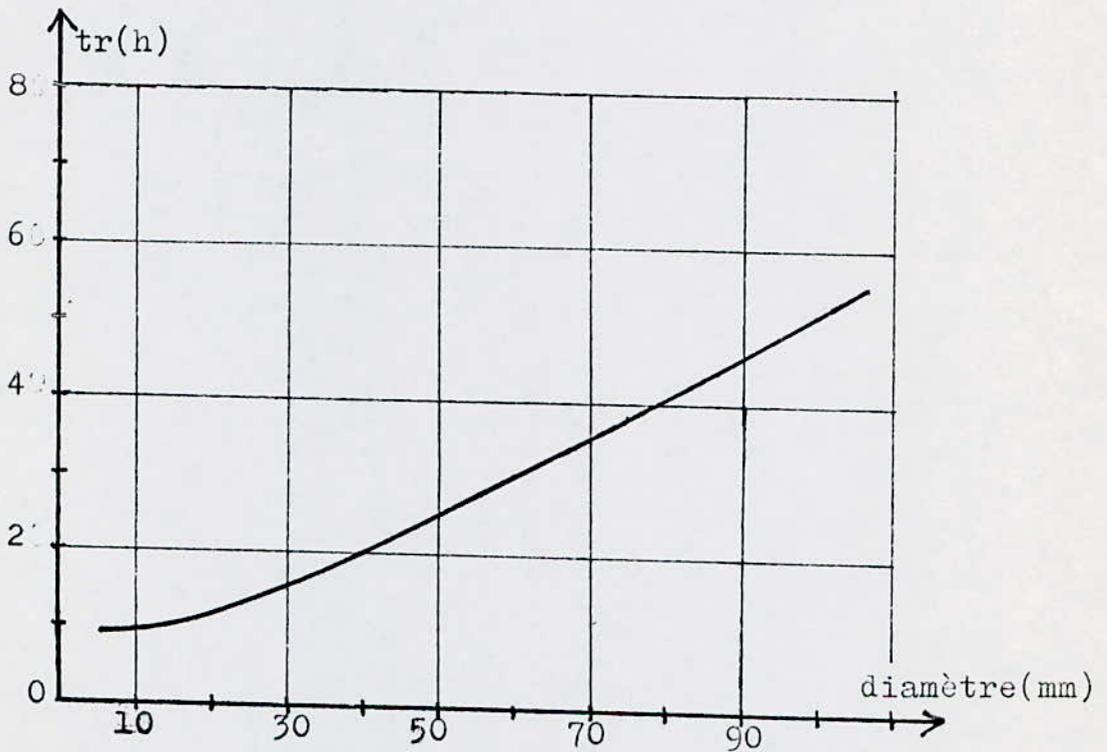


Fig.18 : Choix de la durée de revenu.

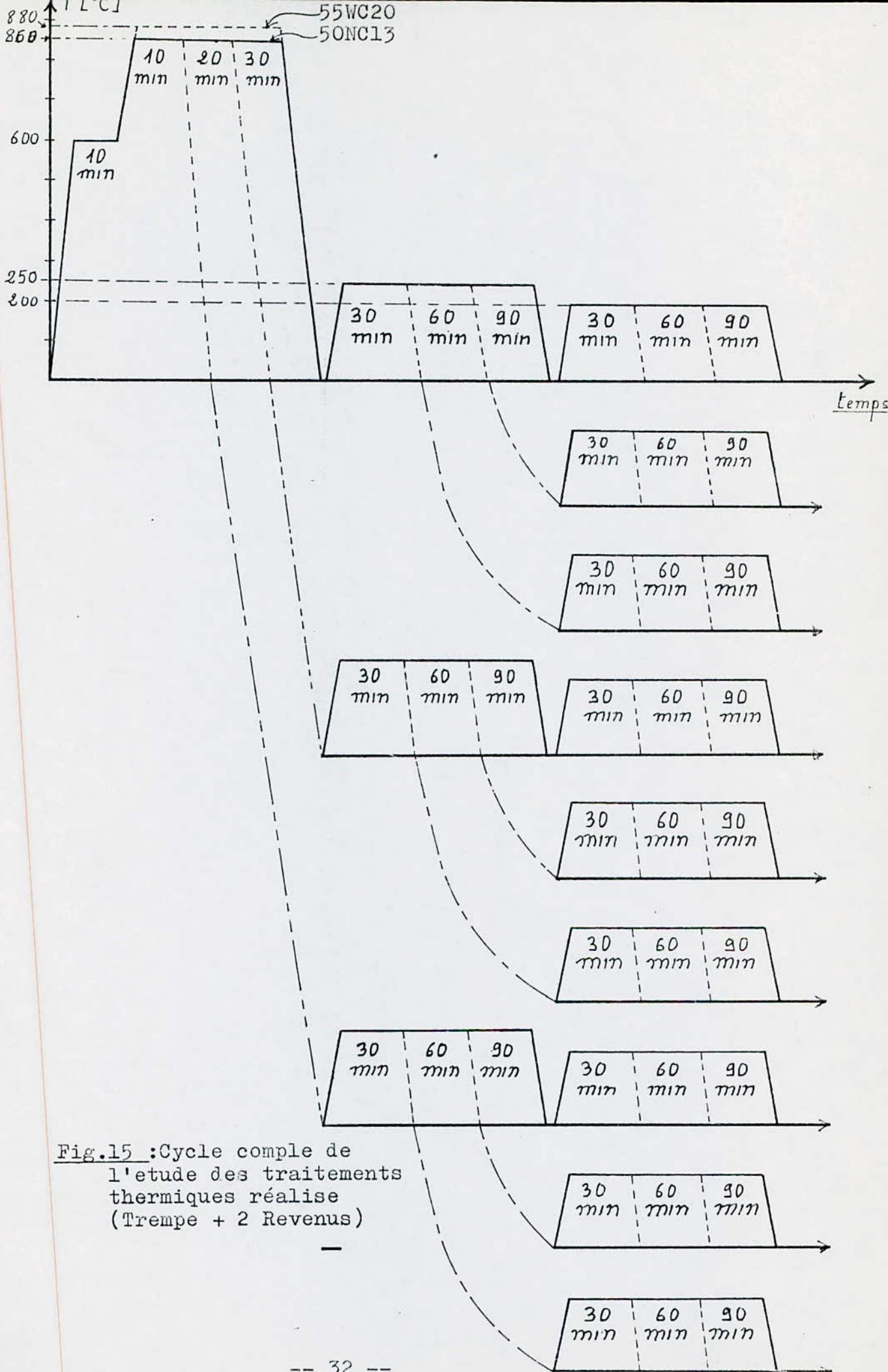


Fig.15 :Cycle comple de l'etude des traitements thermiques réalise (Trempe + 2 Revenus)

Durété
Rockwell, HRC



Fig. 16: Courbe de revenu ; 55WC20
Température de trempe : 880°C

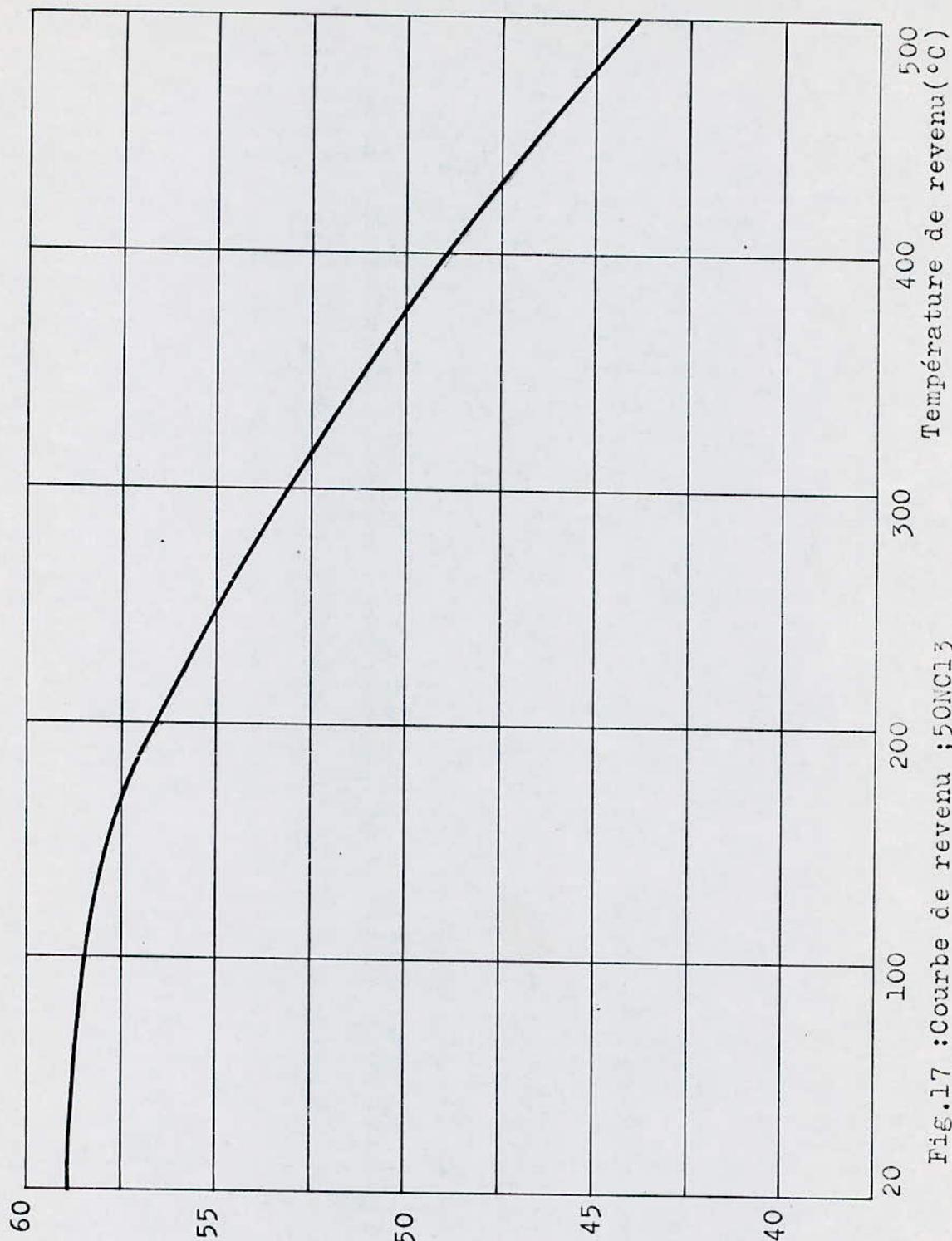


Fig.17 : Courbe de revenu ; 50NC13
 Température de trempé : 860°C

CHAPITRE IV : MESURE ET CONTROLE DES PIECES :

A/METHODES D'ESSAIS MECANIQUES :

1 -ESSAI DE DURETE :

Les essais de dureté sont d'une grande utilité pour le métallurgiste à cause de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. Mais, il faut bien noter que la dureté n'est pas une propriété simple des matériaux métalliques.

La dureté caractérise la résistance à la déformation et les valeurs obtenues permettent certains classements. Cependant, le processus opératoire doit être précis pour assurer la reproductibilité et la fidélité des résultats.

1-1. ESSAI AU CONE DE DIAMANT (Rockwell C). NF A 03-153.

On utilise un pénétrateur conique constitué par un diamant. Ce cône a un angle au sommet de $120^{\circ} + 0,5^{\circ}$ et arrondi à son sommet par un rayon $R = 0,2 \text{ mm}$.

- La charge appliquée est de 150 kg.

a) Principe de l'essai :

-- L'essai consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur de type normalisé (Cône) et à mesurer l'accroissement rémanent (p) de la profondeur de pénétration.

-- Le résultat de dureté sera directement enregistré sur un cadran de la machine.

"La machine est du type Malicet Blin SKF "

b) Conditions d'essais : (Pour les aciers)

-- L'essai est effectué à température ambiante.

-- Les charges sont appliquées sans chocs.

-- La surface est préparée pour éviter toute alteration des mesures

-- L'échantillon doit reposer sur un support rigide. (Aucune marque ne doit apparaitre au dos de l'échantillon)

-- L'épaisseur de l'échantillon doit être ; supérieur à : $8 \times p$

-- Pour des essais successifs, la distance entre les centres de deux empreintes voisines doit être ; supérieur à : 3 mm

-- La distance du centre d'une empreinte au bord de l'échantillon doit être ;supérieur à : 3mm

1-2.PREPARATION DES ECHANTILLONS :

Les échantillon ont une forme cubique d'une arête de 1cm, ils ont été préparé de la manière suivante :

- Traitement thermique des échantillons.
- Prépolissage :Il a été réalisé sous un courant d'eau avec des papiers abrasifs émeri :180,400 et 600.
- Polissage de finition :Il a été réalisé avec un papier abrasif émeri :1000

1-3.EXPLOITATION DES RESULTATS :

L'essai est effectué sur une machine automatique affichant directement la valeur de la dureté sur un cadran,pour plus de précision,le résultat de la dureté est la moyenne arithmétique de cinq mesures.

- Voir les Tableaux 3 et 4,pour l'ensemble des valeurs des duretés des échantillons qui ont subi une trempe à l'eau.
- Pour les échantillons qui ont subi une trempe à l'azote hydrogene dans le four BMI, leurs résultat sont dans le Tableau 5.

2 -MESURE DES DURETES HRC :

Nuance des aciers (AFNOR)			55WC20	50NC13	
Dureté avant la trempe(Etat Recuit).			21,3	24,5	
Type de traitement	Température de traitement(°C)		Duree de traitement(mn)	Dureté apres le traitement	
Trempe à l'eau	880 pour 55WC20	860 pour 50NC13	t1 10	56,75	57,25
			t2 20	60,01	59,58
			t3 30	60,58	60,02
1 ^{er} Revenu après -Une trempe t1	250°C		t1 30	56,50	53,68
			t2 60	55,33	53,25
			t3 90	55,92	53,37
1 ^{er} Revenu après -Une trempe t2			t1 30	58,92	55,62
			t2 60	57,50	55,12
			t3 90	58,08	55,00
1 ^{er} Revenu après -Une trempe t3			t1 30	59,67	56,00
			t2 60	58,58	55,44
			t3 90	58,75	55,18

Tableau 3 : Mesure des duretés après la trempe et le 1^{er} revenu .

Norme des aciers (AFNOR)			55WC20	50NC13
Type de traitement	Température de traitement(°C)	Durée de traitement(mn)	Dureté après le traitement	
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t1 et -Un 1 ^{er} revenu t1	200°C	t1 30	56,56	50,2
		t2 60	55,81	50,1
		t3 90	56,62	50,6
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t1 et -Un 1 ^{er} revenu t2		t1 30	55,25	49,7
		t2 60	55,01	49,6
		t3 90	55,87	50,2
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t1 et -Un 1 ^{er} revenu t3		t1 30	55,87	49,9
		t2 60	55,43	49,7
		t3 90	56,29	50,3
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t2 et -Un 1 ^{er} revenu t1		t1 30	58,28	52,2
	t2 60	57,75	51,4	
	t3 90	57,87	51,5	
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t2 et -Un 1 ^{er} revenu t2	t1 30	56,86	51,6	
	t2 60	56,40	50,7	
	t3 90	56,62	51,0	
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t2 et -Un 1 ^{er} revenu t3	t1 30	57,37	51,2	
	t2 60	56,9	50,4	
	t3 90	57,0	50,8	
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t3 et -Un 1 ^{er} revenu t1	t1 30	58,5	52,0	
	t2 60	57,9	51,4	
	t3 90	57,77	51,5	
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t3 et -Un 1 ^{er} revenu t2	t1 30	57,3	51,6	
	t2 60	56,9	50,9	
	t3 90	56,0	51,2	
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t3 et -Un 1 ^{er} revenu t3	t1 30	57,5	51,3	
	t2 60	57,1	50,7	
	t3 90	57,1	51,1	

Tableau 4 : Mesure des duretés HRC après le deuxième Revenu .

xx Dureté des échantillon ayant subi une trempe à l'azote

 hydrogène (N₂ +5% H₂) à " -120°C " :

Nuance des aciers (AFNOR)			55WC20	50NC13
Type de traitement	Température de traitement(°C)	Durée de traitement(mn)	Dureté après le traitement	
-Trempe à l'azote hydrogéné	880	t3 30	60,9	
	860			60,4
1 ^{er} Revenu après : -Une trempe t3	250°C	t1 30	58,9	57,0
		t2 60	58,3	56,4
		t3 90	58,4	56,1
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t3 et -Un 1 ^{er} revenu t1	200°C	t1 30	56,9	55,3
		t2 60	56,6	54,2
		t3 90	56,5	54,1
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t3 et -Un 1 ^{er} revenu t2		t1 30	56,3	53,7
		t2 60	55,9	52,9
		t3 90	55,9	52,5
2 ^{eme} Revenu après : -Une trempe t3 et -Un 1 ^{er} revenu t3		t1 30	56,6	53,4
		t2 60	56,0	52,2
		t3 90	55,9	52,0

Tableau 5 : Mesure des duretés des échantillons qui ont subi une trempe à l'azote hydrogéné .

2-1. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS DE DURETE :

-xx Trace des courbes HRC = f(t) après trempé à l'eau :
dureté

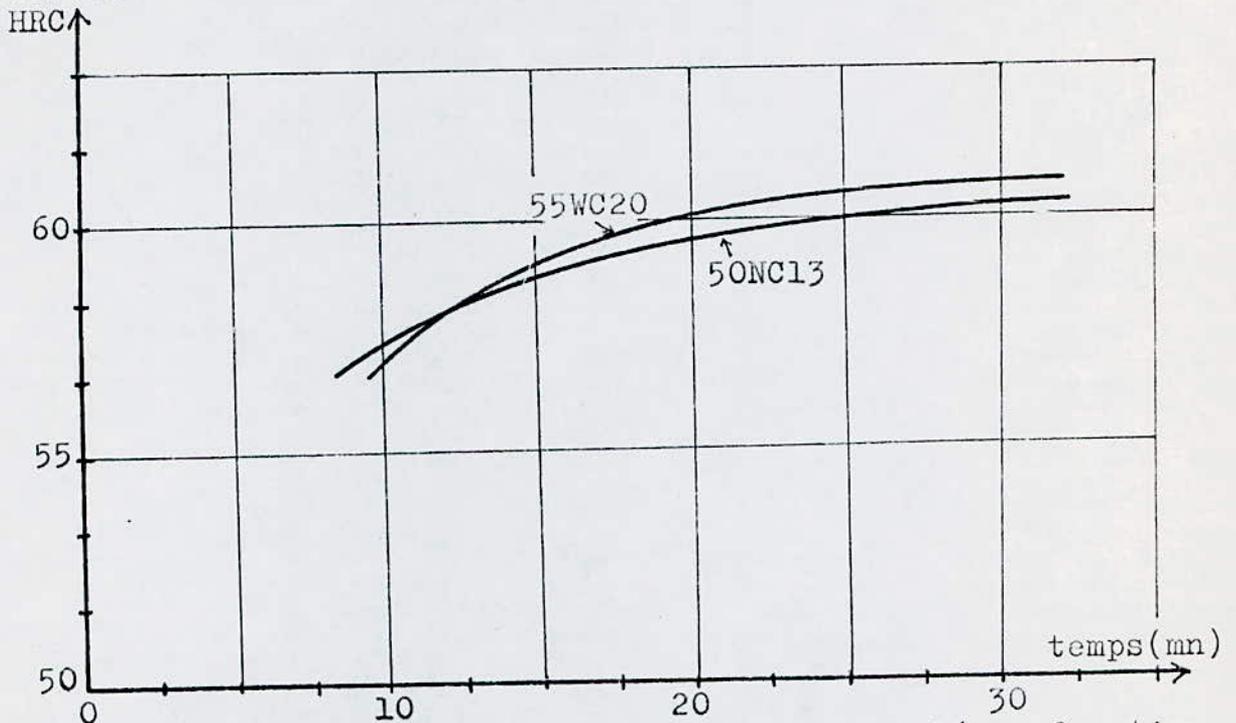


Fig.19 : Représentation de l'évolution de la dureté en fonction du temps de maintien pour les aciers étudiés-

-- Interprétation des courbes :

Lors de la transformation martensitique, on remarque une augmentation de la dureté en fonction du temps de maintien, cela se fait suivant l'évolution de l'état structural, car pendant un faible temps de maintien les valeurs des duretés sont faibles et des fois irrégulières puisque la transformation austénitique ($\alpha + \text{carbure} \rightarrow \gamma$) n'est pas complète. Par contre, plus ce temps croît plus la transformation se complète et plus les carbures ($(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3, \text{Ni}_3\text{Cr}$ pour l'acier 50NC13 et WC pour l'acier 55WC20) s'homogénéise dans la matrice (Ch, I.p, 2-1).

