

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : **Genie mecanique**

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE COMPARATIVE DE LA  
TREMPABILITE DES ACIERS

4 PLANCHES

Proposé par :

M.PAVLOV

Etudié par :

B.IMCAOUDENE

Dirigé par :

M.PAVLOV

PROMOTION  
**juin 87**

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT



# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE COMPARATIVE DE LA  
TREMPABILITE DES ACIERS

Proposé par :

Etudié par :

Dirigé par :

PROMOTION

قال رسول الله صلي عليه وسلم

أفضل صداقة أن يتعلم المرء المصالح علمًا ثم يعطيه

أخاه المسلم

صدق رسول الله

وزارة التعليم العالي  
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
فرع: الهندسة الميكانيكية  
الموجه: بلوف  
الطبيب المهندس: ياسعدان

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE  
PROMOTEUR : PAULOV  
ELEVE INGENIEUR : IM ÇAOU DENE

الموضوع: دراسة مقارنة لتعليد الفولاذ  
الملخص: يتضمن هذا المشروع دراسة مقارنة لعمق الصلابة لأنواع من الفولاذ  
ضعيفة المزج. قمنا بإنجاز منظومة من المعدن لقياس الصلابة مما يسمح بتسهيل  
التجربة أثناء الأعمار التطبيقية للطلبة. تم الابتكار منظر بياني يبين  
الإستعمال التطبيقي لتجربة جوميني للقطع المستعملة

SUJET : ETUDE COMPARATIVE DE LA TREMPABILITE DES ACIERS  
RESUME : Ce projet consiste à l'étude comparative de la penetration  
de trempé dans les aciers faiblement alliés . La réalisation en  
metal d'une installation de mesure de la dureté qui permet de  
faciliter la manipulation lors des travaux pratique pour les  
'etudiants . Conception de nomogramme explique l'utilisation  
pratique de l'essai jominy pour les pieces de construction

SUBJECT : COMPARATIVE STUDY OF THE METALS CASTING  
SUMMARY : This project deals with the comparative study  
of the seepage of the casting into poorly allied metal .  
The metallic realisation of an installation of the measur-  
ement of toughness which allows the manipulation to be  
easy for student during practical work . De'sigh of mono-  
-gram shows the practical using of the jominy experiment  
of the pieces construction .

## DEDICACES

je dédie ce modeste mémoire :

- A mon père et ma mère, à qui je dois tout, ce faible témoignage d'affection et de profonde reconnaissance.
- A mes frères et ma sœur et à tous mes amis

- A ceux qui m'ont aidé dans mes études.

## ==:==:== REMERCIEMENTS ==: ==:==:==

Je tiens à remercier Monsieur PAULOV pour son aide précieuse, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Que tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'étude de ce sujet, trouvent ici ma sincère gratitude

==: ==:==: : ==:==: : ==:==: : ==:==: : ==:==: : ==

# SOMMAIRE

INTRODUCTION . . . . .	1
I GENERALITES SUR LE STRANSFORMATION DE LAUSTENITE . . . . .	
1 Transformation perlitique . . . . .	2
2 Transformation martensitique . . . . .	3
3 Transformation intermediaire. . . . .	6
II INFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGE SUR L'ACIER . . . . .	
1 Généralité' . . . . .	9
2 Influence des éléments d'alliage sur les transformation polymorphes du fer . . . . .	9
2.1 les éléments gammagènes . . . . .	9
2.2 éléments alphagènes . . . . .	10
3 Influence des éléments d'alliage sur les propriétés de la ferrite et de l'austenite. . . . .	10
4 Influence des éléments d'alliage sur la phase de carbure . . . . .	11
4.1 Les éléments graphitisants . . . . .	11
4.2 Les éléments neutres . . . . .	11
4.3 Les éléments carburigènes . . . . .	12
5 combinaisons intermetalliques . . . . .	12
6 classes structurale des aciers alliés . . . . .	12
6.1 Aciers perlitiques . . . . .	12
6.2 Aciers ferritiques . . . . .	12
6.3 Aciers austenitiques. . . . .	13
6.4 Aciers martensitiques . . . . .	13
6.5 Aciers lédéburitiques . . . . .	13
7 Etude des principaux aciers alliés. . . . .	13
7.1 Acier au nickel . . . . .	13
7.2 Acier au chrome. . . . .	14
7.3 Acier au manganese. . . . .	14
7.4 Acier au tungstene . . . . .	15
7.5 Acier au cobalt . . . . .	15
7.6 Acier au molybdén. . . . .	15
7.7 Acier au silicium . . . . .	16
7.8 Acier au nickel-chrome. . . . .	16
III ANALYSE DE LA REALISATION . . . . .	
1 Elaboration d'un support eprovettes . . . . .	17
1.1 présentation . . . . .	17