Par contre, si le temps est assez important on obtient une dureté légèrement supérieure avec un état fissuré de la pièce, ce qui nous ramène à dire que la valeur de ce supplément de dureté est due à l'importance des contraintes internes. (Fig:19)

xx Tracé des courbes $HRC = f(t)$ après le 1^{er} revenu pour l'acier 55WC20 :

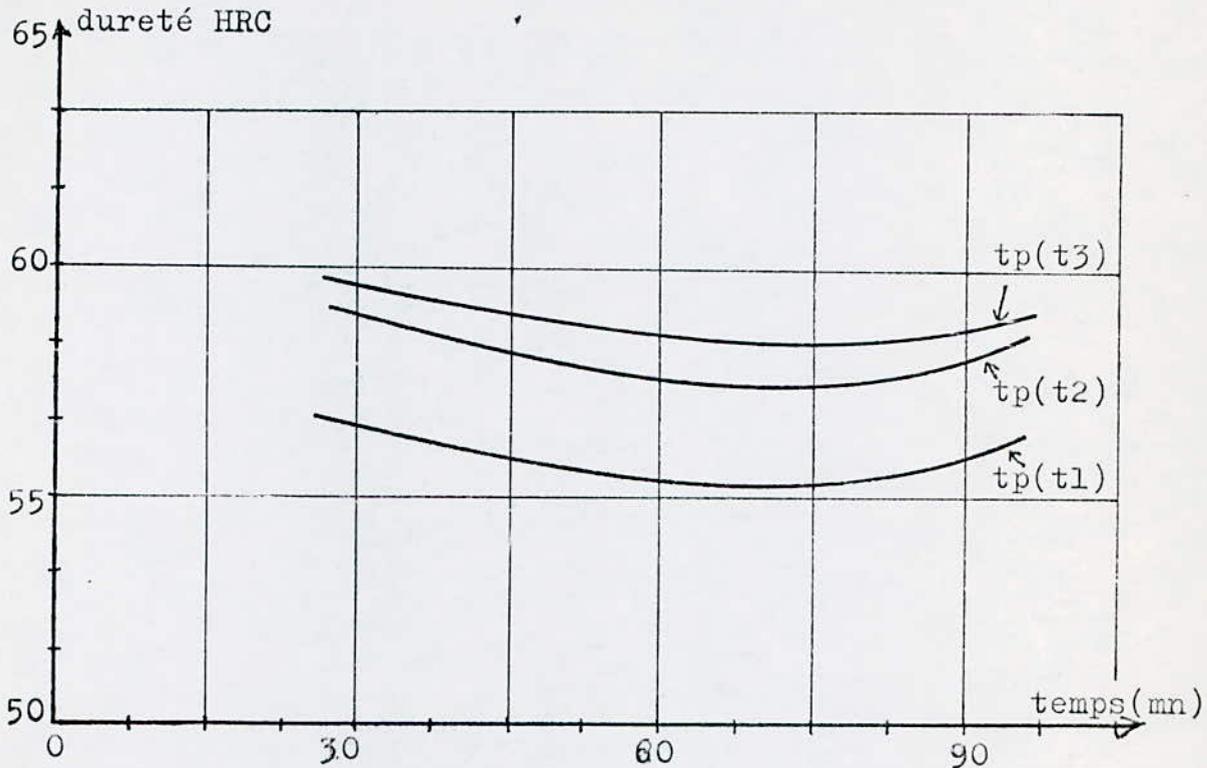


Fig.20 : Evolution de la dureté en fonction du temps de maintien du 1^{er} revenu.

xx Trace des courbe $HRC = f(t)$ après le 2^{eme} revenu pour l'acier 55WC20 :

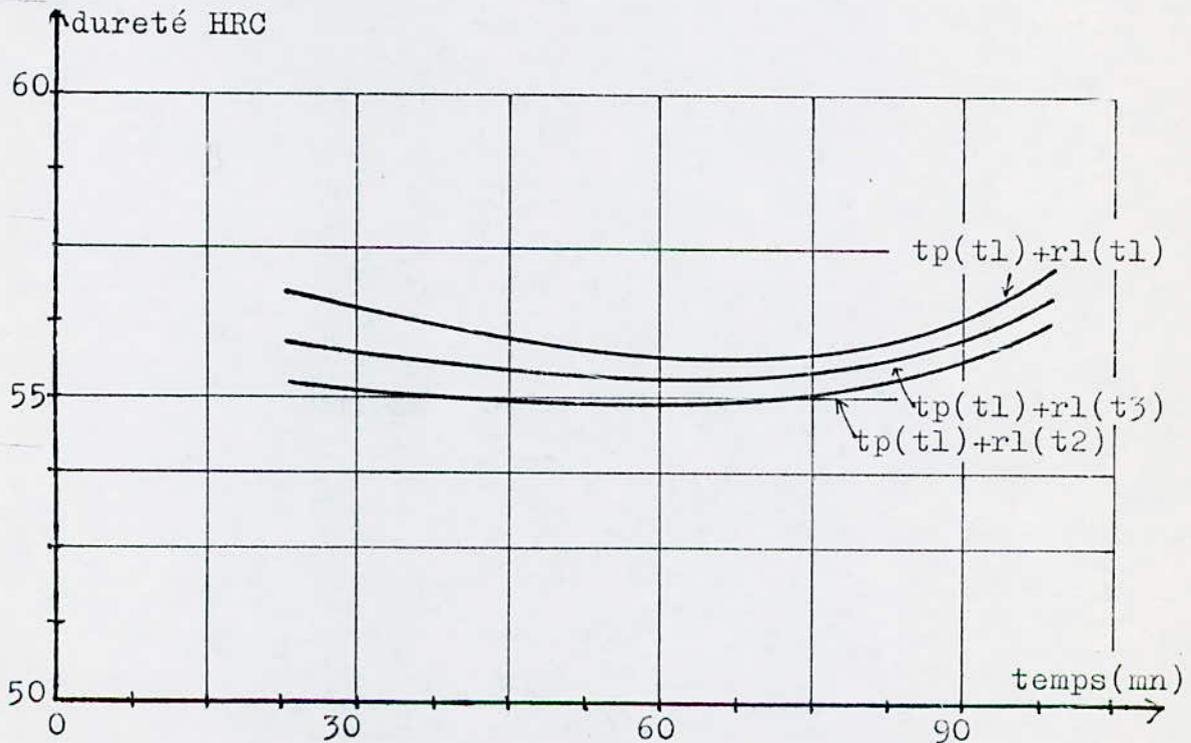


Fig.21 : Evolution de la dureté en fonction du temps de maintien du 2^{eme} revenu après $tp(t1)$ et $rl(t1), rl(t2)$ ou $rl(t3)$.

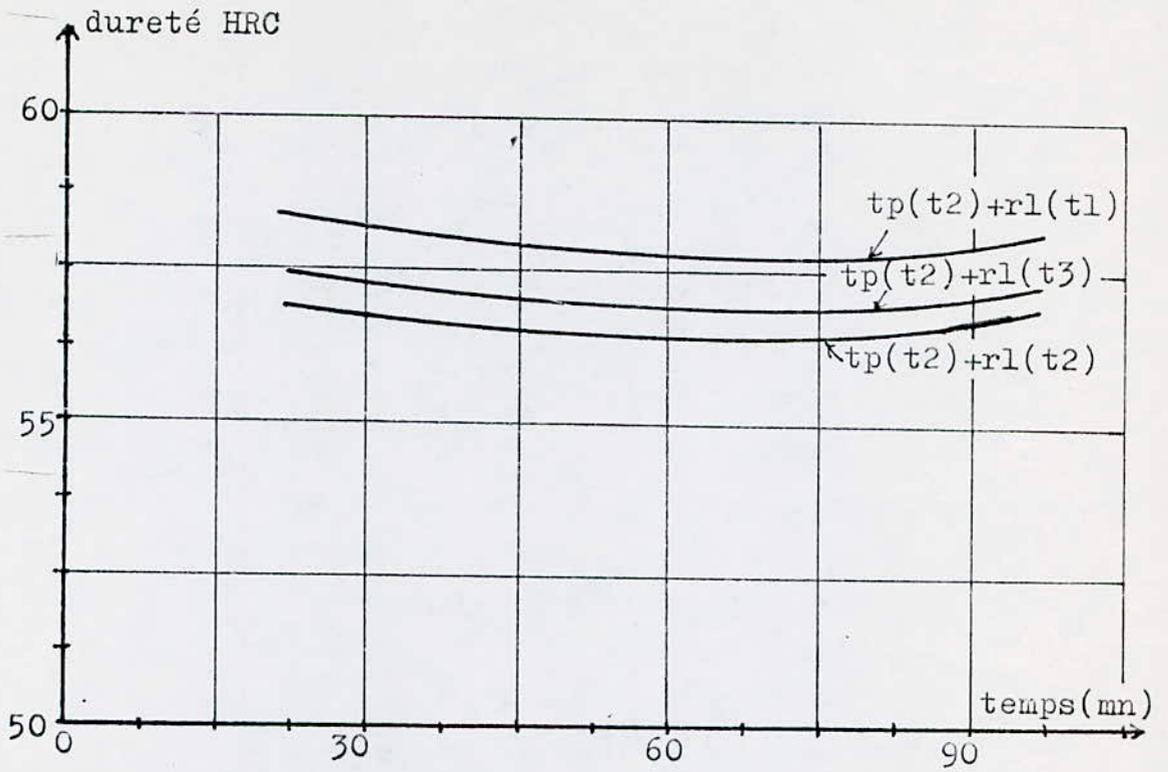


Fig.22 : Evolution de la dureté en fonction du temps de maintien du 2^{eme} revenu après; $tp(t2)$ et $rl(t1)$, $rl(t2)$ ou $rl(t3)$.

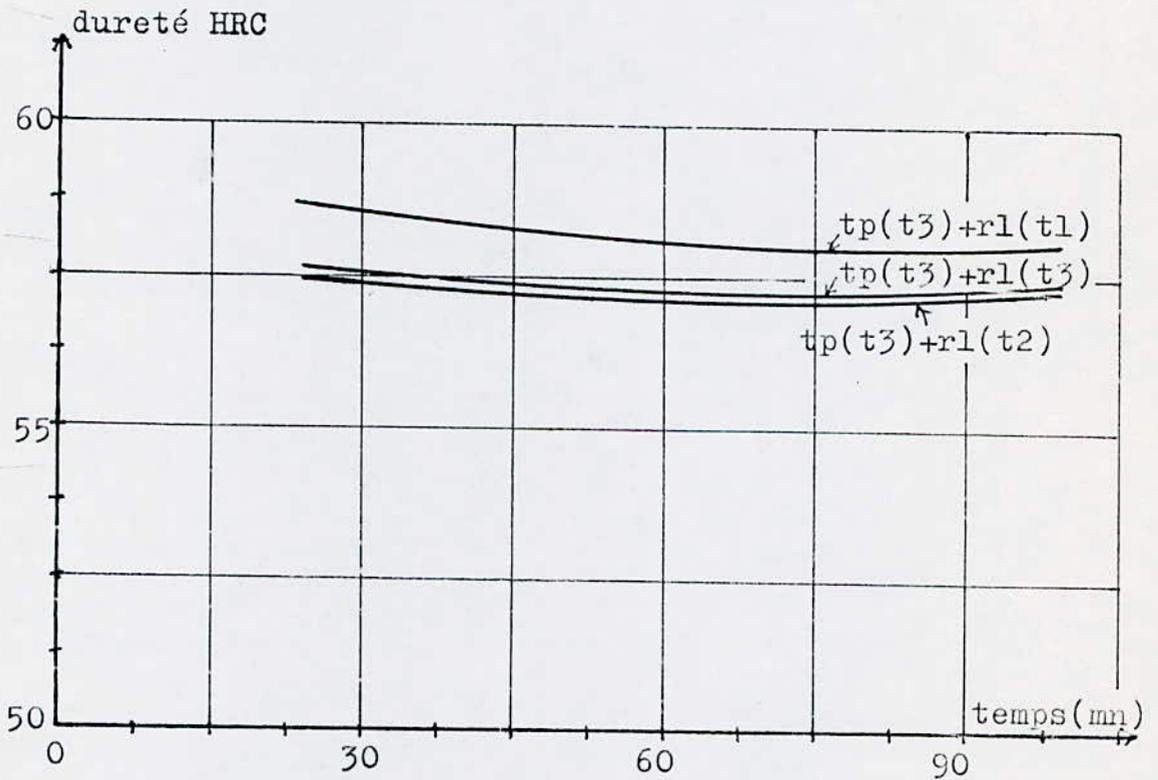


Fig.23 : Evolution de la dureté en fonction du temps de maintien du 2^{eme} revenu après; $tp(t3)$ et $rl(t1)$, $rl(t2)$ ou $rl(t3)$.

-- Interprétation des courbes :

Pour les courbes du premier revenu(Fig:20),on observe une diminution modérée de la dureté suivie d'une augmentation très légère due à la précipitation des carbures pendant un long maintien. Par contr,pour les courbes du deuxième revenu(Fig:21,22 et 23) les duretés restent dans les approximités des courbes du premier revenu, ce qui est expliqué par l'adoucissement de la martensite primaire et la détente des contraintes internes due à la trempe. En plus on a la formation de la martensite secondaire(Ch.II,p.3) pendant le refroidissement qui achève le premier revenu qui participe à l'augmentation de la dureté.

Pour un long maintien,on a une augmentation plus importante pour les cas où la dureté après le premier revenu est faible ce qui est dû encore à la facilité de formation des carbures à l'état de détente plus ou moins complet .

xx Tracé des courbes HRC = f(t) après le 1^{er} revenu pour l'acier 50NCl3 :

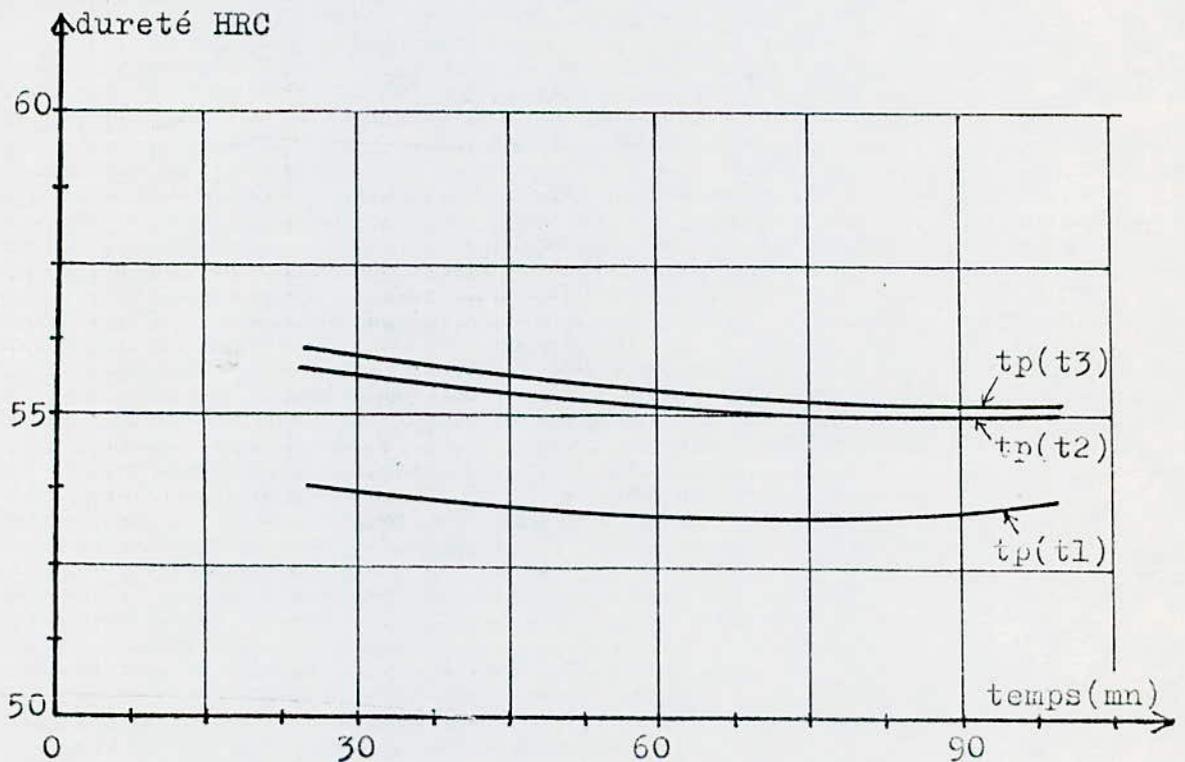


Fig.24 : Evolution de la dureté en fonction du temps de maintien du 1^{er} revenu

xx Tracé des courbes HRC = f(t) après le 2^{eme} revenu pour
l'acier 50NC13 :

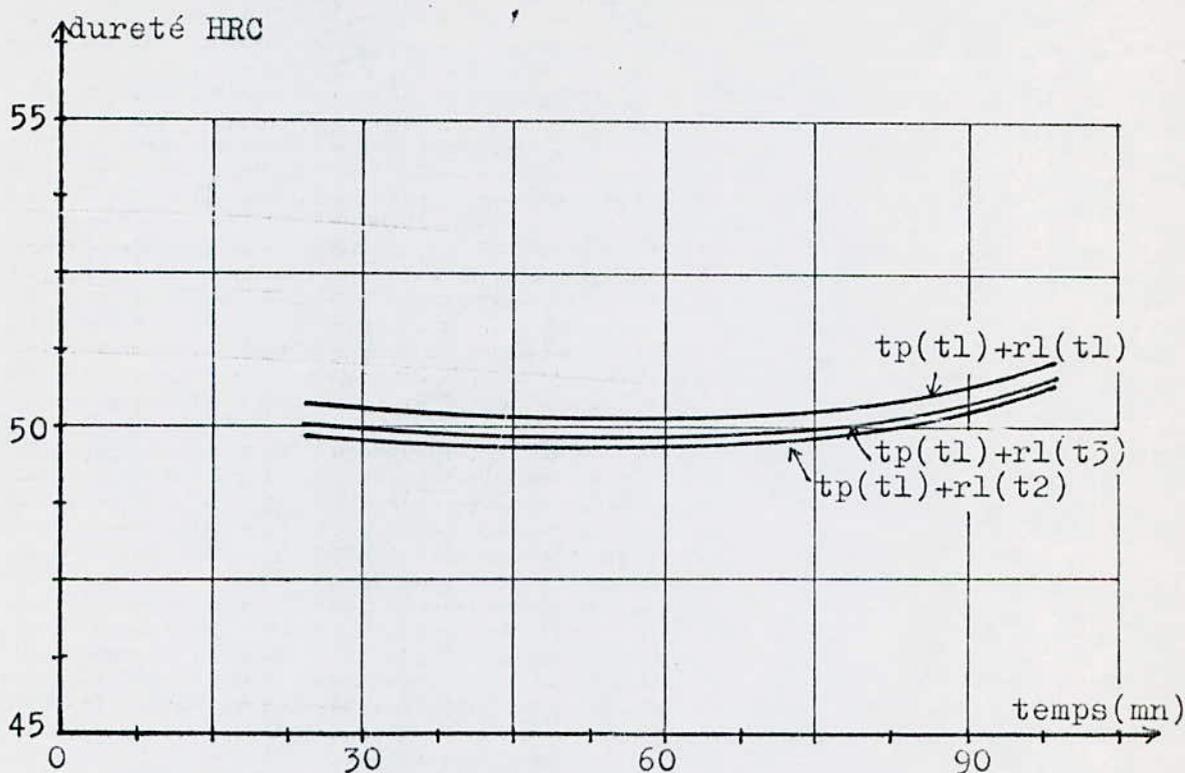


Fig.25 : Evolution de la dureté en fonction du temps de maintien du 2^{eme} revenu après; $tp(t1)$ plus $rl(t1)$, $rl(t2)$ ou $rl(t3)$.

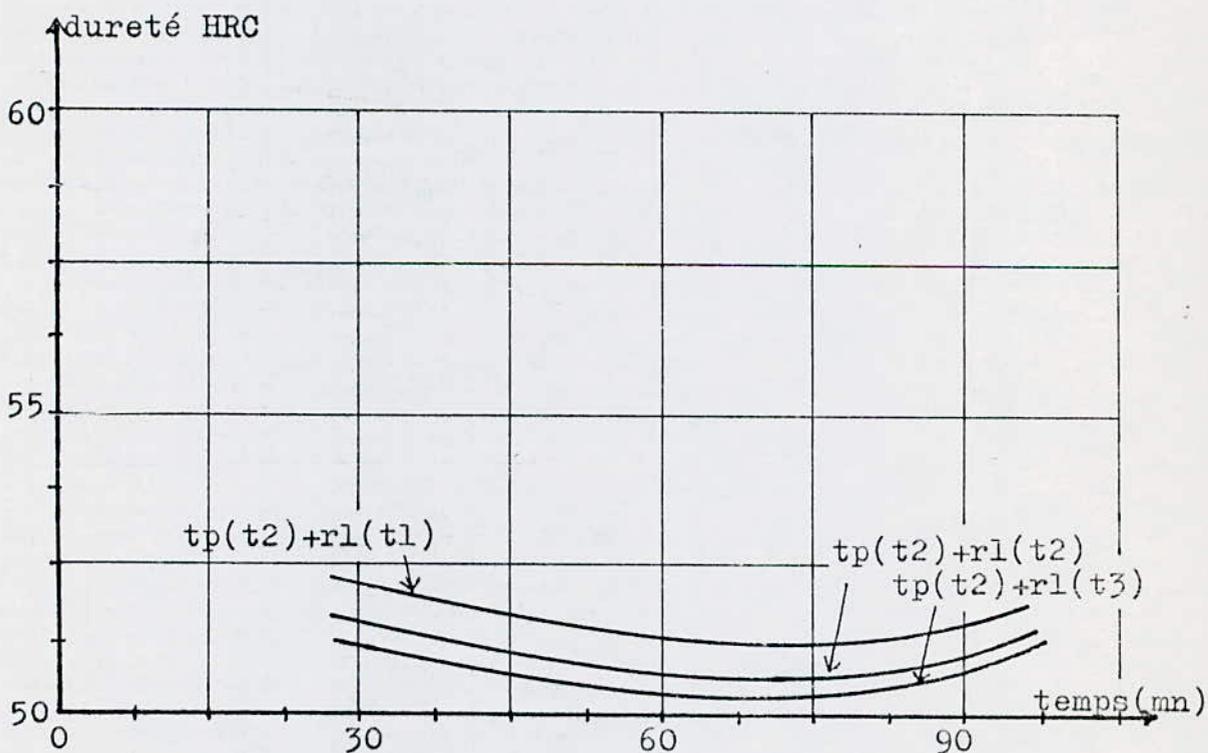


Fig.26 : Evolution de la dureté en fonction du temps de maintien du 2^{eme} revenu après; $tp(t2)$ et $rl(t1)$, $rl(t2)$ ou $rl(t3)$.

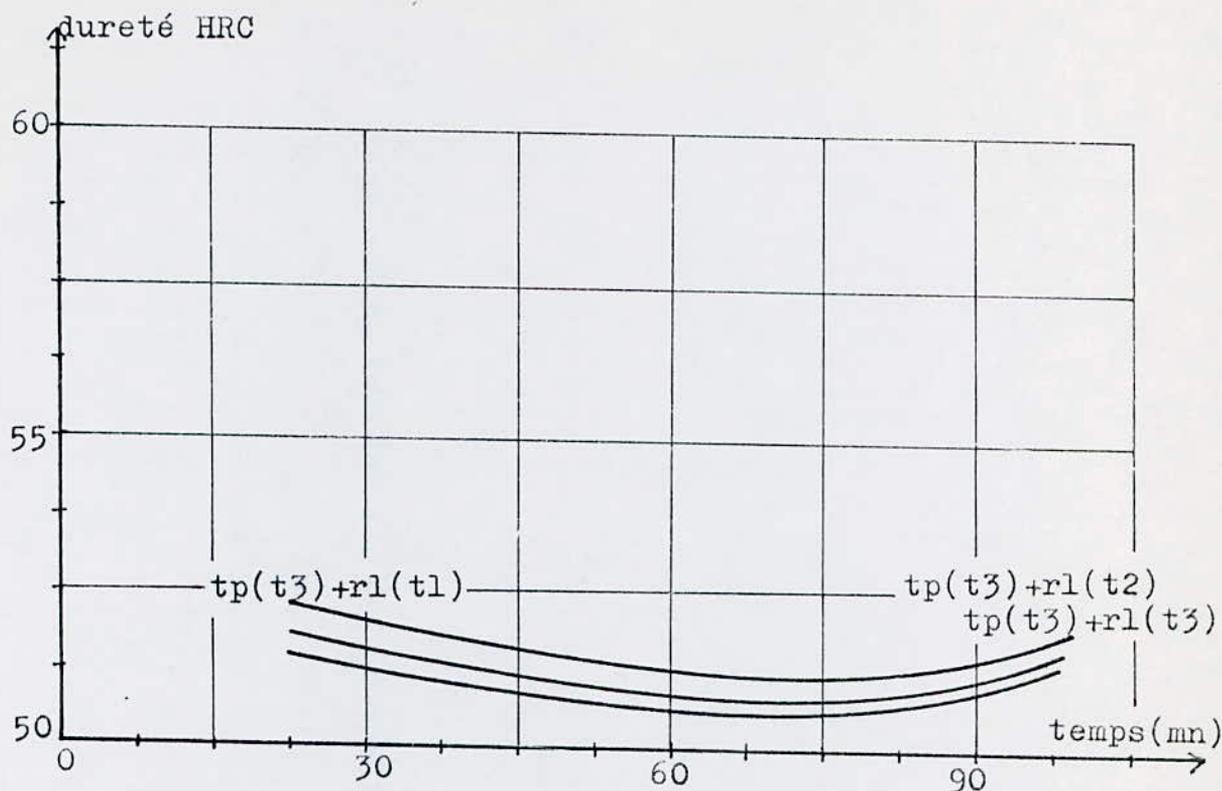


Fig.27 : Evolution de la dureté en fonction du temps de maintien du 2^{ème} revenu après; $tp(t_3)$ et $rl(t_1)$, $rl(t_2)$ ou $rl(t_3)$.

-- Interprétation des courbes :

En faisant une comparaison graphique entre ces courbe et ceux de l'acier 55WC20, on remarque que les allures sont les même sauf que les valeurs des duretés après le premier et le deuxième revenu (Fig:24,25,26 et 27) sont inférieures, puisque ce qui est intéressant c'est de constater pour les courbes de premier revenu (Fig:24) que nous avons une diminution des duretés chaque fois que le temps de maintien est croissant.

Pour les courbes du deuxième revenu, on a une diminution au début en fonction du temps et en les comparant (Fig:25,26 et 27), on remarque que l'évolution de la dureté est plus décroissante pour les échantillons qui ont une dureté élevée, cela à cause du faible pourcentage du carbone et d'éléments carburigènes, de plus la pente de diminution de dureté (Fig:17) est plus importante que pour l'acier 55WC20 , ce qui facilite la détente des contraintes et l'adoucissement de la structure en générale.

L'augmentation de la dureté après un certain temps est dû à la presence de la martensite secondaire.

xx REPRESENTATION DES DURETES APRES TREMPE A L'AZOTE HYDROGENE
 ET REVENUS :

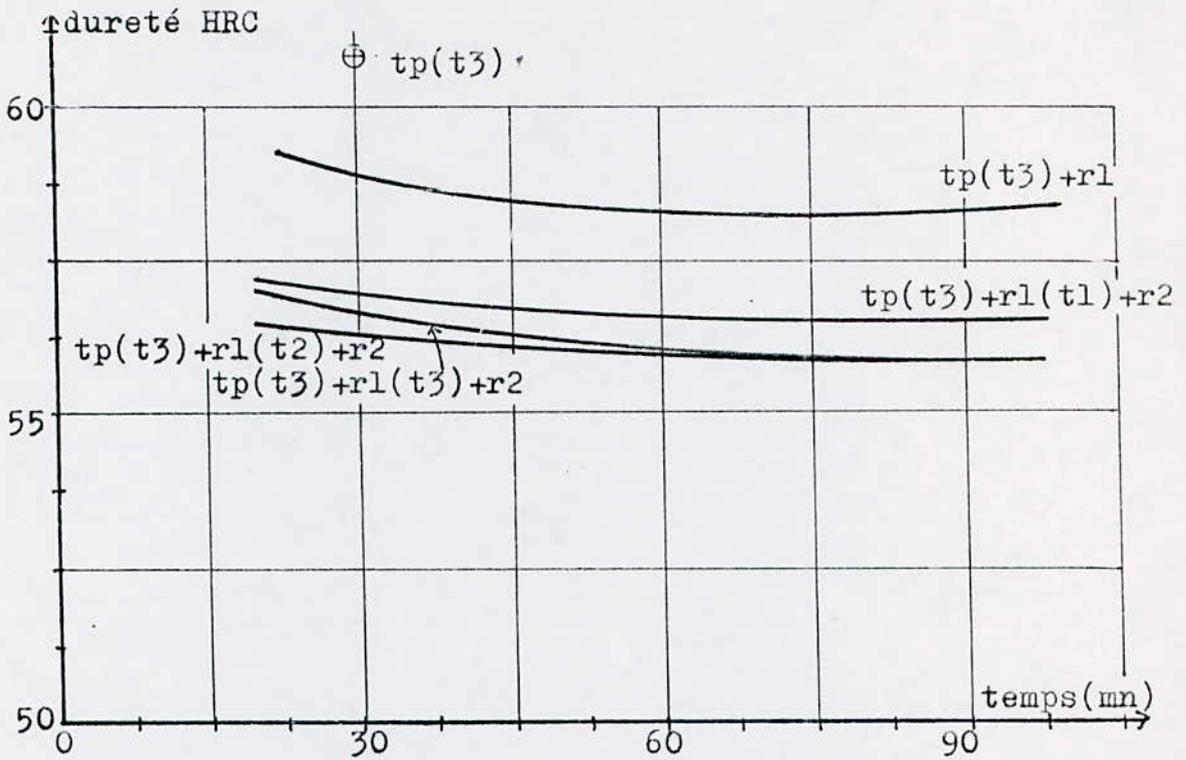


Fig.28 : Evolution des duretés après trempe(t_3) et le 1^{er} et 2^{eme} revenu de l'acier 55WC20 .

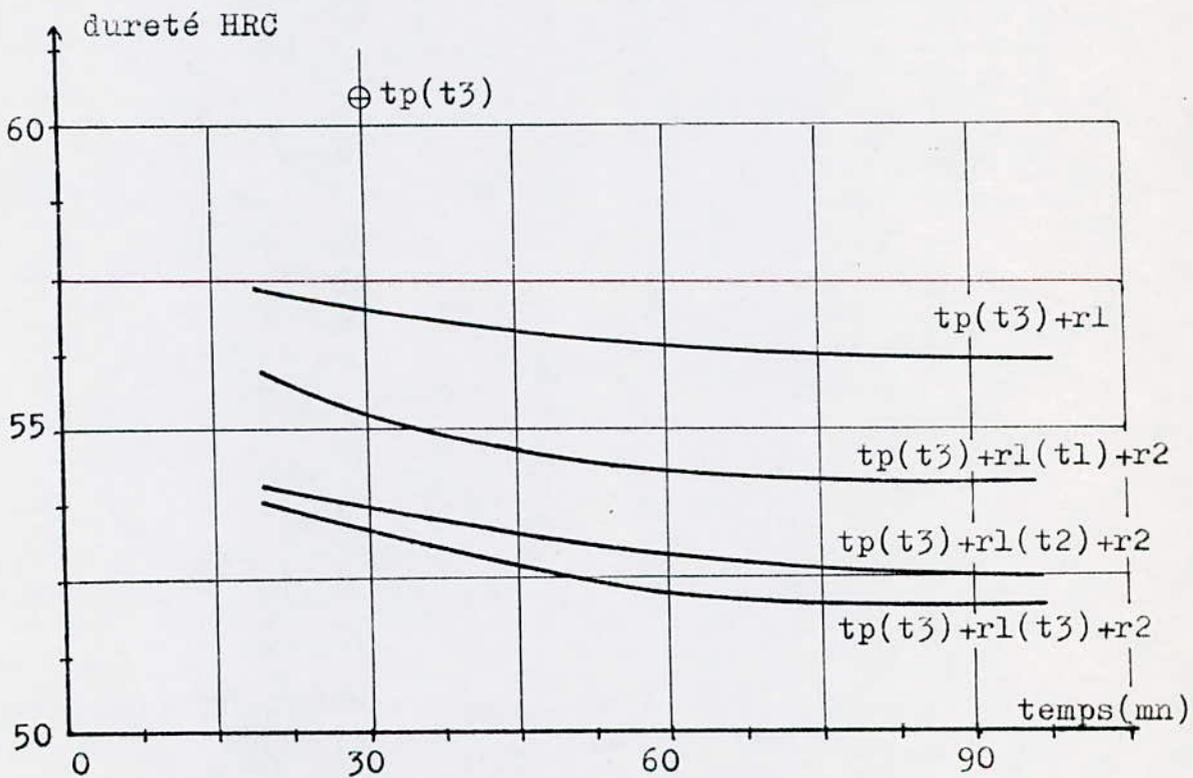


Fig.29 : Evolution des duretés après tremps(t_3) et le 1^{er} et 2^{eme} revenu de l'acier 50NC13 .

-- Interpretation des courbes de dureté après une trempe à l'azote hydrogéné :

= Pour l'acier 55WC20.(Fig:28)

La trempe à l'azote pulvérisé donne de meilleurs résultats de dureté ainsi que leurs évolutions en fonction du temps de maintien du premier et deuxième revenu, ce qui peut être interprété par plusieurs raisons :

- La vitesse de trempe est supérieure à la vitesse critique ($V_c = 10^\circ\text{C/s}$).
- Une meilleure homogénéité de refroidissement.
- La fin de la transformation martensitique est atteinte, ce qui donne une plus grande proportion de martensite de trempe (Fig:30).

La courbe du premier revenu présente une diminution des duretés en fonction du temps de maintien à cause de l'élimination des contraintes internes essentiellement.

Les courbes du deuxième revenu ont une même allure que pour le premier revenu sauf que les valeurs de dureté sont inférieures à cause de l'adoucissement de la martensite primaire et la faible quantité des carbures, à cause des éléments carburigènes qui sont figés dans la structure martensitique (Ch, II.p, 3-1)

= Pour l'acier 50NC13.(Fig:29).

La différence entre ces derniers (Fig:29) et les courbes précédentes (Fig:28) est l'abaissement important des duretés en fonction du temps de maintien, soit pour le premier ou le deuxième revenu, de plus après le deuxième revenu, on a une très faible dureté à cause de l'adoucissement de la martensite primaire (Fig:31) et de la faible proportion des carbures et la présence du Nickel qui diminue la stabilité des carbures (Ch, II.p, 4).

Paramètre de refroidissement c'est :
 la durée de refroidissement de
 800 à 500°C en $s \times 10^{-2}$

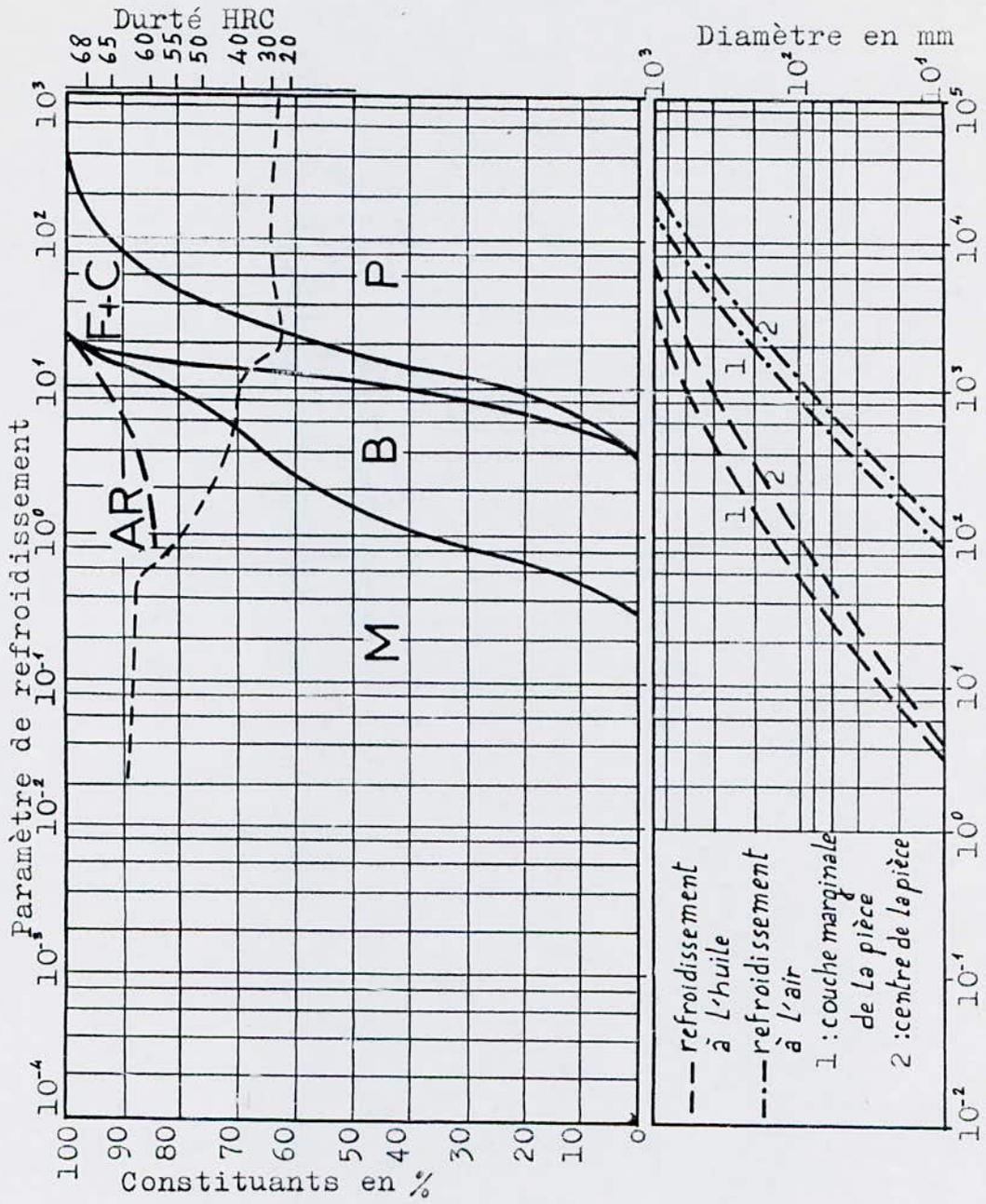
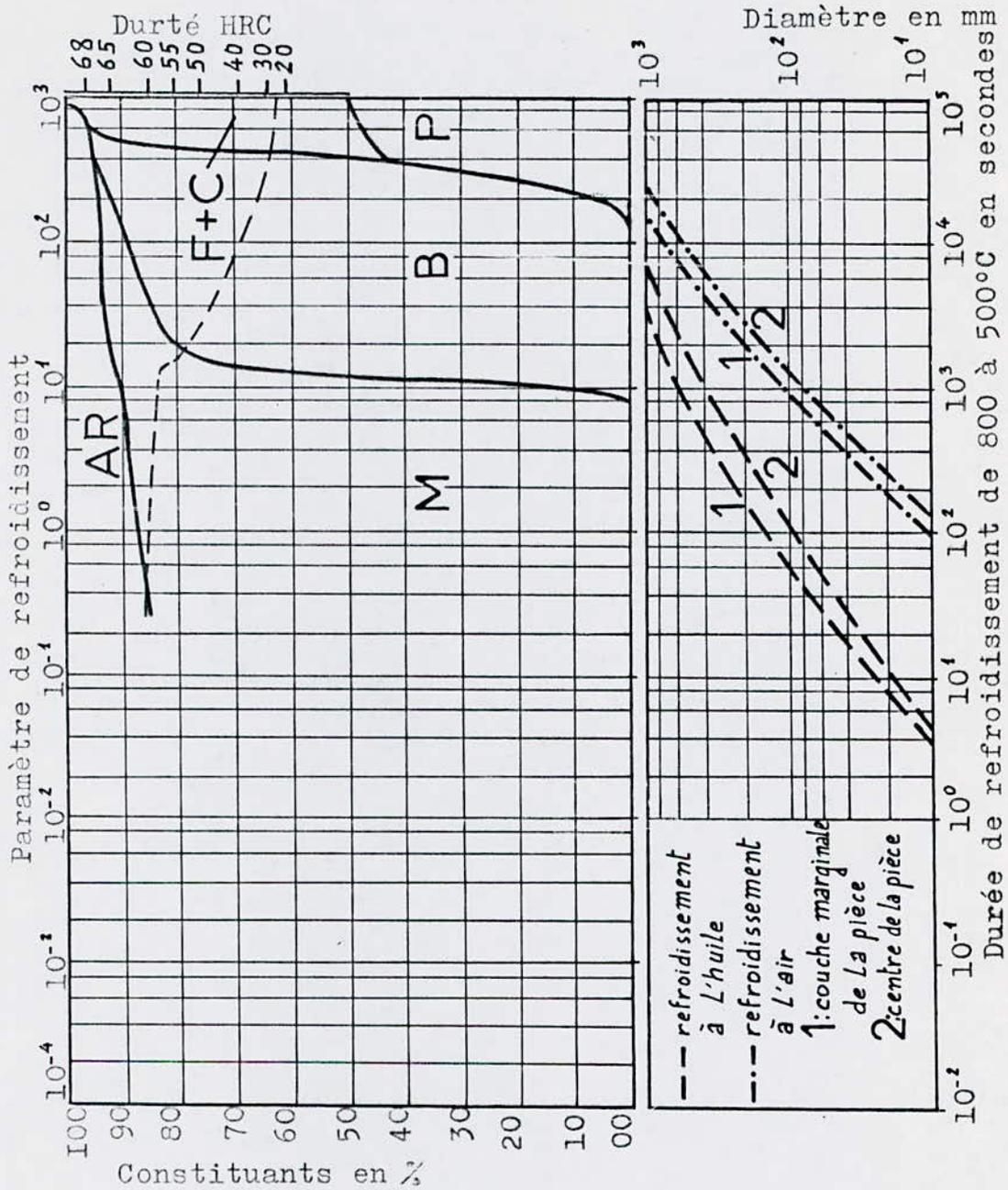


Fig. 30: Diagramme
 quantitatif
 des structures

55WC20

Durée de refroidissement de 800 à 500°C en secondes



Paramètre de refroidissement c'est: la durée de refroidissement de 800 à 500°C en $s \times 10^{-2}$

Fig.31: Diagramme quantitatif des structures 50NCL3

-- REMARQUE :

On a remarqué que les aciers qui ont subi une trempe à l'azote hydrogéné sous une pression de trois bars, ne présentent pas de défauts de trempe, cela est dû à l'uniformité de la vitesse de refroidissement et au faible coefficient de transmission thermique (R^*)

$$R^*(\text{azote}) = 600 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

$$R^*(\text{huile}) = 1800 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

$$R^*(\text{eau}) = 3100 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

Vu la structure martensitique et les propriétés qui en découlent, on peut affirmer que le deuxième revenu n'a pas une importance capitale pour ces aciers lors d'une trempe à l'azote hydrogéné (3 bars).

3 -ESSAI DE TRACTION :

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction et généralement jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.

On impose en général une déformation croissante à une éprouvette sur laquelle on a tracé deux repères initialement distants de L_0 et on mesure simultanément l'effort F et l'allongement $(L - L_0)$.

Cette définition donne la possibilité de deux exploitations différentes :

- La première aboutit au diagramme conventionnel.
- La deuxième aboutit au diagramme rationnel.

3-1. FORME DE L'EPROUVETTE : NF A 03 151.

Un très grand nombre de types d'éprouvettes existent suivant la forme du produit (barres, fils, ...) et la nature du matériau .

Dans notre cas, les éprouvettes sont usinées, elles comportent une partie calibrée et deux têtes d'amarrage (Fig:32), suivant les dimensions suivantes :

d = diamètre de la section circulaire = 10 mm

L_0 = Longueur initiale entre repères = $K\sqrt{S_0}$

avec : $K = 5,65$ et : $S_0 = \pi d^2/4$ = Section initiale

donc : $L_0 = K\sqrt{\pi d^2/4} = 50,10$ mm

L_c = Longueur de la partie calibrée = 62,5 mm

L_t = Longueur totale de l'éprouvette = 124,5 mm

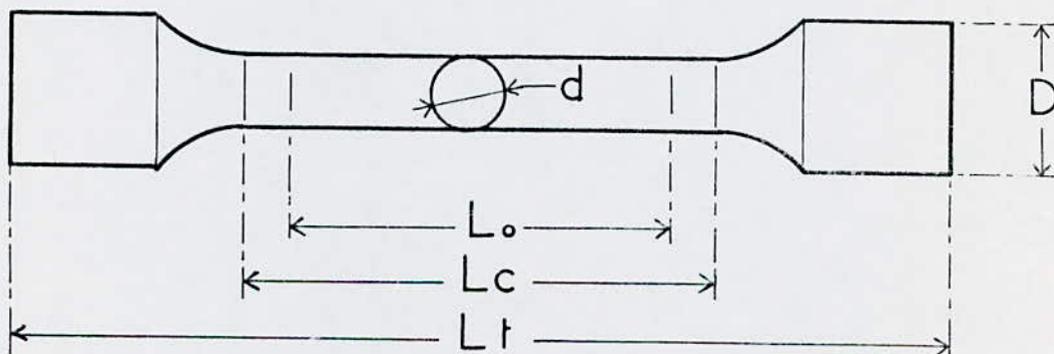


Fig : 32 : Représentation de l'éprouvette de traction

3-2. DIAGRAMME CONVENTIONNEL :

Le diagramme de traction est dit conventionnel lorsque l'on rapporte respectivement les mesures de résistance unitaire et d'allongement unitaire aux valeurs initiales S_0 et L_0 de l'éprouvette.

-- Forme classique d'un diagramme de traction :

Le diagramme de traction représente l'évolution de la charge unitaire $R = F/S_0$ en fonction du taux d'allongement

$$A = ((L - L_0)/L_0) \times 100\%$$

Les diverses régions sont :

OA : Domaine élastique à déformation réversible : $R_e = E \times A$

Le coefficient de proportionnalité E est le module d'YOUNG

A : Limite du domaine élastique.

AB : Domaine de déformation permanente homogène ou de déformation plastique répartie.

B : Point de charge maximale ou début de la striction.

BC : Domaine de striction ou de déformation plastique localisée.

C : Point de rupture de l'éprouvette.

4 - PRESENTATION DES RESULTATS PRATIQUES DE TRACTION :

xx Pour l'acier 55WC20 :

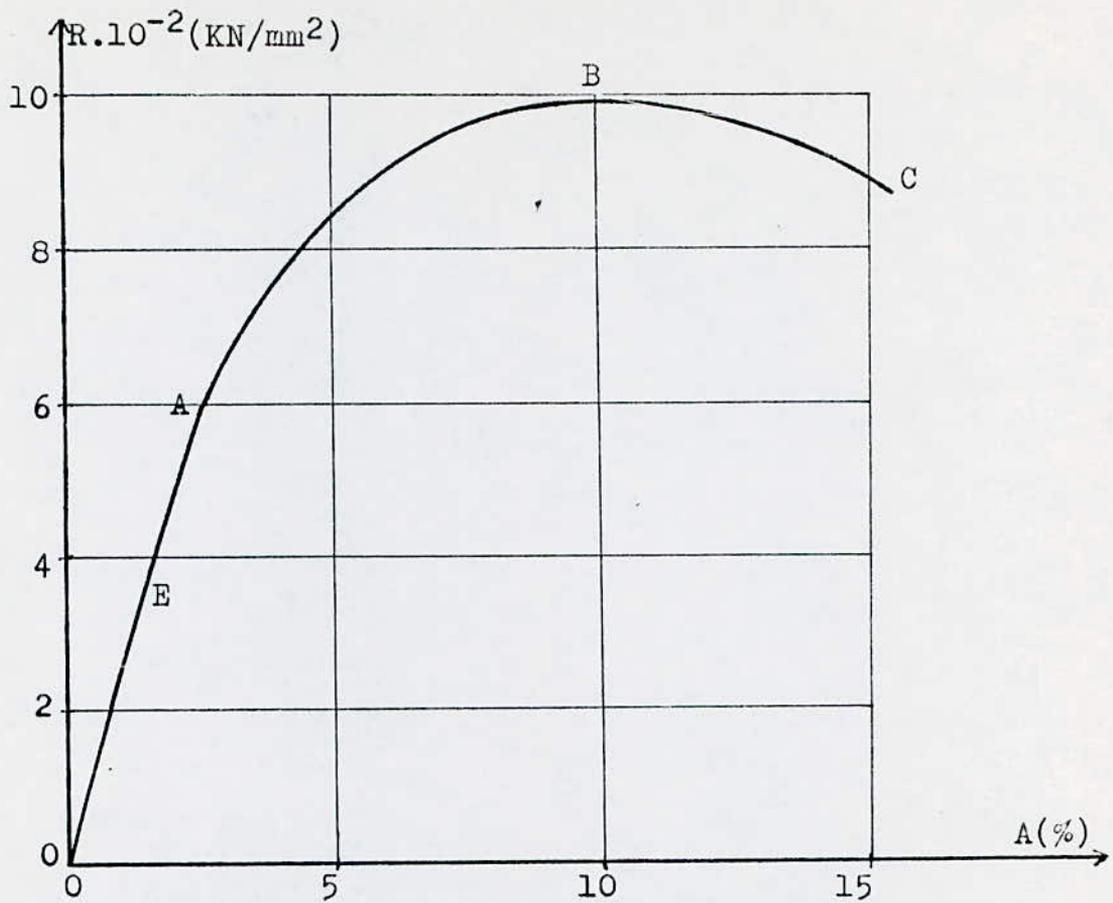


Fig.33 : Diagramme de traction conventionnel de l'éprouvette à l'état recuit (55WC20).