1.2 modele . . . . .	17
1.3 définition des éléments . . . . .	17
1.4 gamme d'usinage . . . . .	17
1.5 bati . . . . .	18
1.6 glissière . . . . .	19
2 Elaboration des épreuves . . . . .	21
2.1 élaboration des épreuves longues . . . . .	21
2.2 élaboration des épreuves rondelles . . . . .	21
2.3 épreuves longues . . . . .	22
2.4 épreuves rondelles . . . . .	23

#### IV TREMPABILITE ET PÉNÉTRATION DE TREMPE

1 Trempabilité . . . . .	24
2 pénétration de trempe . . . . .	24
2.1 Influence des éléments d'alliage sur la pénétra- -tion de trempe . . . . .	25
2.2 Influence de la grosseur du grain sur la péné- -tration de trempe . . . . .	26
2.3 Influence de la pénétration de trempe sur les propriétés de l'acier . . . . .	26
3 Méthodes de détermination de la pénétration de trempe . . . . .	26
3.1 essai Jominy . . . . .	26
3.1.1 définition . . . . .	26
3.1.2 description . . . . .	27
3.1.3 action des éléments d'alliage sur les courbes de Jominy . . . . .	28
3.1.4 relation entre les courbes de Jominy et de vitesse de refroidissement et T.T.T. . . . .	28
3.2 Trempe volumétrique . . . . .	29
3.2.1 description . . . . .	30
3.2.2 relation entre la vitesse de refroid- -issement et la dureté . . . . .	30

#### V UTILISATION DE NOMOGRAMME

1 définition . . . . .	32
2 Nomogramme pour les pièces de formes quelconques . . . . .	32
3 Exploitation des résultats de l'essai Jominy . . . . .	33

4 Détermination du diamètre critique par la méthode pratique 35

## VI INSTALLATION ET OPERATION POUR ESSAI DE TREMPABILITE

1 Installation et operation pour essai de trempabilité .. 36

1.1 dispositif nécessaire pour l'installation . . . 36

1.2 mode opératoire . . . . . 36

1.2.1 Essai jominy . . . . . 36

1.2.2 Trempe volumétrique . . . . . 37

1.3 Elaboration des résultats . . . . . 37

2 Essai de trempabilité . . . . . 39

2.1 choix de l'acier . . . . . 39

2.2 exploitation des résultats . . . . . 44

2.3 Interprétation des courbes et résultats . 45

VII CONCLUSION . . . . . 55

# INTRODUCTION

Les pièces à utilisation mécanique travaillent avec des charges dynamiques et alternées très importants. Ces pièces doivent posséder des propriétés mécaniques élevées ( $R_r$ ,  $H_B$ ,  $A$ ) pour travailler dans des conditions difficiles, malgré cela certaines pièces, pendant leur fonctionnement se rompent. La rupture de ces pièces est causée soit par le mauvais montage, utilisation, ou traitement subie. On constate alors que les dimensions critiques ne sont pas respectées et surtout pour les pièces de formes compliquées ( vile brequin, bielle et rail ).