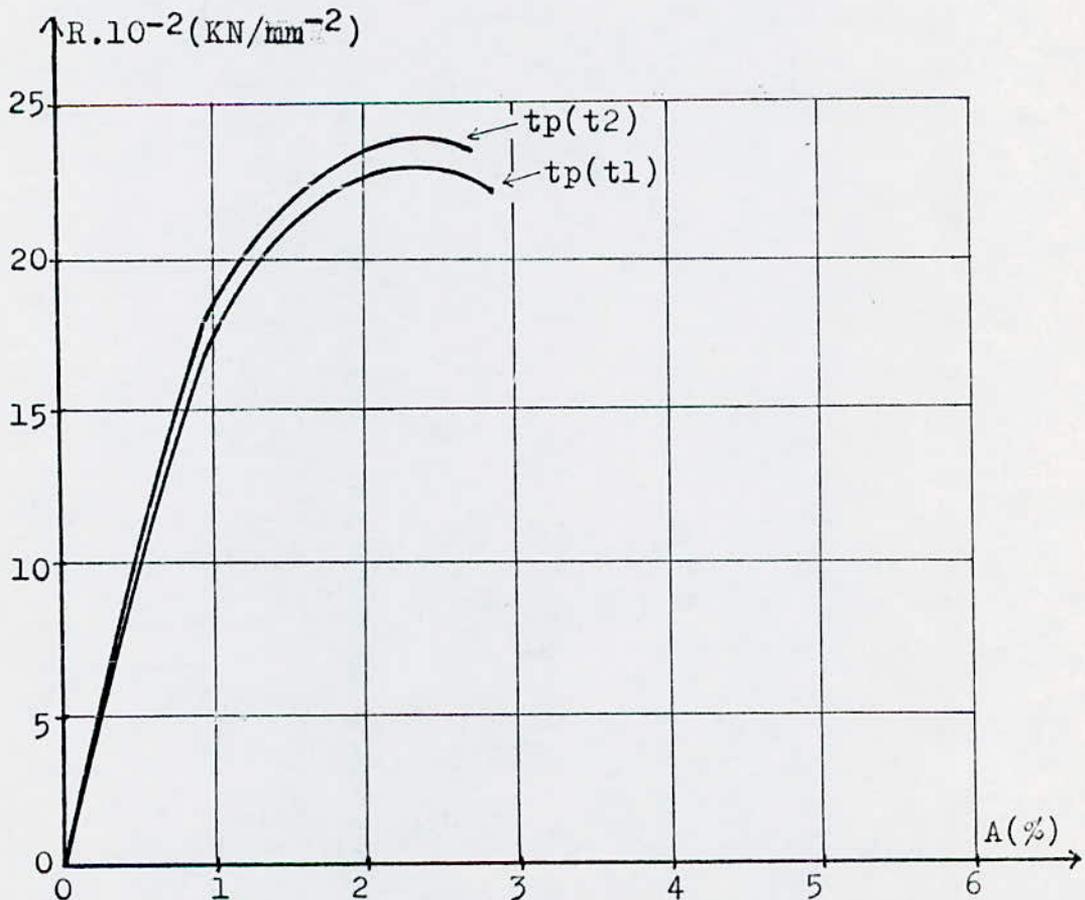


Fig.34 : Diagramme de traction conventionnel de l'éprouvette à l'état trempe (55WC20).

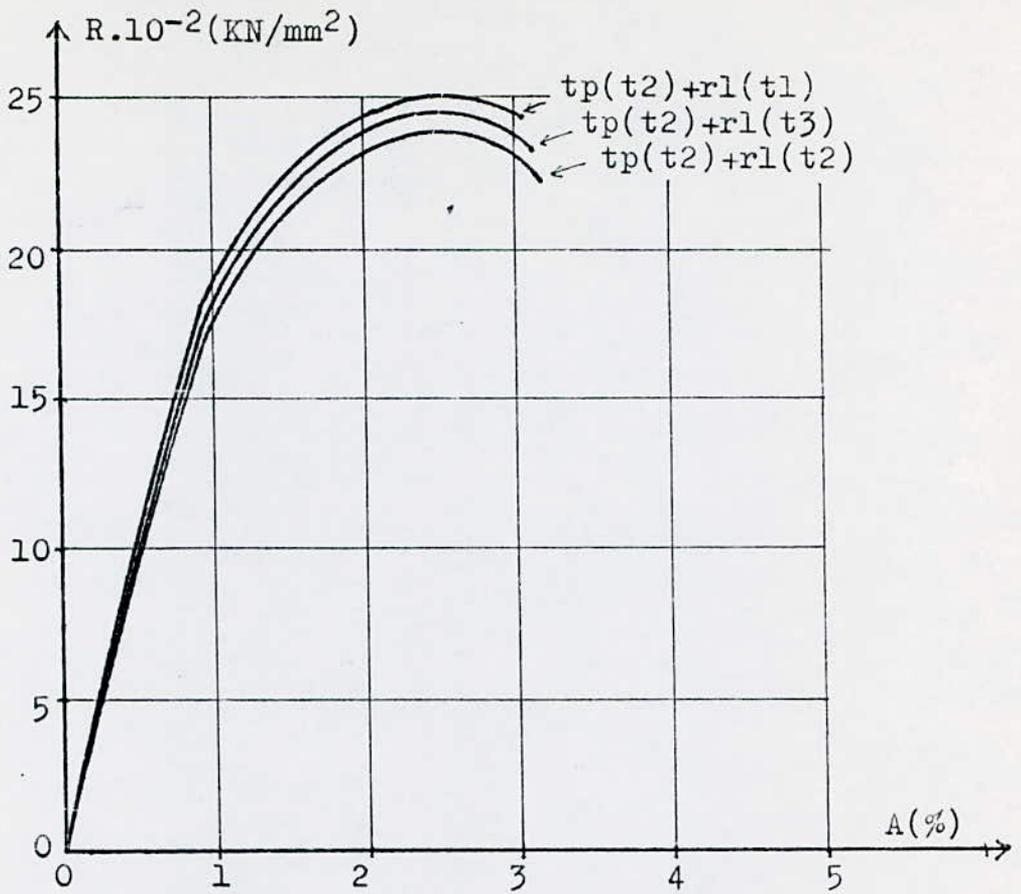


Fig.35 : Diagramme de traction conventionnel de l'éprouvette après une trempe(t2) plus le 1^{er} revenu.(55WC20).

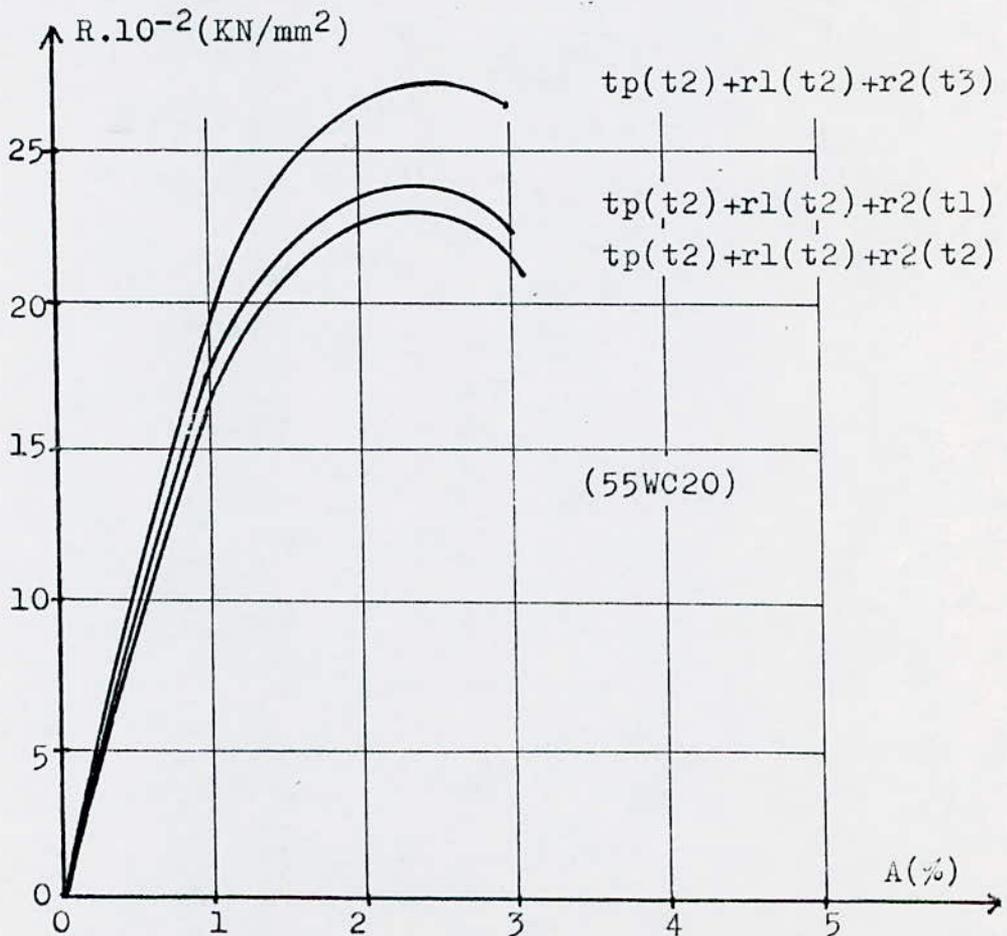


Fig.36 : Diagramme de traction conventionnel des éprouvettes après une trempe(t2) + le 1^{er} revenu(t2) + le 2^{eme} revenu

4-1. RESULTATS A EXPLOITER SUR LES DIAGRAMMES :

- a) La limit d'élasticité : Elle correspond à la charge maximale limitant le domaine élastique.

$$R_e = F_e/S_0$$

F_e : Charge enregistrée au point A

- b) Le module de Young : E

- c) La résistance à la traction R_m : Elle correspond à la charge maximale au point B rapportée à la section initiale de l'éprouvette.

$$R_m = F_m/S_0$$

F_m : Charge enregistrée au point B.

- d) L'allongement relatif A_r : Il est mesuré sur l'éprouvette rompue entre deux repères dont l'écartement initiale était L_0 , la distance après rapprochement des deux morceaux d'éprouvette étant L_u .

$$A_r = ((L_u - L_0)/L_0).100 \%$$

- e) La striction Z : C'est la variation de la section à l'endroit de la rupture.

$$Z = ((S_0 - S_u)/S_0).100 \%$$

Type de traitement	Température de traitement (°C)	Durée de traitement (mn)	Re.10 ⁻² KN/mm ²	E.10 ⁻² KN/mm ²	Rm.10 ⁻² KN/mm ²	Ar%	Z %.10 ²
Recuit	680°C	90	6,06	2,36	10,08	12,8	11,35
Trempe à l'eau	880	t1	17,14	18,53	23,43	2,8	2,72
		t2	18,21	19,68	24,45	2,7	2,63
		t3	/	/	/	/	/
1 ^{er} REVENU après - Une trempe tp(t2)	250	t1	18,11	20,12	25,08	2,9	2,82
		t2	16,93	18,70	23,81	3,17	3,07
		t3	17,44	19,28	24,47	3,1	3,01
2 ^{eme} Revenu après -Une trempe tp(t2) -Un 1 ^{er} revenu t2	200°C	t1	17,57	18,50	23,66	2,95	2,86
		t2	16,93	17,37	22,92	3,05	2,96
		t3	19,63	19,82	27,20	2,9	2,82

Tableau. 6 : Résumé général des caractéristiques mécaniques pour un acier 55WC20 subissant un cycle thermique complet.

-- Interprétation des résultats :

D'après les valeurs obtenues après traitement on remarque une élévation des caractéristiques de R_e, E, R_m et une diminution de ceux de A et Z chaque fois que le temps de traitement est long (Tab:6)

Les caractéristiques relatives à l'état recuit et à l'état trempé présentent une différence importante (Tab:6), où après le revenu les aciers étudiés présentent une légère diminution des valeurs de R_e, E, R_m chaque fois que le temps de traitement est long, ce qui est due essentiellement à la relaxation des contraintes internes, et au faible adoucissement de la martensite primaire (lors d'un long maintien de revenu), ce qui est récomposé par la précipitation de carbures de tungstène qui sont susceptibles d'augmenter les valeurs de R_e, E, R_m tel est le cas après les revenus $r_2(t_2)$ et $r_2(t_3)$. (Fig:36).

La courbe et les valeurs de traction après une trempe (t_3) n'ont pas été obtenues à cause de l'état physique de l'éprouvette qui présente une très importante fissure

xx Présentation des courbes de traction pour l'acier 50NC13 :

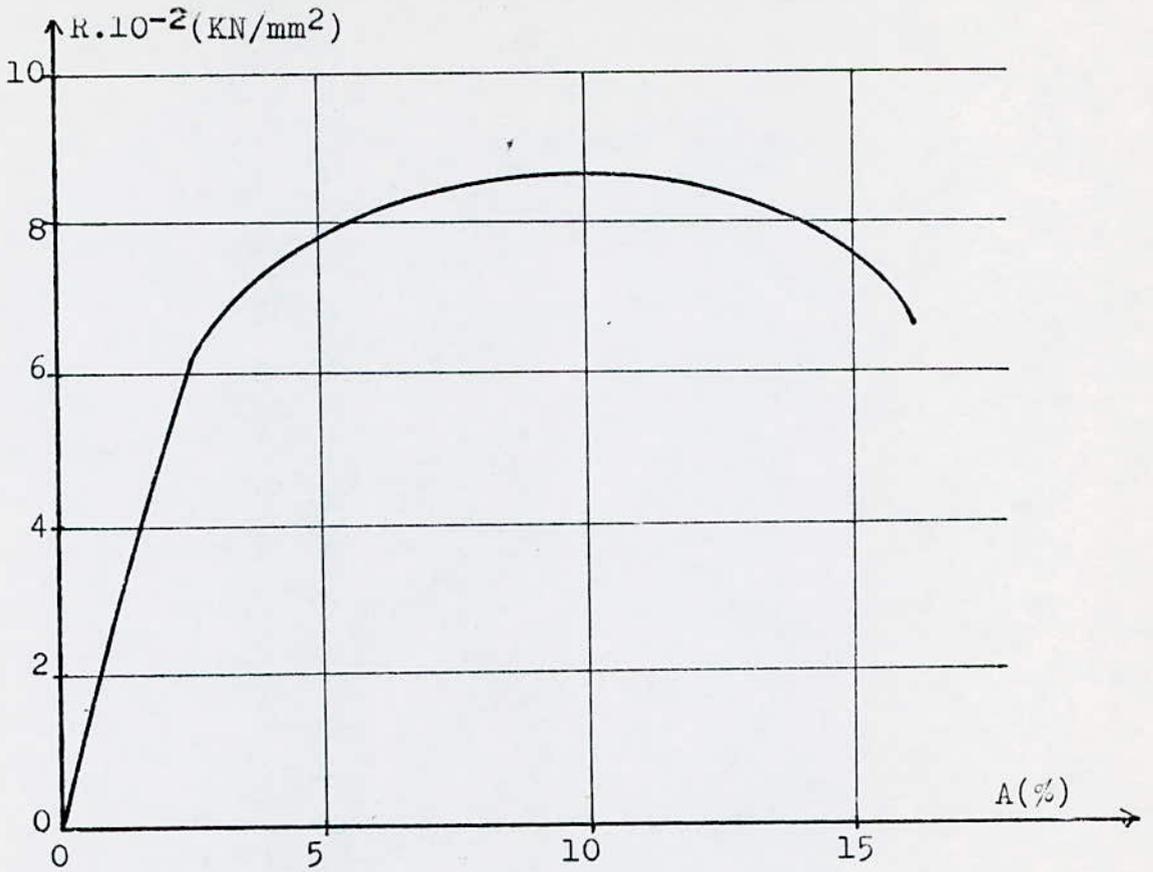


Fig.37 : Diagramme de traction conventionnel de l'éprouvette à l'état recuit.(50NC13).

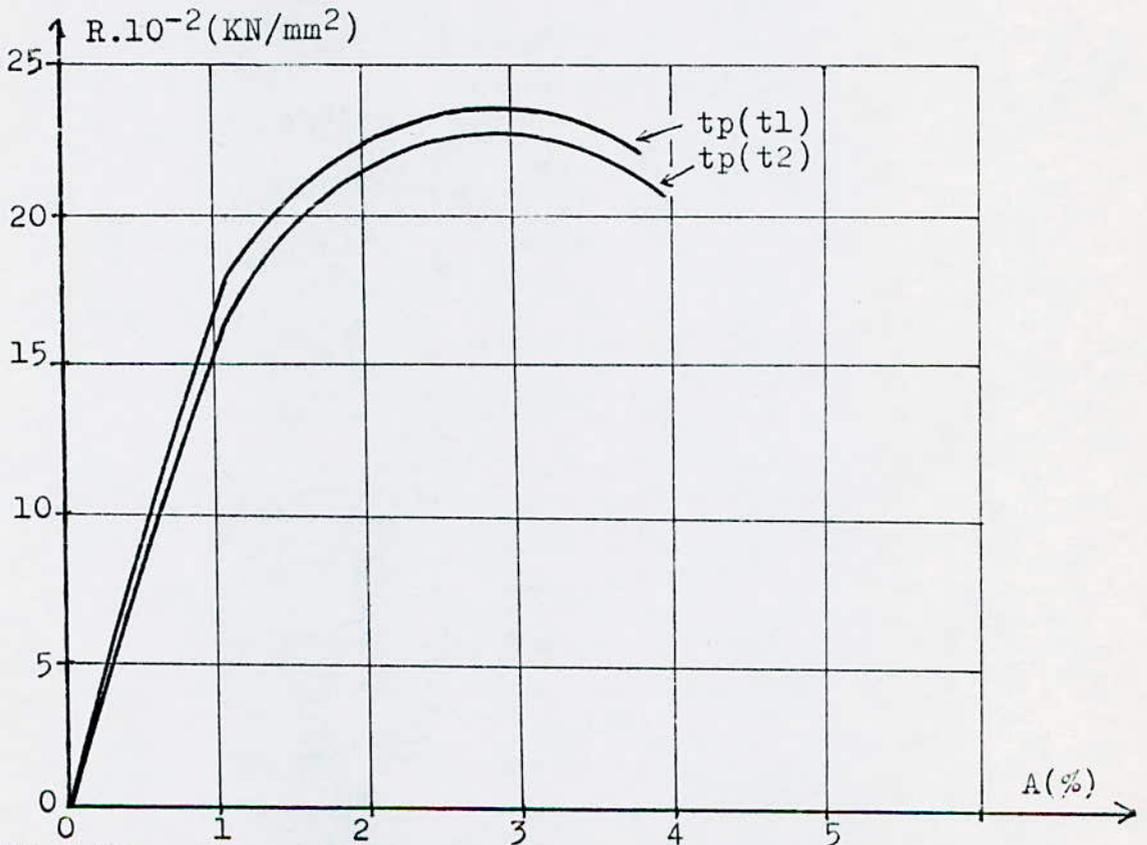


Fig.38 : Diagramme de traction conventionnel de l'éprouvette à l'état trempé.(50NC13).

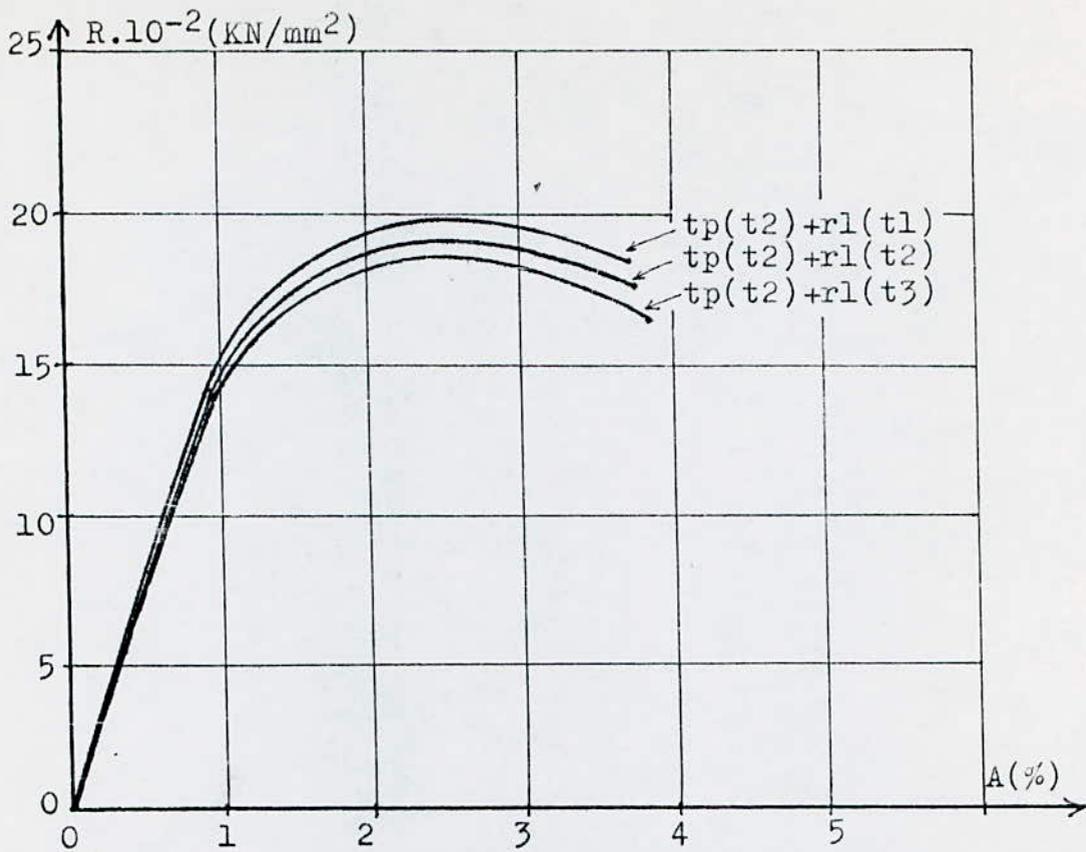


Fig.39 : Diagramme de traction conventionnel de l'éprouvette après une trempe(t2) et un 1^{er} revenu.(50NC13).

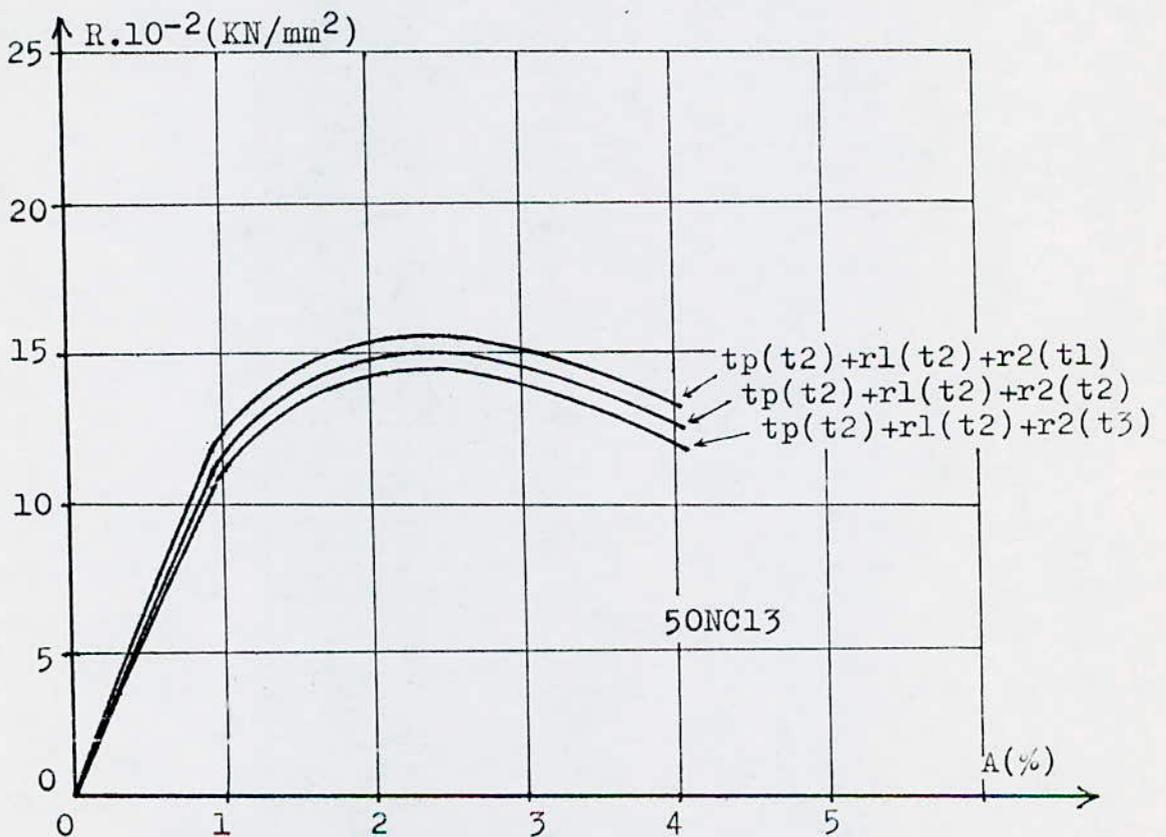


Fig.40 : Diagramme de traction conventionnel de l'éprouvette après une trempe(t2), un 1^{er} revenu(t2) et un 2^{eme} revenu

Type de traitement	Température de traitement(°C)	Durée de traitement(mm)	Re.10 ⁻² KN/mm ²	E.10 ⁻² KN/mm ²	Rm.10 ⁻² KN/mm ²	A, %	Z % .10 ²
Recuit	680°C	90	6,22	2,56	8,63	16,4	14,09
Trempe à l'eau	860	t1	17,73	17,73	23,47	3,8	3,66
		t2	16,07	16,07	22,58	3,92	3,77
		t3	/	/	/	/	/
1 ^{er} revenu après -une trempe tp(t2)	250°C	t1	14,16	16,18	19,51	3,62	3,49
		t2	13,75	15,36	18,83	3,65	3,52
		t3	13,49	14,99	18,21	3,8	3,66
2 ^{eme} revenu après -Une trempe tp(t2) -Un 1 ^{er} revenu t2	200°C	t1	11,76	12,99	15,61	4,02	3,86
		t2	10,96	12,04	15,0	4,05	3,89
		t3	10,66	11,40	14,41	4,07	3,91

Tableau.7 : Résumé général des caractéristiques mécaniques pour un acier 50NCl3, subissant un cycle thermique complet.

-- Interprétation des résultats :

La représentation des courbes de traction ainsi que les valeurs des caractéristiques mécaniques (Tab:7), après recuit (Fig:37) et après trempe (Fig:38) sont fort intéressants, par contre après trempe et les traitements de revenu (le 1^{er} et le 2^{eme} revenu) les résultats obtenus présentent une décroissance apparente des caractéristiques de Re, E et Rm. De plus, leur diminution est d'autant plus importante que la durée de maintien est prolongée lors des revenus, ce qui est dû certainement à la détente des contraintes internes, au faible adoucissement de la martensite primaire et surtout à la présence du Nickel qui diminue la stabilité des carbures.

La courbe après trempe $t_p(t_3)$ n'a pas été présentée à cause d'aberrants résultats obtenus, qui sont dus à une très importante fissure de l'éprouvette de bout en bout.

5 -RELATION ENTRE LES RESULTATS DE DURETE ET DE TRACTION :

Pour chaque nuance d'acier, il existe une relation entre la dureté et la résistance à la traction R_m qui est obtenu d'une façon indirecte, par la combinaison entre les résultats de deux essais mécaniques et ceci quelque soit le traitement thermique.

Le tableau suivant présente les résultats pratiques :

55WC20		50NC13	
$R_m \cdot 10^{-2} (KN/mm^2)$	HRC	$R_m \cdot 10^{-2} (KN/mm^2)$	HRC
23,43	56,75	23,47	57,25
24,45	60,01	22,58	59,58
25,08	58,92	19,51	55,62
23,81	57,50	18,88	55,12
24,47	58,08	18,21	55,00
23,66	56,86	15,61	51,6
22,92	56,40	15,0	50,7
27,20	56,62	14,41	51,0

Tableau.8 : Résultats pratiques de R_m et HRC;

La représentation suivante permet de compare les deux nuances d'aciers.(Fig.41).

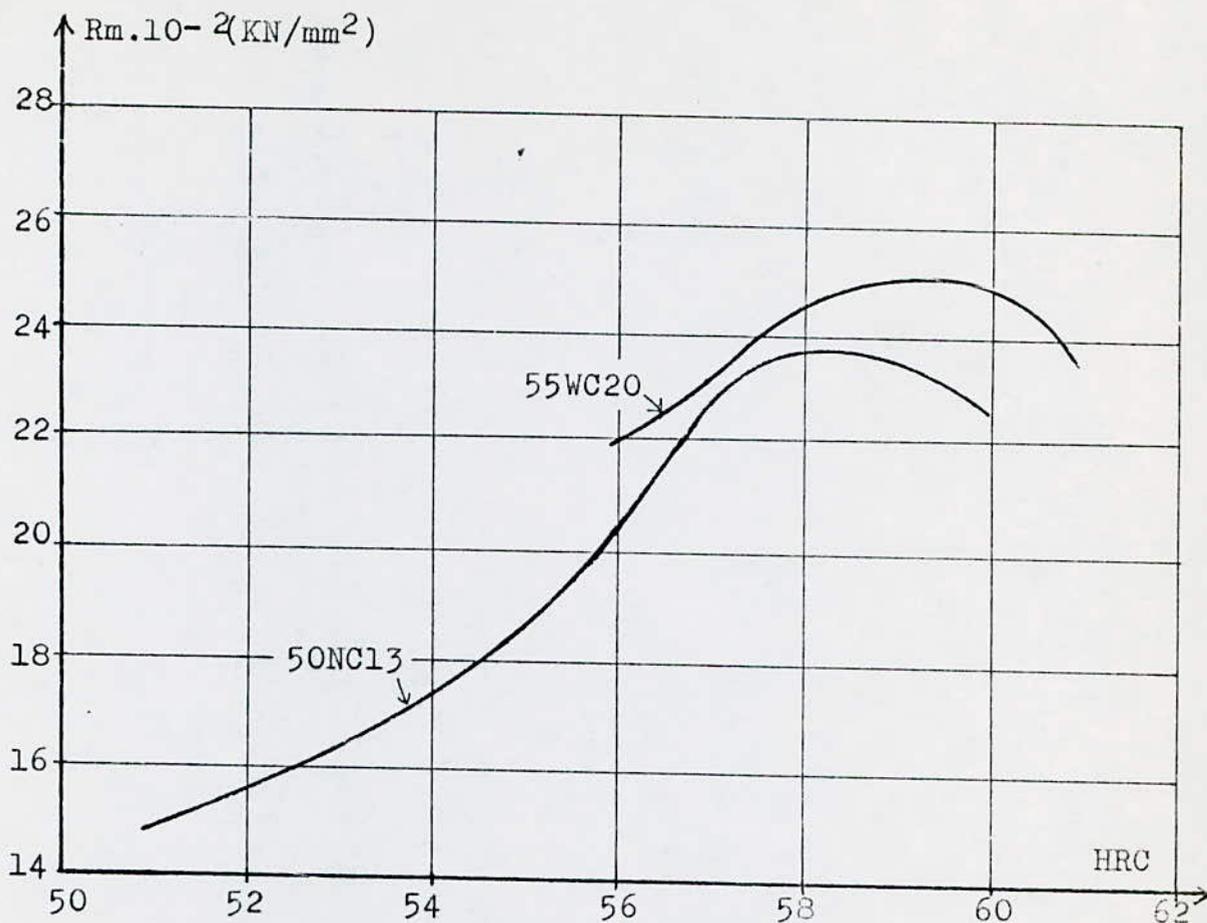


Fig.41 : Représentation de la relation Rm-HRC.

-- Interprétation des courbes :

La représentation d'une telle relation entre deux essais mécaniques (Traction - Dureté) présente une évolution simultanée de Rm en fonction de la dureté HRC, ce qui nous ramène à un choix plus adéquat de la nuance d'acier et de son traitement donnant les bonnes valeurs de dureté et de traction

Donc, on peut dire, d'après les courbes de la Fig/41 que le meilleur acier c'est à dire le plus résistant et le plus dur c'est le 55WC20.

L'intervalle du meilleur compromis entre les deux caractéristiques pour l'acier 55WC20 c'est l'intervalle (59-60)HRC. Tandis que le meilleur intervalle pour l'acier 50NC13 c'est l'intervalle (58 - 59)HRC.

6 -ESSAI DE RESILIENCE :

L'essai le plus classique et le plus ancien pour caractériser la fragilisation du métal sous l'action d'un choc est l'essai de résilience sur éprouvette entaillée.

La résilience est l'énergie exprimée en joules par cm^2 , nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.

$$\text{Resilience} = \frac{\text{Energie absorbée par la rupture } W \text{ (Joules)}}{\text{Section au droit de l'entaille } (\text{cm}^2)} = \text{KCU}$$

a) PRINCIPE DE L'ESSAI :

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de monton - pendule une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis (Fig:43). On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience.

b) EXECUTION DE L'ESSAI :

- Le couteau est écarté de la verticale à une hauteur h_0 correspondant à une énergie de départ $W_0 = 300$ Joules.
- On libère le couteau. Dans sa chute, en passant à la verticale il brise l'éprouvette.
- On mesure la valeur de l'énergie absorbée W . (Fig:42).

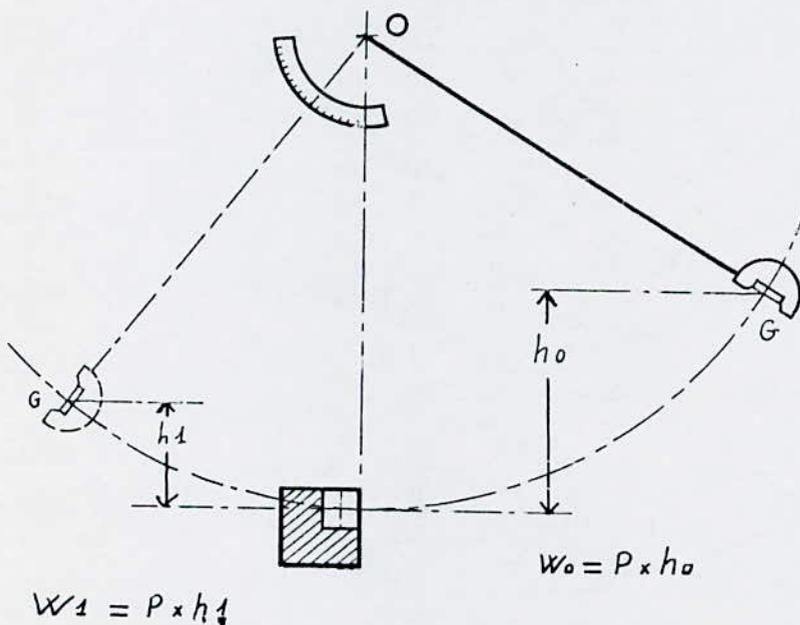


Fig: 42

Principe de la
machine de
résilience

xx Caractéristique de la machine : (Fig:42 et 43)

- Angle au sommet du couteau du mouton..... $30^{\circ} \pm 1^{\circ}$
- Bras du levier.....80 cm
- Masse de la roue.....19,69 kg
- Angle de chute..... $160^{\circ} 27'$

6-1. ESSAI CHARPY :

L'éprouvette est entaillée en U (Fig:43). (NF A 03-156)

- Longueur de l'éprouvette..... $55\text{mm} \pm 0,6$
- Hauteur et largeur de l'éprouvette..... $10\text{mm} \pm 0,11$
- Hauteur restant à fond d'entaille..... $5\text{mm} \pm 0,09$
- Rayon à fond d'entaille..... $1\text{mm} \pm 0,07$

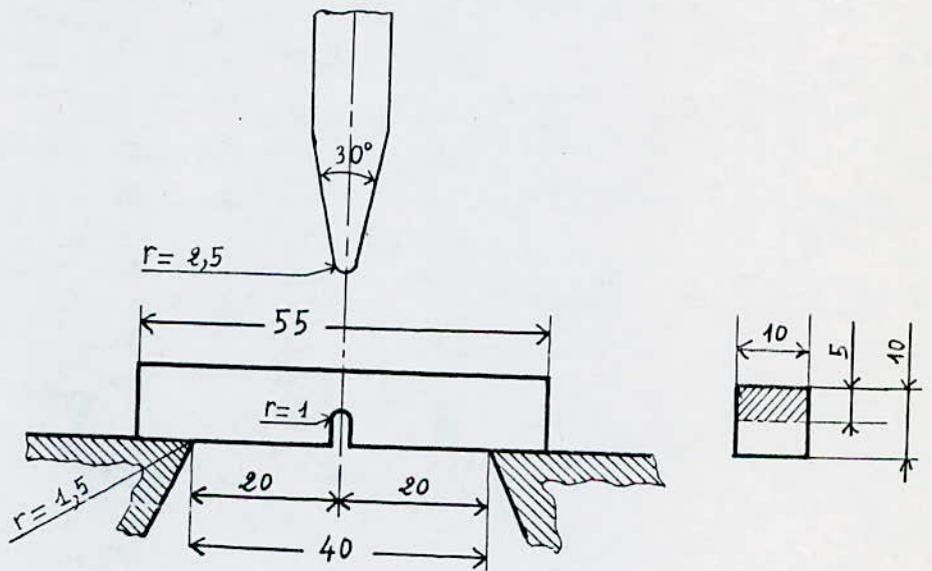


Fig: 43 : Disposition de l'éprouvette de resilience

7 -VALEURS DES RESILIANCES(KCU) AVANT ET APRES LES TRAITEMENTS :

Nuance des aciers (AFNOR)			55WC20	50NC13		
Type de traitement	Température de traitement(°C)		Durée de traitement(mn)		KCU (J/cm ²)	
Recuit	680		90		20	76
Trempe à l'eau	880 pour 55WC20	860 pour 50NC13	t1	10	3,2	2,9
			t2	20	3,9	4
			t3	30	4,2	5,1
1 ^{er} revenu après -Une trempe tp(t2)	250		t1	30	4,9	6,5
			t2	60	5,2	8,7
			t3	90	5,5	10,3
2 ^{eme} revenu après -Une trempe tp(t2) -Un 1 ^{er} revenu (t2)	200		t1	30	5,7	8,9
			t2	60	5,8	10,6
			t3	90	6,0	12,0

Tableau.9 : Valeurs des résiliences(KCU) en fonction du type de traitement.

xx Représentation graphique des résultats des résilience :

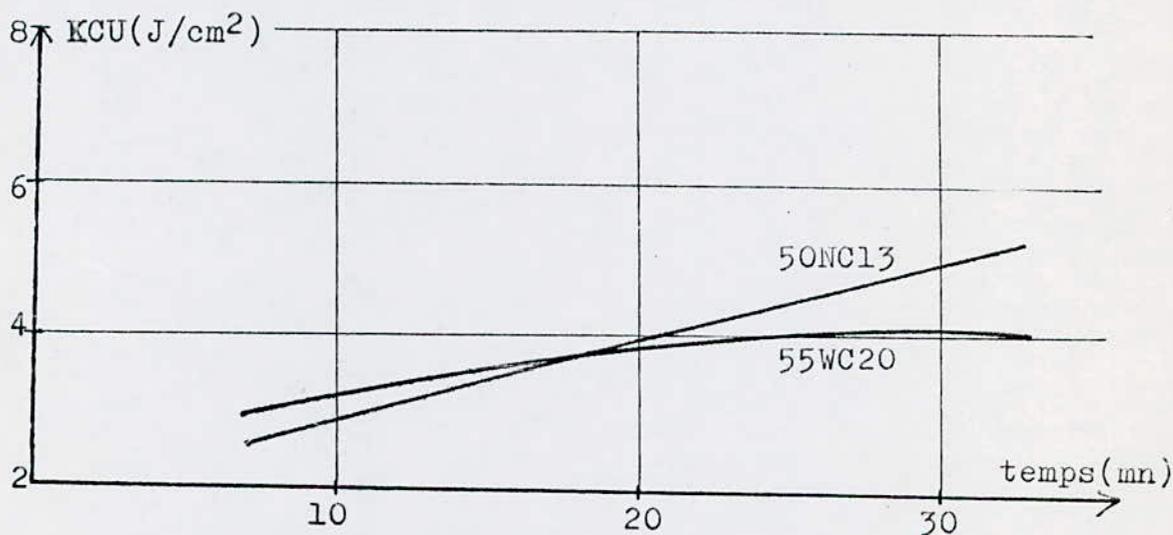


Fig.44 : Evolution de la résilience en fonction du temps d'austénitisation.(après trempe).

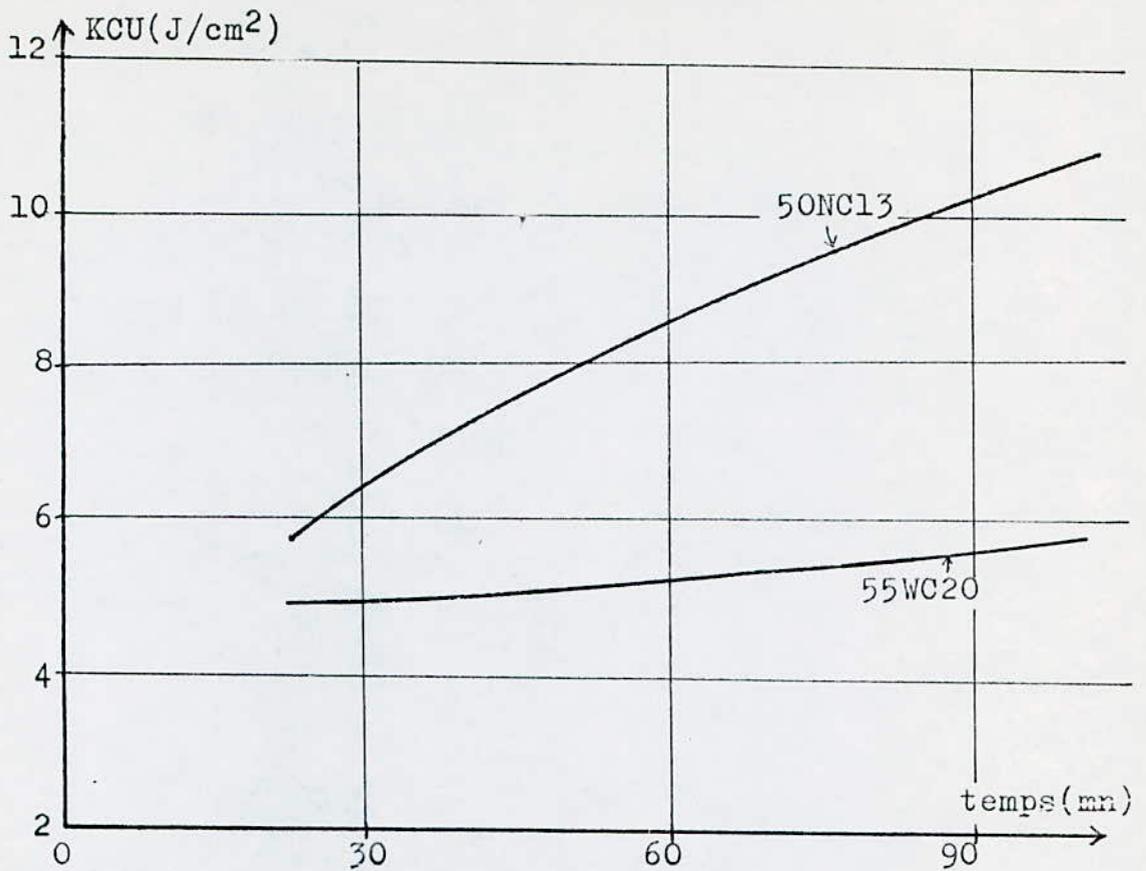


Fig.45 : Représentation de la resiliance en fonction du temps du 1^{er} revenu après une trempe $t_p(t_2)$.

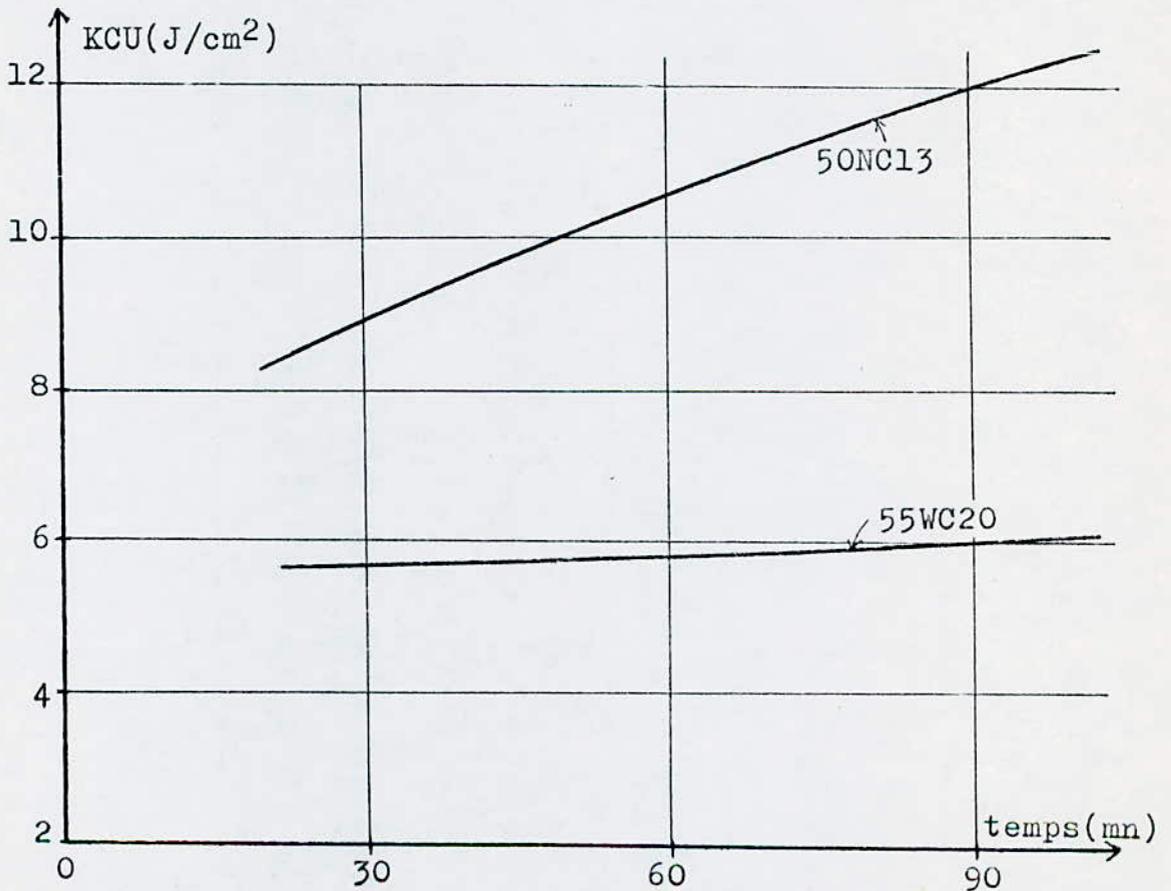


Fig.46 : Représentation de la résiliance en fonction du temps de 2^{eme} revenu après une trempe $t_p(t_2)$ et un 1^{er} revenu(t_2)

-- Interprétation des courbes :

A l'état recuit (Tableau:9) la valeur de la résilience est très importante pour l'acier 50NCl3 à cause de sa structure ferrito - perlitique, par contre pour le 55WC20 elle est moins importante vu la structure perlitique (Fig:30 et 31).