En 1939 Monsieur Jominy a publié dans le "Hardenability of Alloy Steels ASM Cleveland" un article où il a proposé un essai de trempabilité pour les aciers de construction.

En 1941 Monsieur Jominy a développé ce procédé par utilisation d'un premier type de nomogramme, qui sert à déterminer les dimensions critiques des pièces de forme quelconques, et pour différentes nuances d'acier.

Les résultats des essais Jominy ont été utilisés pour développer la recherche dans le domaine de la métallurgie des aciers.

Le projet portera sur l'étude et l'essai pratique de ce procédé Jominy avec des dispositifs spécialement conçus pour cette expérience, et d'en déduire l'effet de la pénétration de trempe sur les propriétés mécaniques

# IGÉNÉRALITES SUR LES TRANSFORMATIONS DE L'AUSTENITE

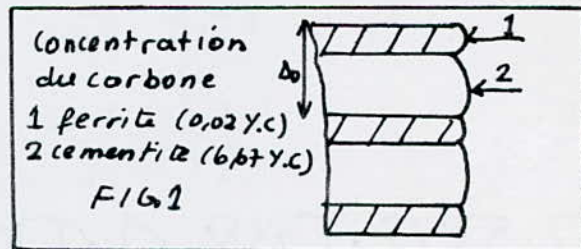
1 Transformation perlitique.

Pendant la transformation perlitique, l'austenite surfusionnée se decompose pendant son refroidissement, en précipitant de la ferrite et de la cémentite, c'est un mélange de phase dont la structure et la composition est complètement différentes. On a établi qu'il apparaît un germe de cémentite aux joints du grain austenitique. La croissance de ces germes nécessitent la diffusion du carbone provenant d'austenite adjacents, ce qui appauvrit naturellement les éléments d'austenite en carbone, et favorise sa transformation en lamelles de ferrite. Chaque lamelle de cémentite est en conséquence bordée par deux lamelles de ferrite.

L'étude micrographique de la perlite à montrer que les lamelles qui la constituent sont formées alternativement de ferrite et de cémentite.

La structure perlitique est présentée sous trois types de structures lamellaire différentes. Suivant le degré de dispersion, et pour une faible vitesse de refroidissement déclenche la perlite, une vitesse plus grande, celle de la sorbite et une vitesse encore plus grande, celle de la troostite.

Le degré de dispersion est caractérisé par la distance interlamellaire  $\Delta_0$  (voir Fig 1), définie comme étant la moyenne de la somme des épaisseurs des lamelles alternées de ferrite et de la cémentite.



elles alternées de ferrite et de la cémentite.

La troostite présentant un degré de surfusion n'est obtenue qu'à partir d'un refroidissement moyennement rapide (généralement l'huile) sa structure est fine, quand à la sorbite, elle est obtenue avec un refroidissement relativement faible (généralement l'air).

Structure	Perlite	Sorbite	Troostite
$\Delta_0$ "u"	0,6 - 1,0	0,25 - 0,3	0,1 - 0,15
HB	180 - 250	250 - 350	350 - 450

relation entre la structure, distance interlamellaire, dureté

Propriétés de la perlite :

La dureté et la résistance sont proportionnelles à l'étendue de l'interface ferrite - cémentite.

Avec le baissement de la température, on augmente la vitesse de refroidissement, et le degré de surfusion, l'espacement interlamellaire  $\Delta_0$  diminue. La dureté et la charge de rupture augmentent.

## 2 Transformation martensitique

Nature de la martensite. C'est la transformation d'une phase à une phase de même composition, qui s'effectue sans diffusion du carbone.

La transformation d'austénite avec la structure cristalline cubique à face centrée en martensite tétragonale consiste en un changement du réseau cristallin.