Mais après trempe on a une diminution de cette énergie (KCU) à cause de l'état métastable physico - chimique de l'éprouvette, et on remarque que plus le temps de traitement est long, plus l'énergie KCU est grande (Fig:45 et 46).

Ce qui est remarquable, c'est de voir une différence entre les courbes des deux nuances, car on a après le premier revenu, une augmentation de KCU du 50NCl3 plus importante en fonction du temps que pour le 55WC20 (Fig:45) et c'est le même cas après le deuxième revenu (Fig:46). Ce qui peut être expliqué (pour le 55WC20) par l'importance du carbone qui augmente la fragilité, de plus la présence des carbures de tungstène qui évitent l'adoucissement de la structure (Tableau:2), et pour l'autre nuance 50NCl3, on a la présence du Nickel qui diminue la stabilité des carbures, ainsi il adoucit la structure. (Ch, II. p, 4).

B/METHODES D'EXAMENS METALLOGRAPHIQUE :

1 -EXAMEN MACROSCOPIQUE : NF A'05-153.

L'examen macroscopique utilise l'oeil nu, une loupe bino-
culaire ou un banc macrographique conduisant à la mise en
évidence des répartitions d'inclusions ou de cavités et à
l'analyse morphologique des cassures.

1-1. PREPARATION DES ECHANTILLONS :

- Prépolissage (papier abrasif émeri 180, 400 et 600)
- Polissage de finition (émeri 1000 suivi de pâte diamantée 6μ)
- Attaque aux sels de cuivre (Tableau:10) pour observer les
fibrages.

Nature de l'attaque	Composition	Durée d'attaque
Attaque FRY n°1 (sels de cuivre)	-Chlorure cuivrique..... 1,5g -Acide chlorhydrique.....30ml -Eau..... 95ml -Alcool éthylique..... 30ml	2mn

Tableau.10 : Composition du sel de cuivre.

1-2. STRUCTURE MACROGRAPHIQUE :

-- Sans préparation : Après recuit, les aciers ont une très
bonne apparence physique (pas de déformation, fissure, ...) mais
après trempe on remarque :

+ En premier lieu, une corrosion plus importante qu'à l'état
recuit, lors d'un traitement dans un four à résistance
(Annexe C). Mais, dans le four sous vide cet état de corrosion
est inexistant (Annexe B).

+ En second lieu, l'apparition de criques (fissures) de trempe
lors d'un long maintien "tp(t3)" pour les dimensions des
éprouvettes déjà citées, qui sont très apparentes pour l'acier
55WC20 que pour l'acier 50NC13, ce qui est expliqué par

l'augmentation de la taille des grains austénitiques, par conséquent il y a fissuration des éprouvettes (après $t_p(t_3)$ pour les dimensions déjà données) suivant le fibrage du métal qui est observé après attaque.

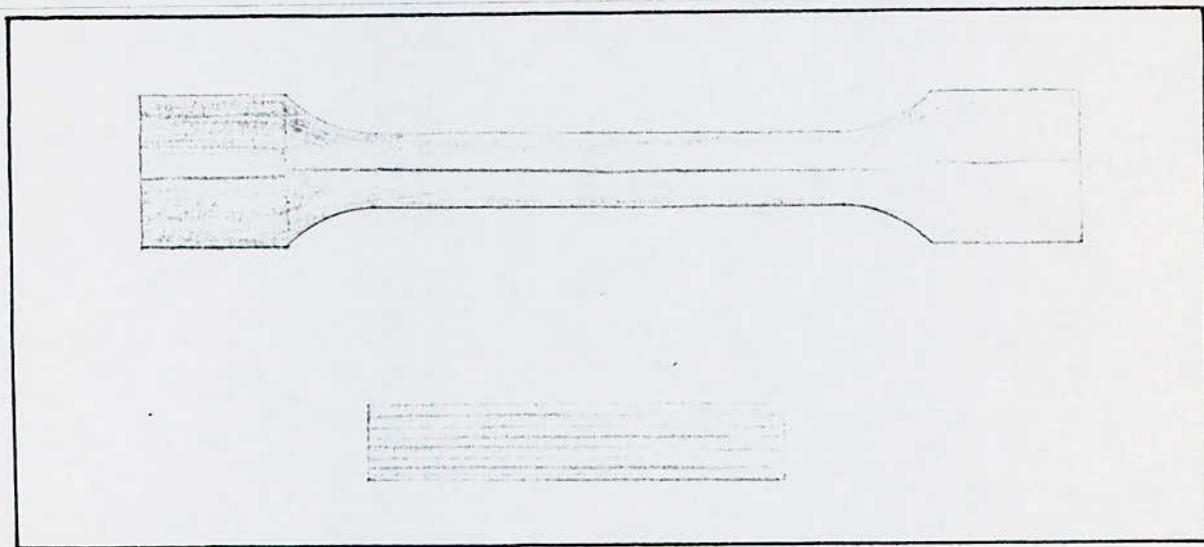


Fig.47 : Fissure et fibrage du métal après trempe à l'eau
Gx 1

a) Essai de résilience :

Cet essai donne en plus des énergies de rupture, des faciès et des surfaces de ruptures différentes

-- Etat recuit : Les éprouvettes présentent des faciès à nerfs où l'énergie de rupture est élevée due à un arrachement de matière, qui est bien observé dans la nuance 50NC13.

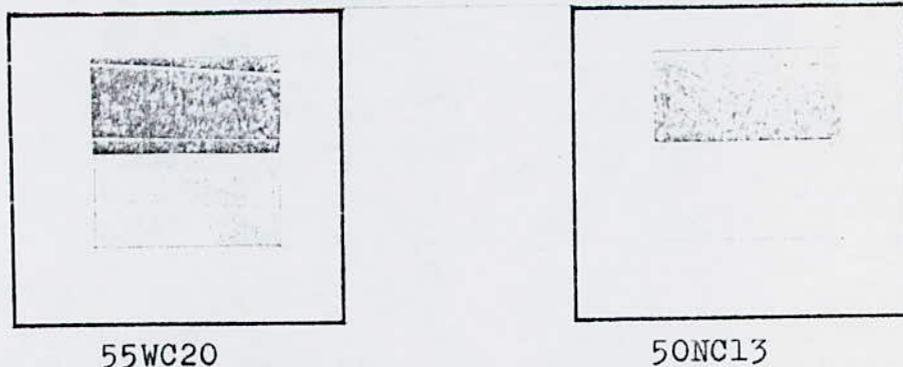
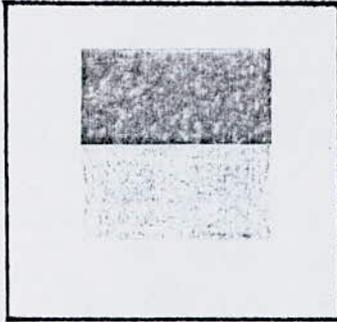
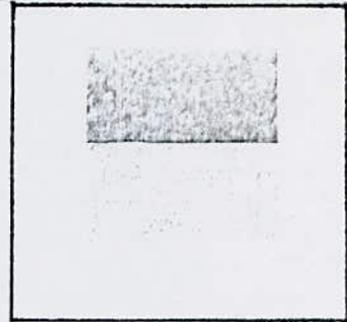


Fig.48 : Cassure des éprouvettes de résilience à l'état recuit
Gx 2,5

-- Etat trempé : Les éprouvettes présentent des faciès à grains (plages lisses) qui donnent une présentation de cassures fragiles, on remarque que les faciès de rupture sont d'autant plus lisses que le temps d'austénitisation est plus long.



55WC20, tp(t1)



55WC20, tp(t3)

Fig.49 : Cassure des éprouvettes de résilience après une trempe à l'eau. $G \times 2,5$

La comparaison des faciès des deux nuances nous permet de bien distinguer quel est le plus fragile. Le 55WC20 présente des faciès moins granuleux que le 50NC13 (pour un même temps d'austénitisation), ce qui est conforme au résultat pratique (Le 55WC20 est plus fragile que le 50NC13).



50NC13, tp(t1)

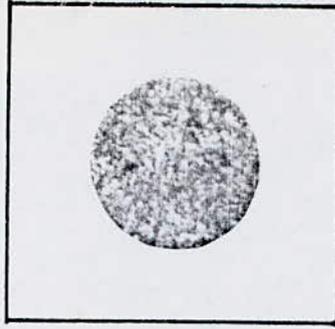


50NC13, tp(t3)

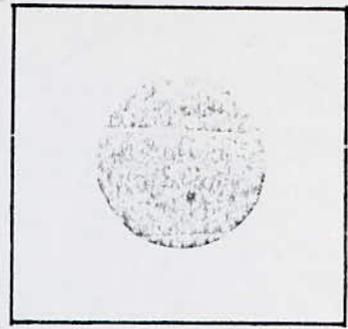
Fig.50 : Cassure des éprouvettes de résilience après une trempe à l'eau. $G \times 2,5$

b) Essai de traction :

Cet essai est réalisé au ralenti avec une vitesse de 1 mm/mn ce qui donne une meilleure appréciation de la nature de la rupture. Nous constatons un arrachement de matière plus apparent pour les éprouvettes après recuit de l'acier 50NC13 que l'acier 55WC20.



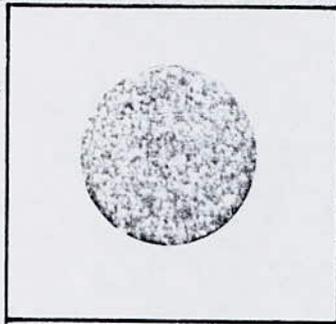
55WC20



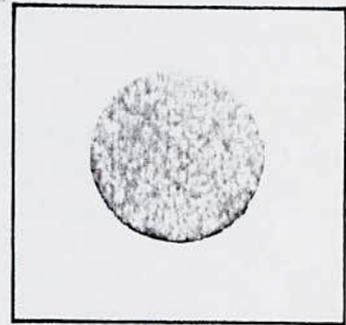
50NC13

Fig.51 : Arrachement de matière des éprouvettes de traction à l'état recuit. $G \times 2,5$.

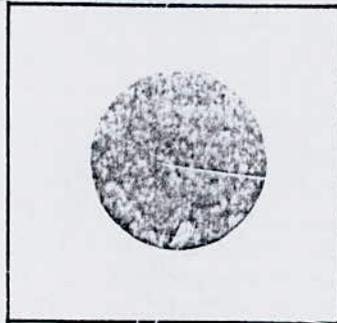
Mais après trempe cette arrachement devient moins important, essentiellement pour l'acier 55WC20.



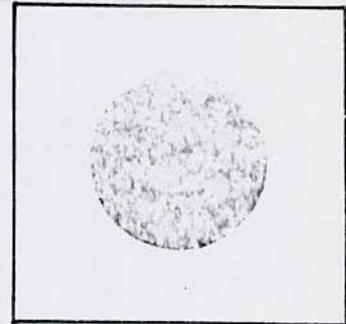
55WC20, tp(t1)



50NC13, tp(t1)



55WC20, tp(t3)



50NC13, tp(t3)

Fig.52 : Arrachement de matière des éprouvettes de traction après trempe à l'eau. $G \times 2,5$

Après revenu la surface de rupture devient de plus en plus rugueuse cela à cause de la ductilité des éprouvettes. Ce qui prouve que la ductilité présente en général un état d'arrachement de matière, par contre la fragilité présente un état de surface lisse et moins rugueux.

2 -EXAMEN PAR MICROSCOPIE OPTIQUE : NF 05-150.

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon, des inclusions non métalliques et des micro-fissures lors de l'observation.

2-1.PREPARATION DE LA SURFACE D'EXAMEN :

- Enrobage des échantillons.
- Prépolissage avec du papier abrasif émeri.180,400 et 600
- Polissage de finition avec du papier abrasif émeri 1000 suivi de la pâte diamantée 6μ .
- Attaque chimique au Nital (Tableau/11).

Désignation	Composition	ancien nom
C1:Solution alcoolique	- 3,5ml d'acide nitrique. $\rho=1,33g/l$ - 100ml d'éthanol pur. .Durée d'attaque: 20s (T°ambiante)	Nital

Tableau.11 : Composition du Nital.

2-2.STRUCTURE MICROGRAPHIQUE :



Fig.53 : Etat recuit , 55WC20 , Gx500

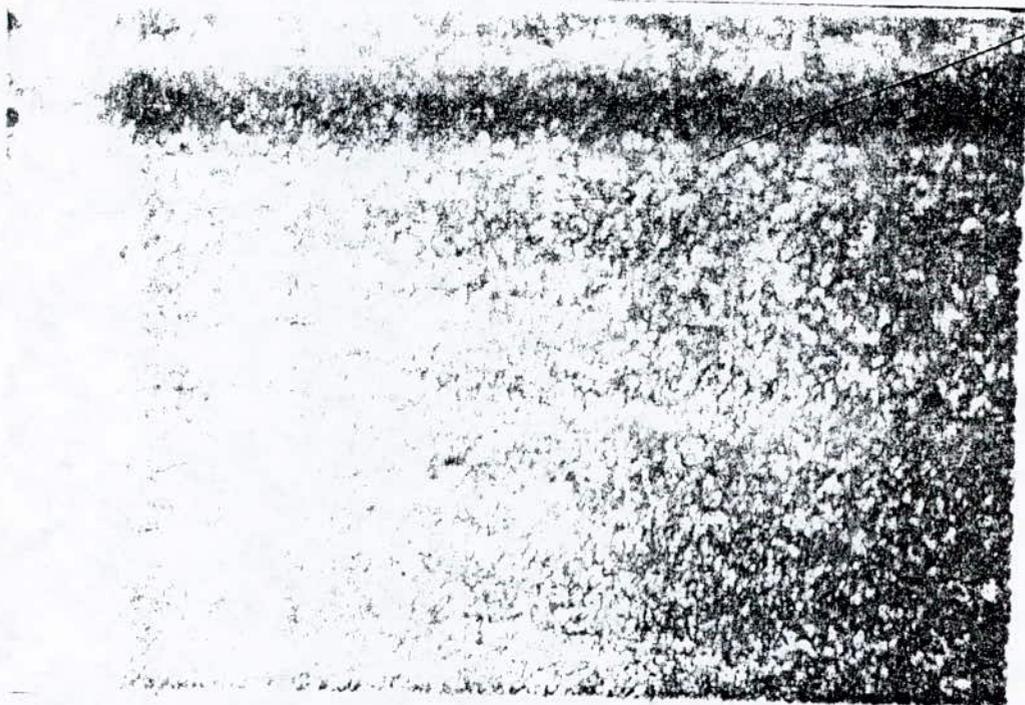


Fig.54 : 55WC20 ; G× 200 ; Trempe (t1) à l'eau.

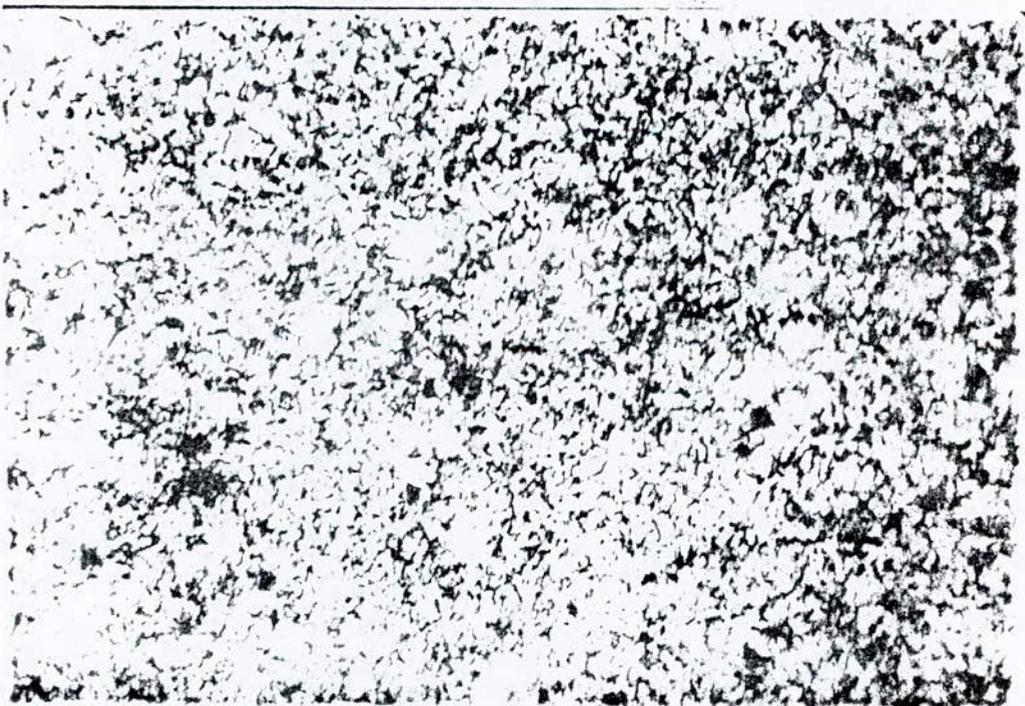


Fig.55 : 55WC20 ; G× 200 ; Trempe (t3) à l'azote.

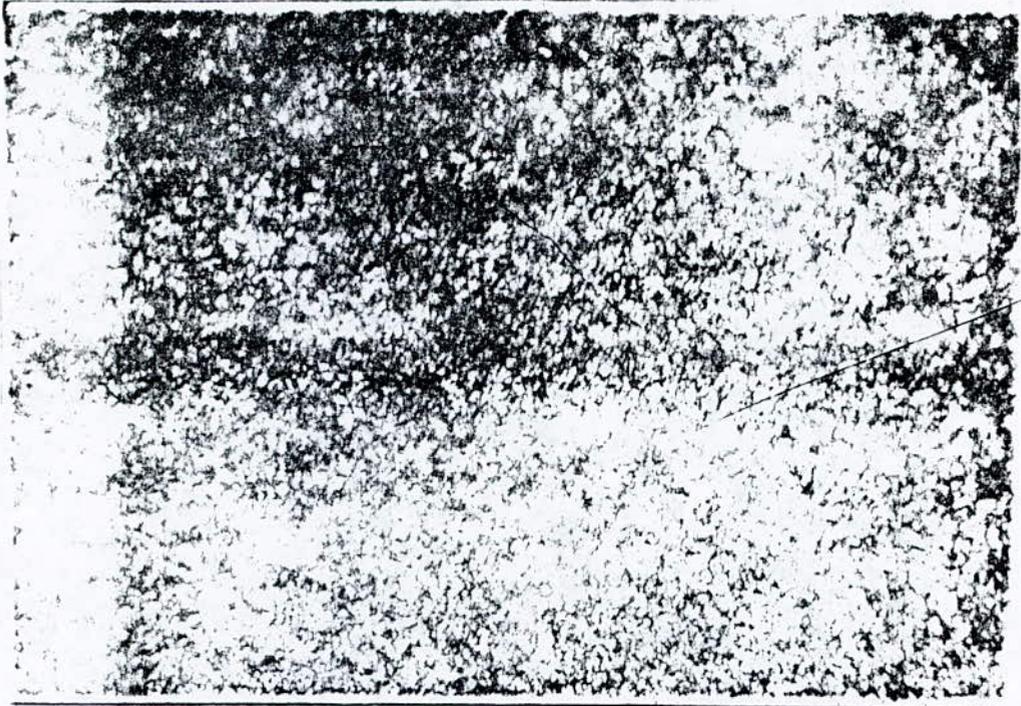


Fig.56 : 55WC20 ; G× 200 ; Trempe(t1)+ 1^{er}revenu(t2).



Fig.57 : 55WC20 ; G× 400 ; Trempe(t3)+ 1^{er}revenu(t2).

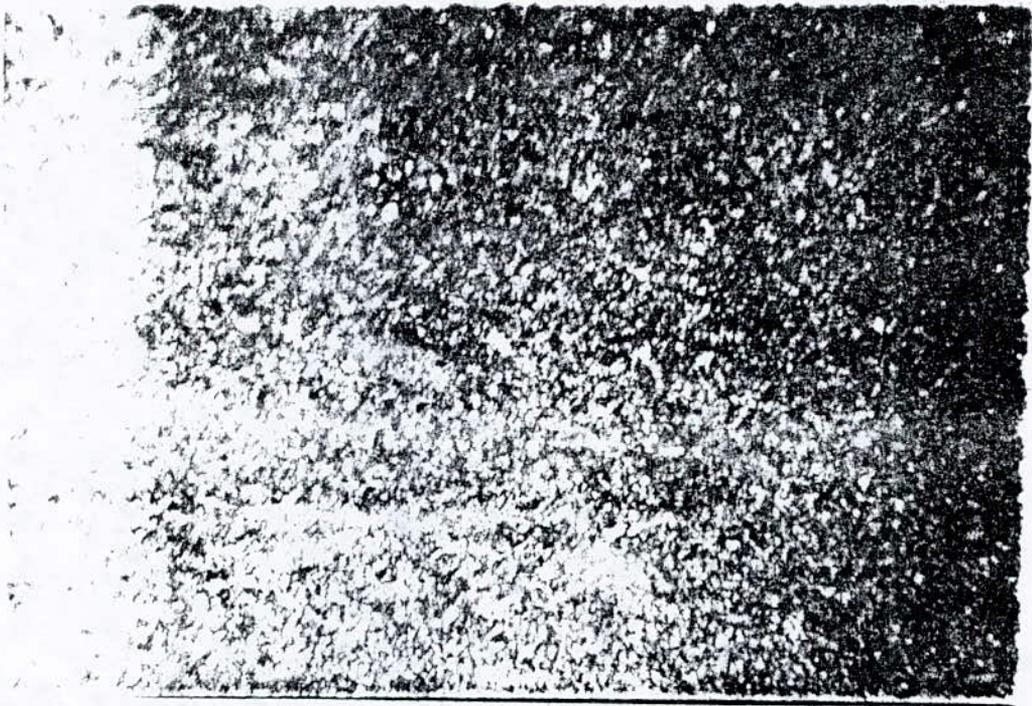


Fig.58 : 55WC20 ; G× 200 ; Trempe(t2)+ 1^{er} revenu(t2).



Fig.59 : 55WC20 ; G× 500 ; Trempe(t2)+ 1^{er} revenu(t1).

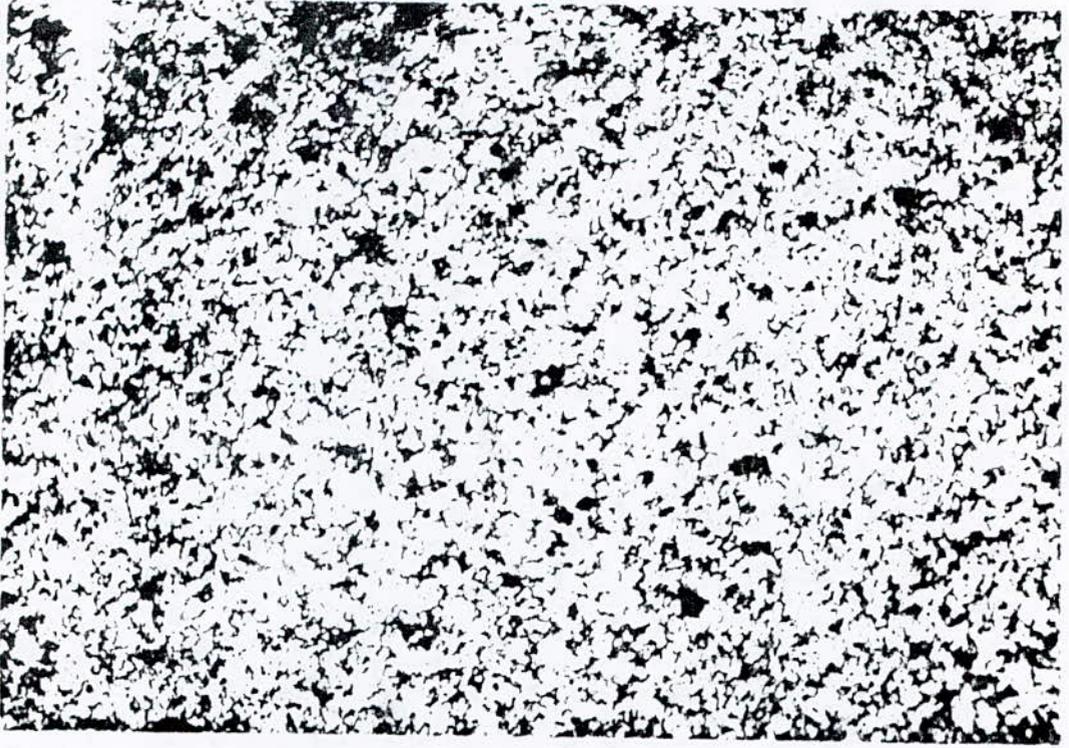


Fig.60 : 55WC20 ; Gx 500 ; Trempe(t1)+1^{er} revenu(t2)+2^{eme} revenu(t2)



Fig.61 : 55WC20 ; Gx 500 ; Trempe(t2)+1^{er} revenu(t2)+2^{eme} revenu(t2).

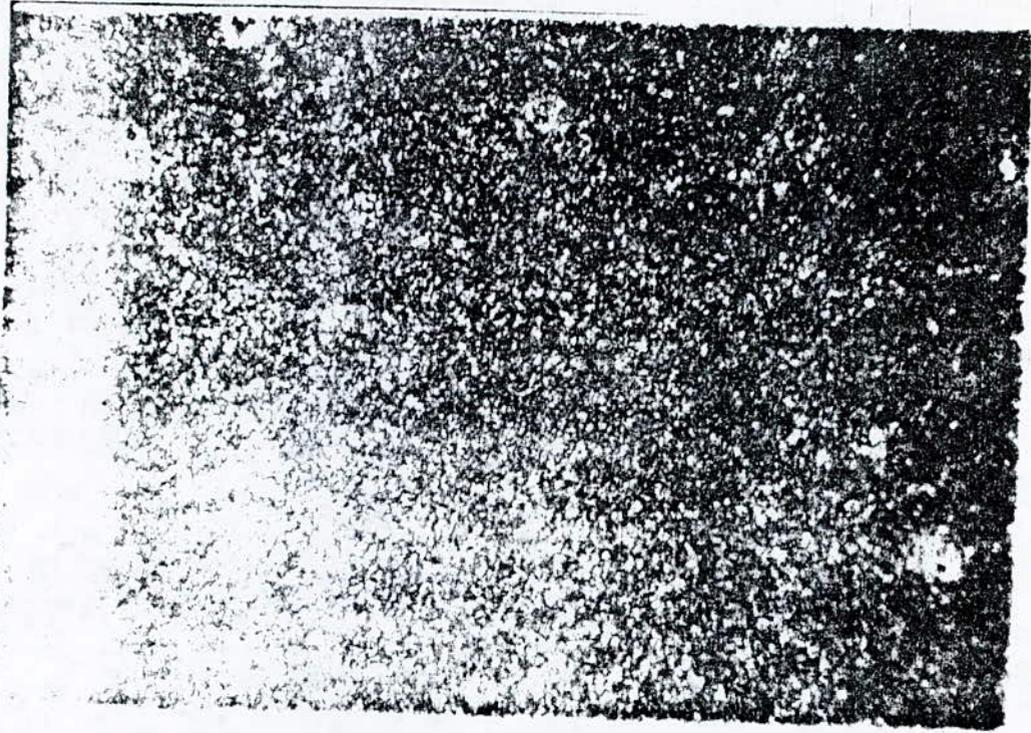


Fig.62: 55WC20 ; Gx 200 ; Trempe(t3)+1^{er} revenu(t2)+2^{eme} revenu(t2).



Fig.63: 55WC20 ; Gx 500 ; Trempe(t3)+ 1^{er} revenu(t2).
défaut de trempe (fissure).

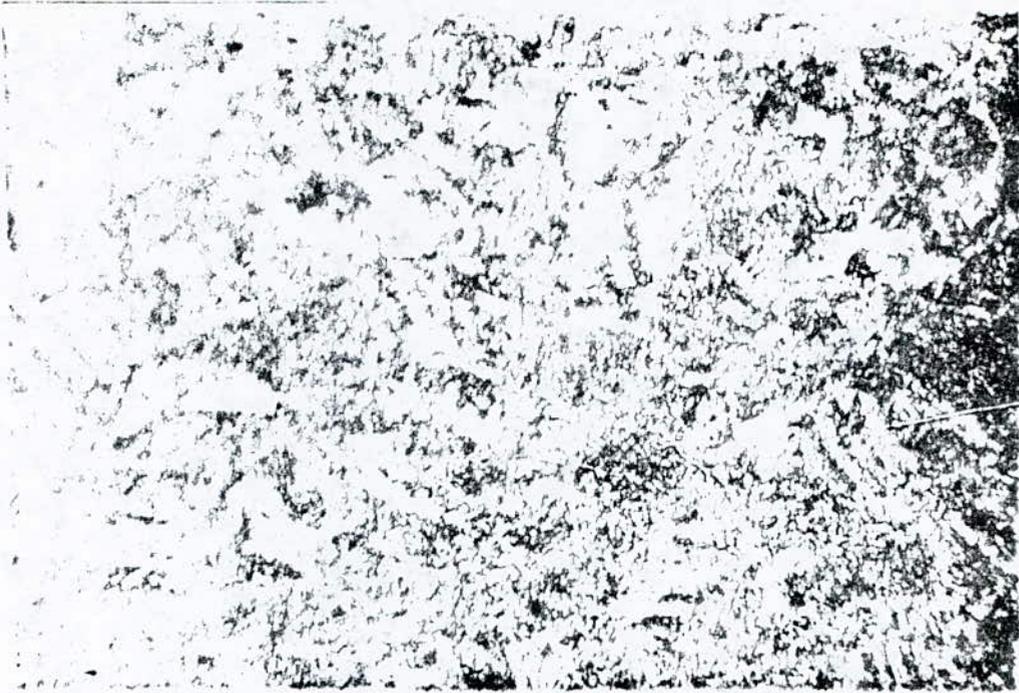


Fig.64 : 50NiCl₃ ; G× 200 ; à l'état recuit.

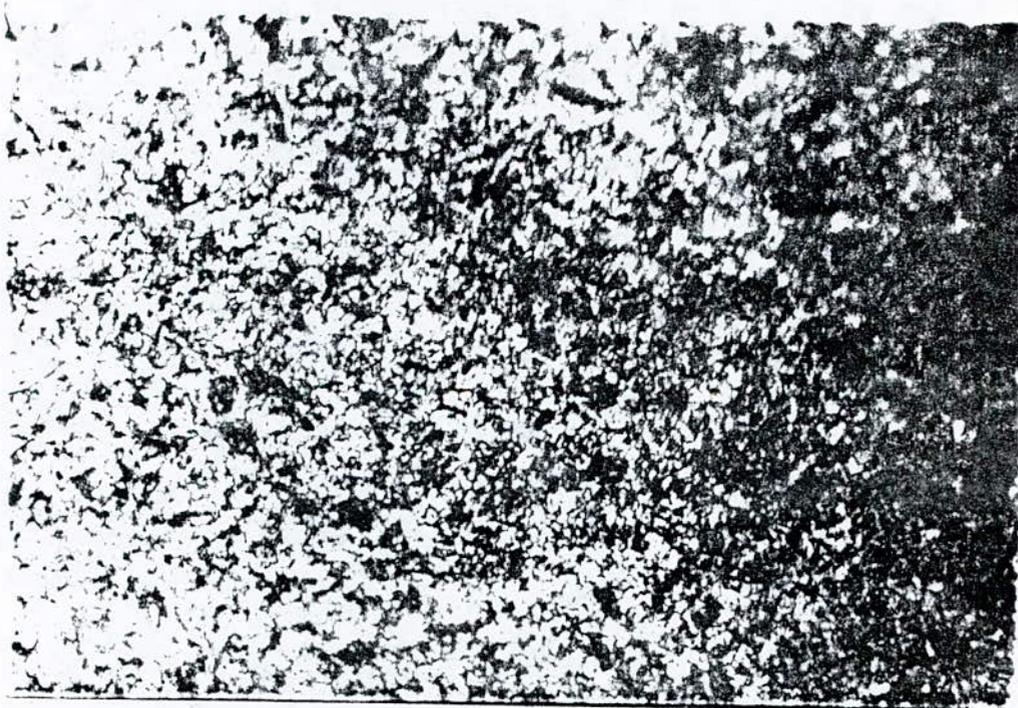


Fig.65 : 50NiCl₃ ; G× 200 ; Trempe (tl) à l'eau.

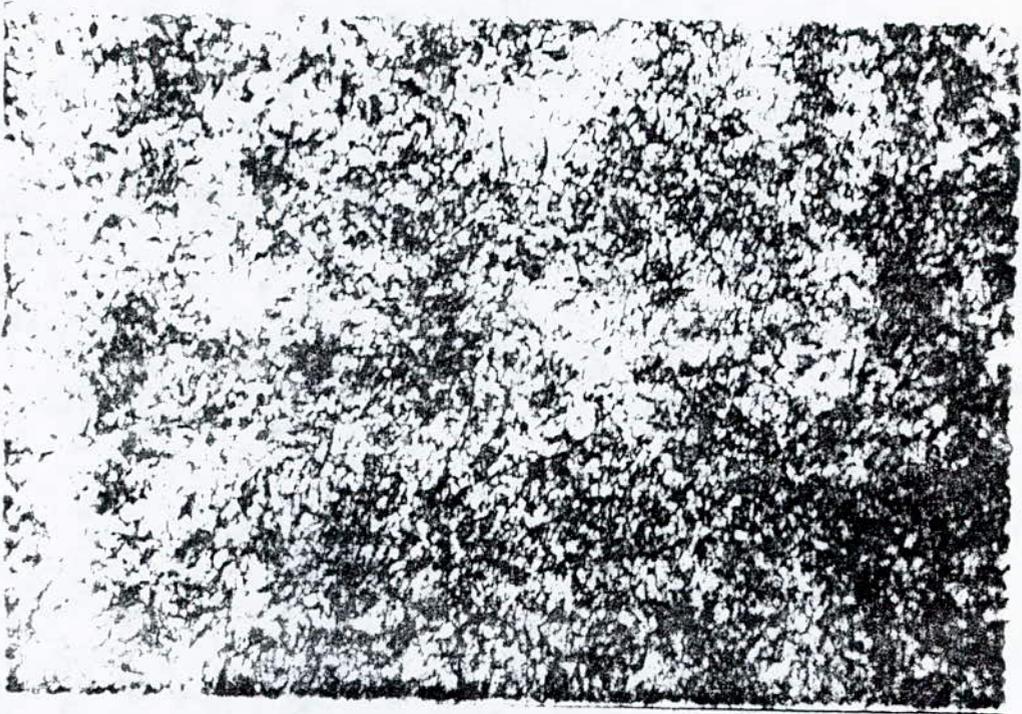


Fig.66 : 50NiCr13 ; G× 200 ; Trempe (t3) à l'azote.



Fig.67: 50NiCr13 ; G× 500 ; Trempe(t1)+ 1^{er} revenu(t2).

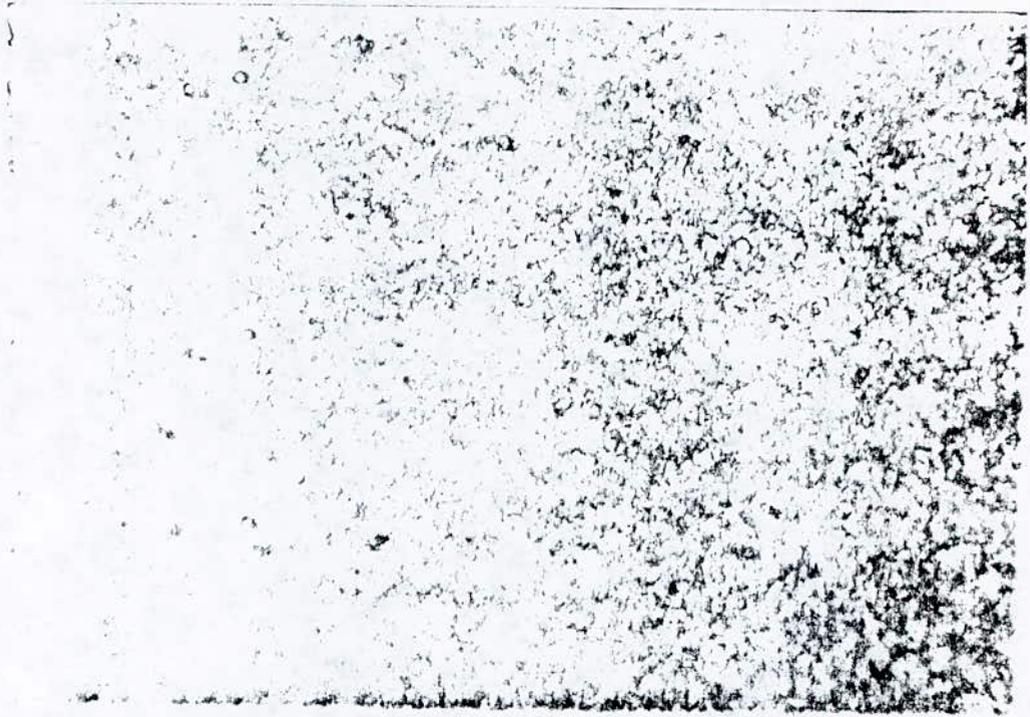


Fig.68 : 50NC13 ; G× 200 ;Trempe(t3)+ 1^{er}revenu(t2).



Fig.69 : 50NC13 ; G× 200 ;Trempe(t2)+ 1^{er}revenu(t1).

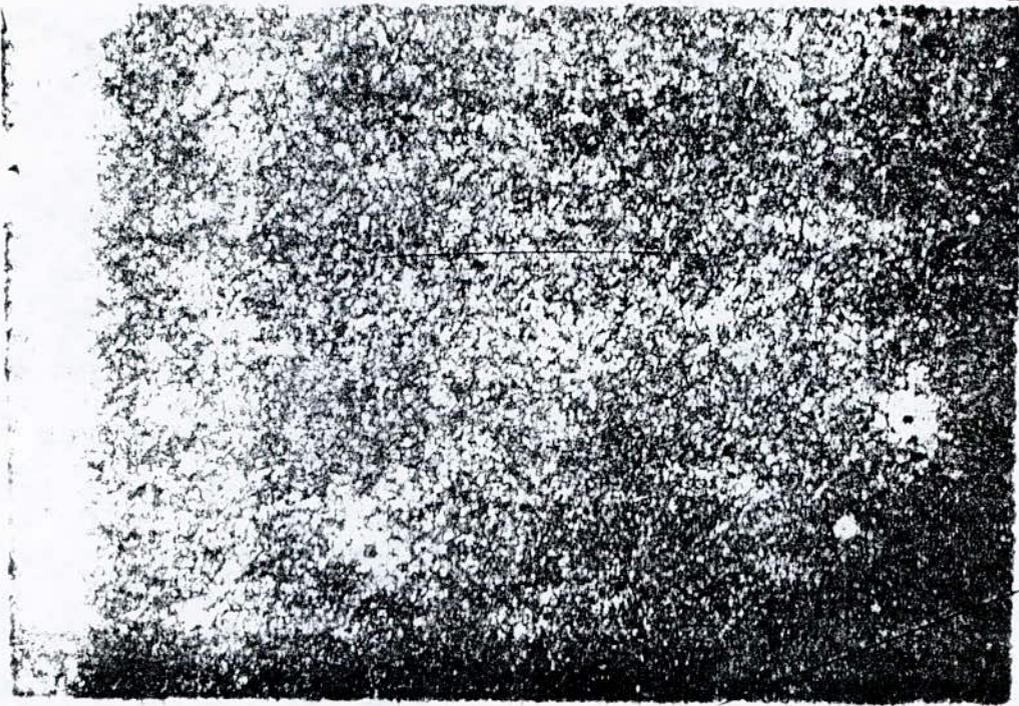


Fig.70 : 50NC13 ; G× 400 ; Trempe(t2)+ 1^{er} revenu(t2).

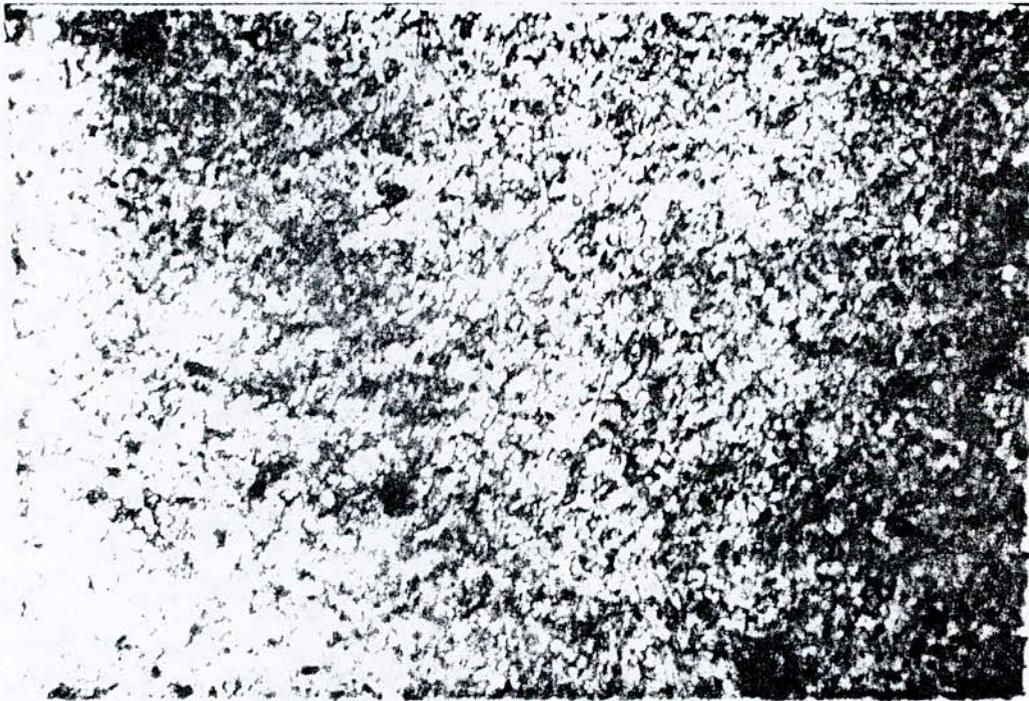


Fig.71: 50NC13 ;G× 200 ;Trempe(t1)+1^{er} revenu(t2)+ 2^{eme} revenu(t3).



Fig.72: 50NC13 ;G× 500 ;Trempe(t2)+1^{er} revenu(t2)+ 2^{eme} revenu(t3).

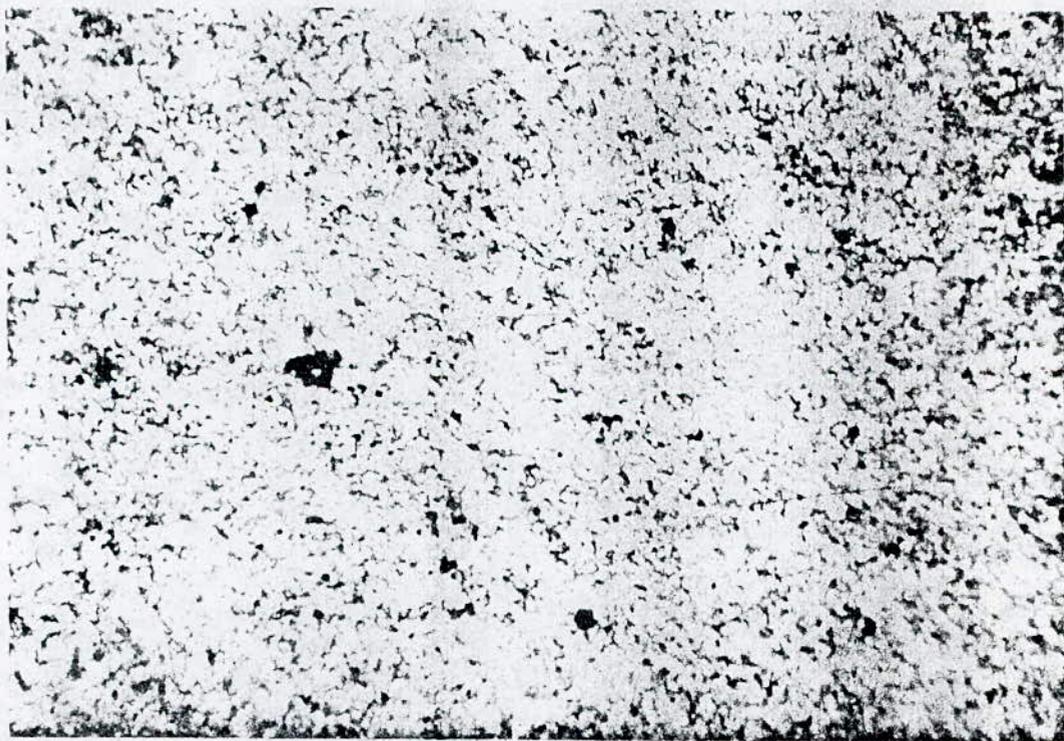


Fig.73: 50NC13 ;G× 500 ;Trempe(t3)+1^{er} revenu(t2)+2^{eme} revenu(t3).

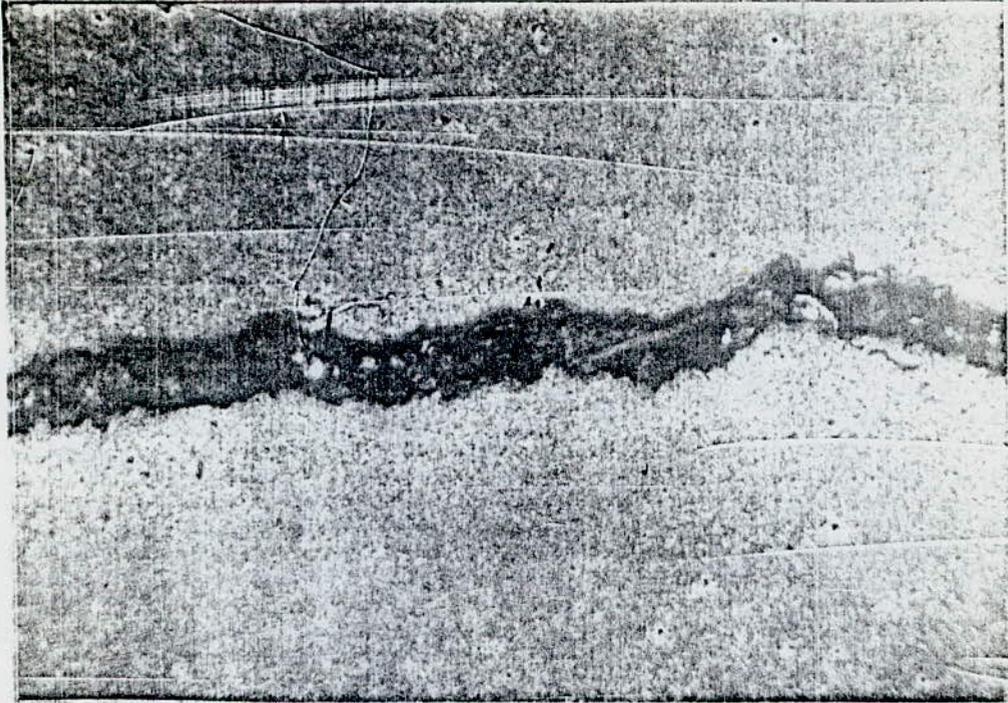


Fig.75: 50NC13 ;Gx100 ;Trempe(t3) + 1^{er}revenu(t2).
défaut de trempe(fissure).