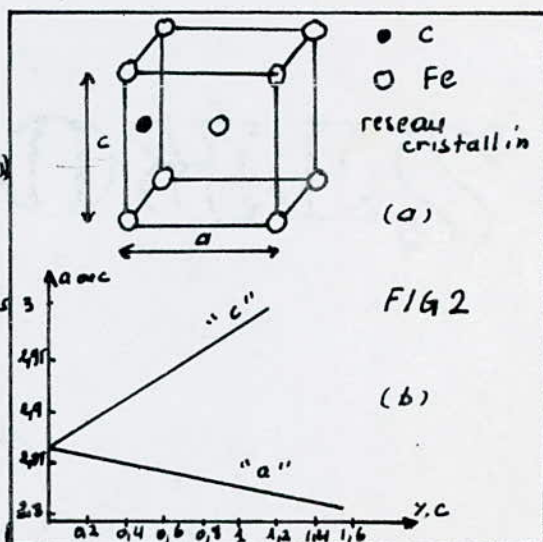
La martensite est une solution solide sursaturée de carbone dans le fer  $\alpha$ , mais la maille du fer  $\alpha$  est quadratique, et par suite de l'excès de carbone on se trouve en présence de prisme au lieu de la structure cubique centrée.

On définit la maille du prisme par le côté "a" du carré de base et par la hauteur "c" du prisme (voir Fig 2(a)).

La variation de "a" et de "c" est en fonction de la teneur en carbone.

Finalement les distances interatomiques qui sont proportionnelles au titre en carbone varient linéairement avec l'augmentation de la teneur en carbone, et la relation

$$c/a = 1 + 0,046 C (\%) \quad (\text{Fig 2 (b)})$$



Mécanisme de la transformation. Lorsque le refroidissement est très rapide, la décomposition de l'austénite par diffusion devient impossible, et l'austénite subit seulement la transformation martensitique. Cette transformation se réalise par glissement, et la formation d'un cristal de martensite se fait par la mobilité coopérative d'un grand nombre d'atomes de fer de façon à engendrer la nouvelle structure. Le déplacement des atomes est une fonction de l'espacement interatomique, tout en gardant le voisinage mutuel. La structure martensitique contient le même nombre d'atomes que la région d'austénite on conclut que l'austénite se décompose selon deux processus suivant

- Transformation allotropique du fer  $\gamma$  en fer  $\alpha$ .
- Séparation du carbone qui se trouvait en solution interstitielle dans le réseau du fer  $\alpha$ .

La transformation martensitique s'accompagne d'un changement de forme et de volume. Ce changement de forme donne naissance à des tensions élastiques dans la martensite

% carbone	0,4	0,6	0,7	0,83	1,2
Augmentation du volume %	0,4	0,46	0,35	1,13	0,9

Cinétique de la transformation.

Cette transformation a lieu lorsque un refroidissement très rapide se produit, et elle commence aux températures relativement basses.

La température à laquelle débute cette transformation est désignée par  $M_s$ , et s'étale sur un large intervalle de température, et la température où elle se termine est désignée par  $M_f$ .

Les positions des points  $M_s$ ,  $M_f$  ne dépend pas de la vitesse de refroidissement, elle dépend uniquement de la composition chimique de l'austénite. Pour les alliages à teneur en carbone moyennement élevée le passage de l'austénite vers la martensite apparaît à des

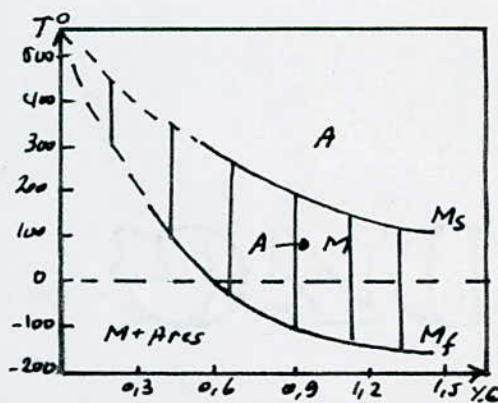


Fig. 3 position des points  $M_s$  et  $M_f$  en fonction du %C

température inférieures à 200 °C (voir Fig 3).