-- Interprétation métallographique :

xx Pour l'acier 55WC20 :

Cet acier présente une structure perlitique après recuit (Fig:53), qui est due à sa composition chimique et au refroidissement lent qui permet à l'austénite de se décomposer en formant un agrégat de ferrite et de cémentite qui est la perlite.

Pour un refroidissement rapide (trempe), on obtient une structure martensitique extrêmement fine et plus enchevêtrée à peine résoluble à ces grossissements, tandis que l'austénite a pratiquement disparu.

Mais, le plus intéressant est de constater que pour une trempe (t_1) (Fig:54), la structure obtenue est plus fine et le taux d'austénite résiduelle est plus important que pour le cas d'une trempe (t_3) à l'azote hydrogène (Fig:55).

La comparaison des structures après le premier revenu (Fig:56, 57 et 58) de durée (t_2), nous a permis de définir l'état structural après chaque cycle de traitement thermique, C'est ainsi qu'après un cycle de : trempe (t_1) + un 1^{er} revenu (t_2) (fig:56), on a une structure très fine et peu homogène due principalement à une austénisation incomplète où le temps d'austénisation est court.

Pour : une trempe (t_2) + un 1^{er} revenu (t_2), (Fig:56), on obtient une structure tendant vers l'état sorbitique plus homogène. Par contre : une trempe (t_3) + un 1^{er} revenu (t_2) présente une structure sorbitique qui s'affine à cause de la précipitation de carbures, comme le montre la Fig:59.

Pour une courte durée du 1^{er} revenu (t_1), il y a une faible précipitation de carbures, et la structure obtenue est moins fine que celle obtenue avec un temps plus long (t_3), comme le montre la Fig:58.

Après le deuxième revenu, les structures sont sorbitiques à cause d'une durée de revenu prolongée. Par contre, la présence de carbures affine de plus en plus la structure chaque fois que le temps du cycle de traitement thermique est long.

xx Pour l'acier 50NC13 :

Après recuit(Fig:64),la structure obtenue est perlitique avec une faible présence de ferrite.

Après une trempe (Fig:65 et 66),on a une structure de martensite de trempe moins fine par rapport à celle de l'acier 55WC20.

Après le premier revenu,les structures sont sorbitiques (Fig:67,68,69 et 70),et plus fines pour des temps du cycle de traitement thermique plus longs.

Après le deuxième revenu,les structures tendent vers un état sorbitique (Fig:71,72 et 73) du fait que les durées de revenu sont plus prolongées.

-----00000000-----



*FACE ET REVERS D'UNE PIECE DATANT DE 1254 APRES L'HEGIRE
(1838-1839 APRES J.-C.)*

CONCLUSION

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Notre travail a porté sur l'exploitation des résultats obtenus expérimentalement, et nous a permis d'indiquer le choix le plus adéquat de la nuance d'acier et de son traitement thermique.

Nous avons constaté que les caractéristiques mécaniques de traction et de dureté évoluent d'une manière intéressante suivant les traitements thermiques. C'est ainsi que nous pouvons estimer la valeur de la nuance et de son traitement et nous pouvons dire que le meilleur acier est celui qui présente les caractéristiques les plus élevées qui est le 55WC20 où le meilleur intervalle de dureté est (59-60)HRC; qui peuvent être obtenues par un traitement de trempe à l'azote (3 bars) suivi d'un revenu suivant les recommandations des figures du Chapitre III

Puisque le cycle de traitement thermique le plus optimale pour les dimensions étudiées est le suivant :

Trempe (t_3) à l'azote hydrogène + 1^{er} Revenu (t_2)

Le choix du temps d'austénisation est dû principalement à un achevement plus complet de la transformation ($\alpha + \text{Carbures} \rightarrow \gamma$)

Le revenu à un temps de maintien (t_2), assure une meilleure valeur de résilience et une relaxation des contraintes internes.

Ce travail peut être poursuivi dans une optique de recherche où les techniques d'investigation, telle que, la microscopie électronique, l'essai de fatigue et l'essai d'usure par contact peuvent être à l'origine d'un meilleur choix de ces nuances d'aciers et le perfectionnement de leurs élaboration.

xx LES OUTILS DE FRAPPE :

Pour la frappe des flans, nous avons besoin des outils qui vont se conformer aux besoins de la transformation, où ils doivent avoir un facteur de résistance plus élevé (Annexe D), pour l'amélioration de leurs résistance (à l'usure par contact, à la compression à grande charge etc....), on a recours aux traitements thermiques de trempe et revenu.

La frappe monétaire nécessite des connaissances des caractéristiques des matériaux d'outils, de leur dureté et de leur rigidité pour avoir l'amélioration optimale par traitement thermique. Vu que la capacité de charge maximale autorisée qui en résulte est essentielle, on doit se référer aux efforts d'enfoncement en prenant en considération les paramètres suivants :

- Nature et nuance du flan.
- Traitement mécanique et/ou thermique des flans.
- Superficie du flan.
- Importance des reliefs.
- Vitesse de frappe.

x Pour un acier à outil trempé, le poids maximal qu'il peut subir se calcule comme suit :

$$Ff = \frac{D \cdot \pi \cdot Fr_0}{4 \cdot 1000} \quad (\text{Tonnes}) \rightarrow \text{enfouissage}$$

D = Diamètre du flan (mm).

Fr₀ = Facteur de résistance de l'outil (Kg/mm²).

Ff = Poids maximal que l'outil peut supporter (T).

$$\text{ou} \quad \frac{Ff}{HB} = 2,24 \cdot \left(\frac{t_0}{D}\right)^{0,27} \rightarrow \text{frappe}$$

HB = Dureté Brinell.

t₀ = Epaisseur du flan.

Pour une meilleure qualité de frappe et une longue durée de vie des coins, on doit obligatoirement éviter les facteurs de leurs défaillances.

xxx FACTEURS DE DEFAILLANCE DES OUTIL DE FRAPPE MONETAIRE :

-- Les facteurs de résistance : Les facteurs de résistance du flan et des coins doivent être reliés par la relation suivante :

$$Fr_f < Fr_o$$

pour éviter l'usure rapide et la déformation des reliefs des coins.

-- La nuance des coins : Les coins doivent avoir une même nuance et le même cycle de traitement thermique, trempe plus revenu pour conserver une bonne qualité des reliefs du coin.

-- La vitesse et la force de frappe : La vitesse et la force de frappe doivent être les mêmes pour les deux coins qui doivent travailler en exacte similitude, pour éviter essentiellement l'apparition de fissures, la déformation des reliefs, etc....

-- Profondeur des reliefs : De préférence, les reliefs des coins doivent être d'une même importance car dans certains cas, cela peut participer à une usure plus rapide des reliefs d'un coin par rapport à l'autre surtout pour des flans de grand facteur de résistance (Fr_f).

-- Température de travail des coins : Pour la frappe des flans à froid, on doit maintenir la température des coins à l'ambiante. Pour cela, on doit choisir le meilleur système de refroidissement, pour éviter tout changement des caractéristiques mécaniques (dureté, résistance à l'usure, résistance à la rupture, etc.....)

Vu que la vitesse de frappe est de l'ordre de 700 coups/mn, l'utilisation d'un lubrifiant liquide peut donner une très mauvaise qualité des flans et de plus il peut être à l'origine de la naissance des micro fissures du coin, pour cela le meilleur système de refroidissement est le refroidissement par ventilation d'air froid.

-- La disposition des coins : Les faces de frappe des coins doivent être parallèles et ce parallélisme doit être maintenu pendant leurs travail car le non respect de cette condition

entraînera des répercussions très néfastes pour les coins
(apparition des micro fissures, déformation des reliefs dans
les positions les plus sollicitées.

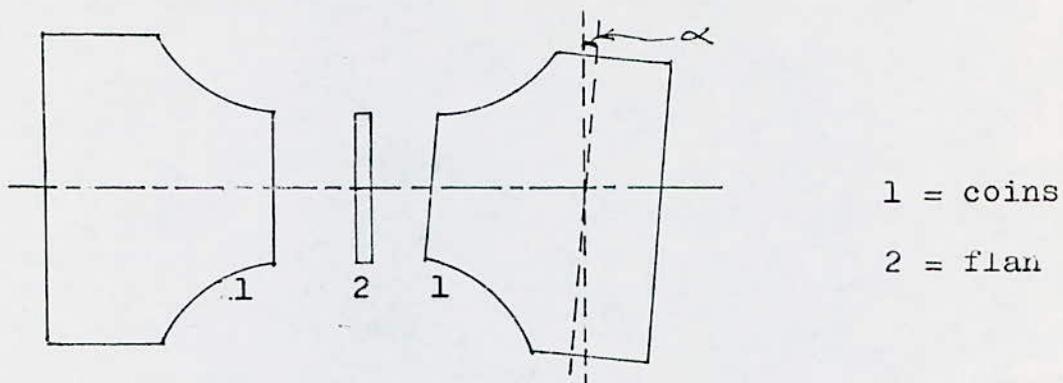


Fig. X: Mauvaise disposition d'un coin "Inclinaison d'un angle α "

× Annexes A ×
×XXXXXXXXXXXXXXXXXX×

×× PROPRIETES PHYSIQUES DES ACIERS ETUDIES :

-- Acier 55WC20 :

- Poids spécifique à 20°C..... 8,0 g/cm³
- Module d'élasticite à 20°C..... 210.10³N/mm²
- Conductivité thermique à 20°C..... 25 W/m °C
- Chaleur spécifique à 20°C..... 0,46 J/g°C
- Résistivité électrique à 20°C..... 0,3 mm²/m
- Dilatation thermique Δl entre 20°C et T°C.

T°C	100	200	300	400	500	600
10 ⁻⁶ $\frac{\Delta l}{m/m^\circ C}$	11,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5

-- Acier 50NC13 :

- Poids spécifique à 20°C..... 7,85 g/cm³
- Module d'élasticite à 20°C..... 210.10³ N/mm²
- Conductivite thermique à 20°C..... 20 W/m °K
- Chaleur spécifique à 20°C..... 0,46 J/g°K
- Résistivite électrique à 20°C..... 0,3 mm²/m
- Dilatation thermique Δl entre 20°C et T°C.

T°C	100	200	300	400	500	600
10 ⁻⁶ $\frac{\Delta l}{m/m^\circ K}$	11,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5

Annexes B
 ×XXXXXXXXXXXXXXXXXX×

×× DESCRIPTION DU FOUR SOUS VIDE UTILISE :(Fig:76)

Le four B62 TR est un four sous vide horizontal à double paroi refroidie par l'eau, il constitue une installation autonome, conçue pour traiter une charge de 100 kg, selon le cycle de traitement automatique suivant :

- Purge par le vide jusqu'à $5 \cdot 10^{-4}$ mbar
- Chauffage sous gaz inerte en convection forcée jusqu'à 750°C
- Chauffage par radiation "4 faces"
 - × Température jusqu'à 1300°C.
 - × Paliers et pentes contrôlés.
 - × Sous vide ou sous pression partielle de gaz inerte.
- Refroidissement rapide.
 - × Sous pression contrôlée de gaz inerte.
 - × Avec choix de la vitesse de trempe, selon la pression réglable jusqu'à 3 bar .

"Le gaz inerte est : N₂ + 5% H₂ "

×× Programme d'une trempe à 880°C pendant 30mn.

Segment	Palier-Garanti	Palier-Non-Ga	Rampe	Evenement			Cycle
				N°	on	off	
1	600°/10mn	30°/10mn	°/mn				
2			10°/mn	4	0	0,1	
3							
4				8°/mn			
5	880°/30mn						
6	50°/10mn		999,9°/mn	1	0	0,1	
7							
8				1°/mn			
9		50°/1mn		2	0,9	1	

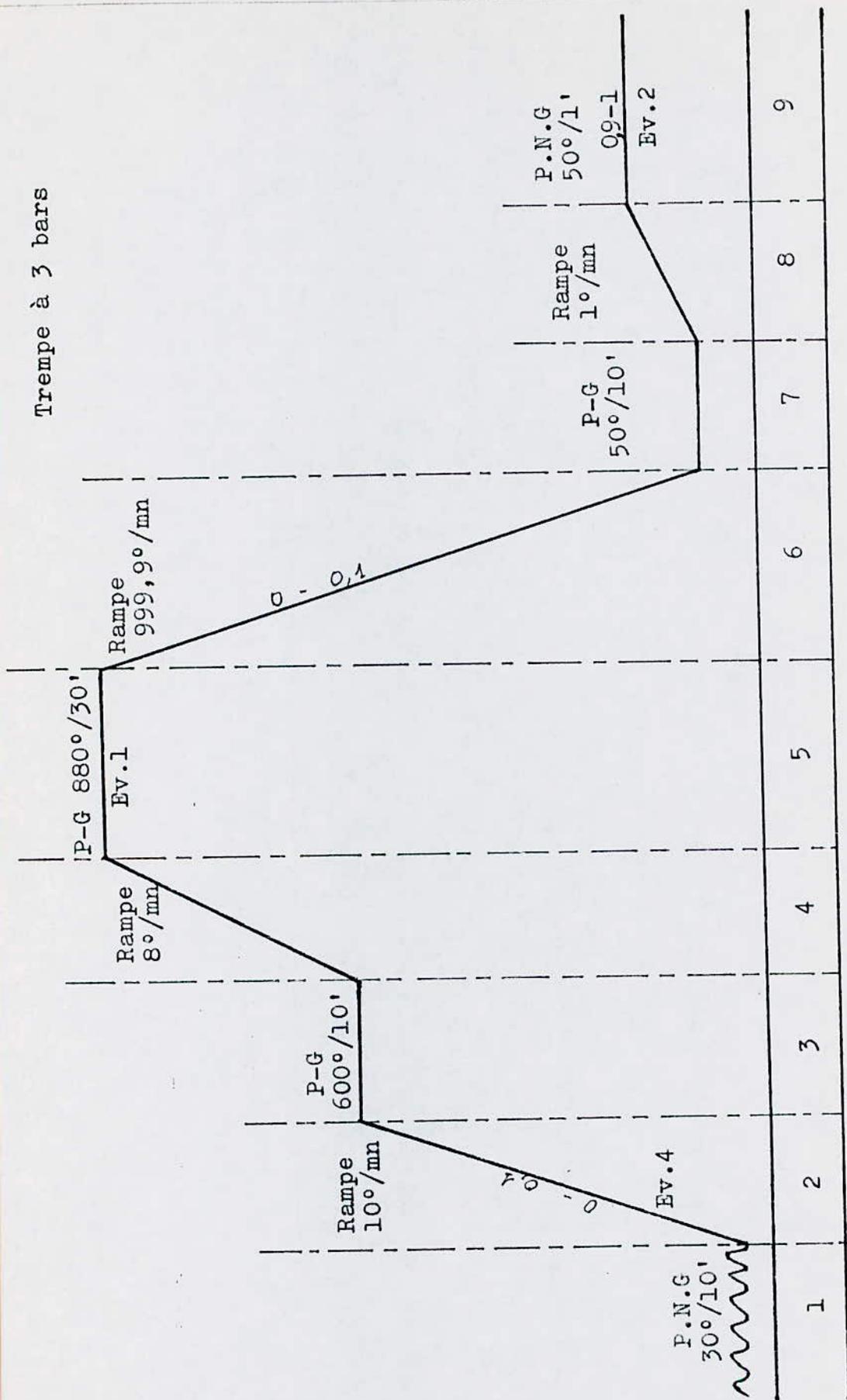
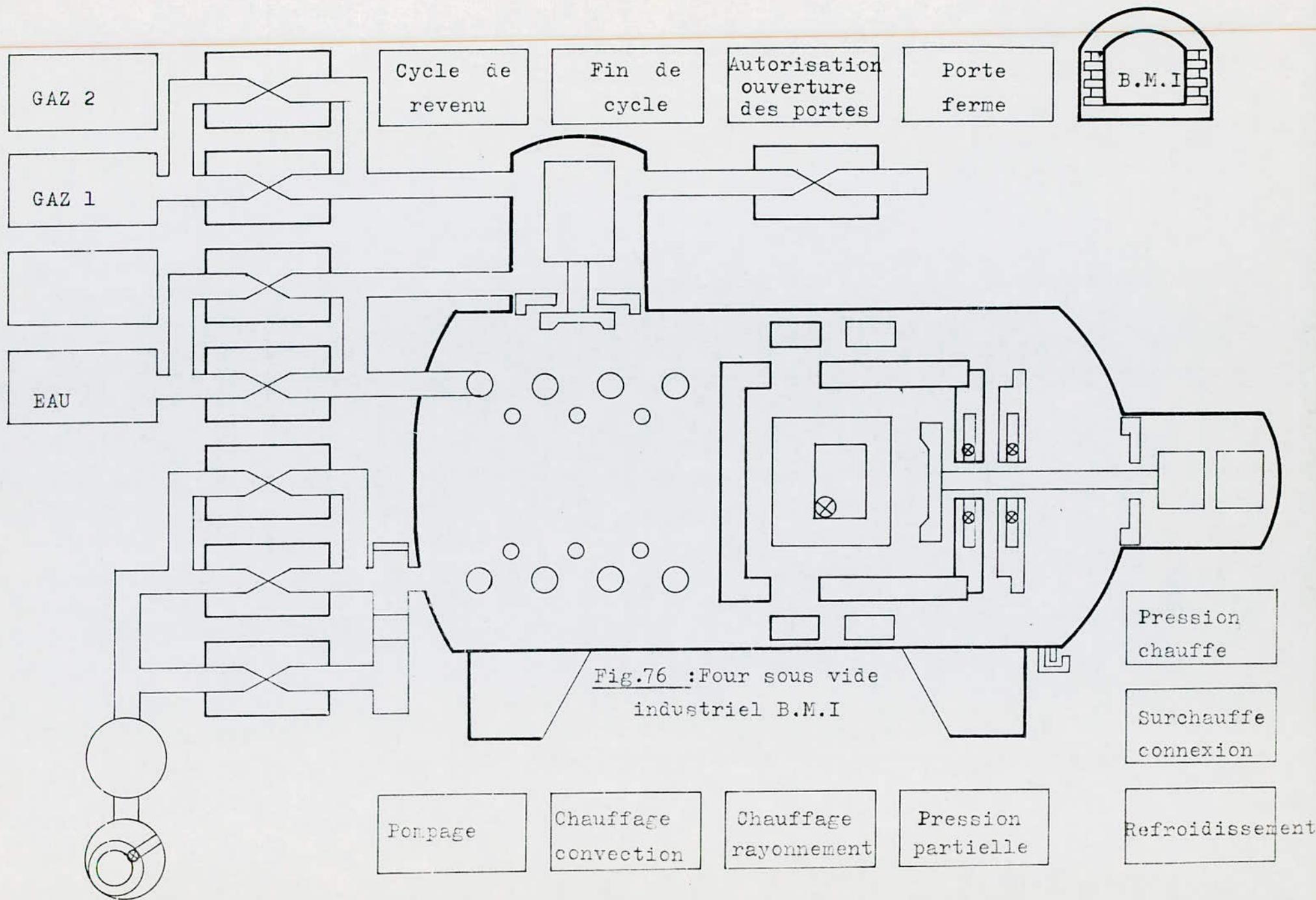


Fig.77 : Cycle d'une trempe à 880°C pendant 30mn pour l'acier 55WC20.

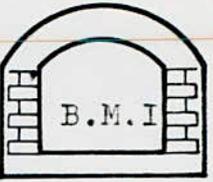


Cycle de
revenu

Fin de
cycle

Autorisation
ouverture
des portes

Porte
ferme



GAZ 2

GAZ 1

EAU

Pression
chauffe

Surchauffe
connexion

Refroidissement

Fig.76 :Four sous vide
industriel B.M.I

Pompage

Chauffage
convection

Chauffage
rayonnement

Pression
partielle

Annexe D

XXXXXXXXXXXXX

xx Quelques résistances à l'extrusion des médailles :

Métal	Fr _φ Kgf/mm ²
Or	120 - 150
Argent, pur	150 - 180
Argent, sterling	180 - 220
Cuivre, mou	80 - 120
Laiton	150 - 180
Nickel, pur	160 - 180
Acier inoxydable	250 - 320

xx Résistance de quelques aciers à outils :

Nuance des aciers (AFNOR)	Fr _o Kgf/mm ²
50CD 8	180
Z 100CD 5	220
Z 150C 12	250
35CD 20	240
50CD 13	220

--_BIBLIOGRAPHIE_--

- 1 -H.DE LEIRIS :Météaux et alliages Tomes 1 et 2-MASSON&CIE 1975
- 2 -I.TUDOR :Métallurgie physique.
- 3 -I.LAKHTINE :Métallographie et traitements thermiques des métaux; Editions de Moscou 1985.
- 4 -Technique de l'ingénieur :M4-Les traitements thermiques 1985
- 5 -BENSIMON :Les aciers.Tome 2. PYC Edition
- 6 -BAIN :Les éléments d'adition dans les aciers.Dunod-1968
- 7 -MICHEL MASSIN:Métallurgie pratique pour mécaniciens.
Tome 1 et 2; PYC Edition 1982.
- 8 -DOCUMENTATION BOEHLER :Manuel d'acier fins
Service pratique BOEHLER
VEW K455:Acier pour travail à froid
VEW K605:Acier pour travail à froid
- 9 -DESCRIPTIF TECHNIQUE DU FOUR INDUSTRIEL B.M.I M
Four sous vide
- 10-J.BARRALIS-G.MAEDER :Précis de métallurgie :NATHAN 1988.
- 11-PH.POUPEAU :Traitement thermique. 2^{eme} Partie ECA&M 1981
- 12-L.SCHULER :Presses formage. Edition ERNST KLETT
- 13-A.CONSTANT-G.HENRY :Les principes de base du traitement thermique des aciers. PYC Edition 1986
- 14-A.ROSS-B.MILET :Précis de métallurgie applique. Dunod 1982
- 15-J.BENARD-A.MICHEL :Métallurgie générale.MASSON&CIE 1984
- 16-GRÄBENER :Pressen systeme. GmbH & Co KG. (Allemand)
- 17-A.MICHEL :Aciers à outils
- 18-C.CHAUSSIN-G.HILLY :Métallurgie. Tome 1. MASSON
- 19-Mr PETER SCHURMANN :Médailles(outillage & transformation)

20-Dr HOISCHEN :Matriçage / Estampage.

21--Mémoires et études scientifiques OCT- 1984

22--Les mémoires scientifiques fiv et Mars 1971
Janv 1972
Fiv 1975

23--Revue de métallurgie Juil-- Aout 1982

24--Traitement thermique Janv/fiv et Mai/Juin 1987
Janv/Fiv et Oct 1988
Janv/Fiv 1990

25--Cahiers d'informations techniques Janv 1984

26-Mc.LEAN.D :Mechanical properties of metals.Ed WILEY 1962

27-SACK & KIESSELBACH :Hydraulic Hobling.

28-ROLLASON :Metallurgy of engineers.Pub Edward Arnold
(London)

29- DOAN :Principles of physical metallurgy.Pub Mc Graw Hill

30-BULLENS-BATTELLE :Steel and its heat treatment. Yol 2.
Publ John Wiley(New York).