Cette transformation doit être assurée par un refroidissement continu. Une interruption dans le refroidissement bloque complètement la transformation martensitique.

Un accroissement de la teneur en carbone, et d'élément d'alliage sauf le cobalt et l'aluminium baissent les températures  $M_s$  et  $M_f$  en fonction de leur teneur dans l'austenite, et fait apparaître des tensions internes, et les tapures de trempe dans la martensite.

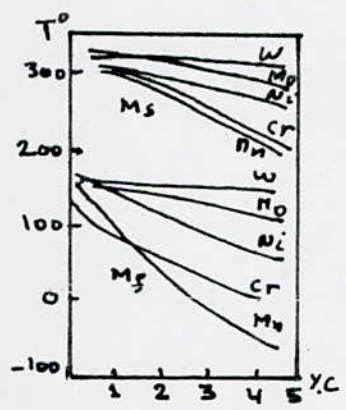


Fig 4 influence des éléments d'alliage sur les points  $M_s$  et  $M_f$

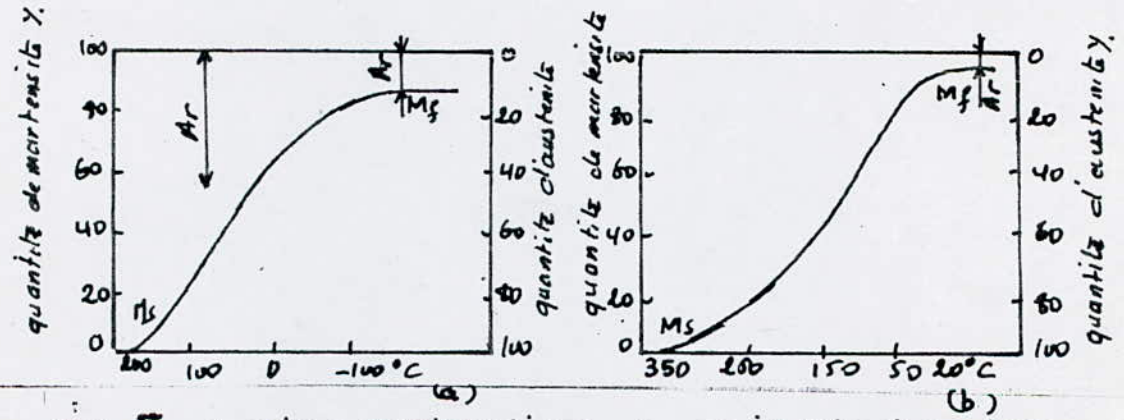


Fig 5 courbes martensitique (a) aciers à haute carbone (b) " " moyen " "

La proportion de la martensite formée au cours du refroidissement dépende uniquement de la position des points  $M_s$  et  $M_f$ . La transformation martensitique se poursuit par formation de nouveau cristaux de martensite et non par croissance des cristaux formés ce qui favorise l'augmentation de la quantité de martensite.

L'austenite résiduelle. L'austenite résiduelle dans un acier dont la teneur en carbone ou en éléments d'alliage dépasse certaine limite, est toujours présente.

Cette présence est due au faits suivants.

- L'augmentation de la teneur en carbone dans l'austenite,

abaisse le point  $M_f$  à une température inférieure à  $20^\circ\text{C}$ .

- le manque d'homogénéité dans le métal favorise l'existence des zones à teneur élevée en carbone dans l'austénite ce qui abaisse les points  $M_s$  et  $M_f$ .

Dans les aciers à teneur élevée en carbone, on contenant les éléments d'alliage. Si on effectue une trempe dans l'eau à  $20^\circ\text{C}$ , on constate la présence de l'austénite résiduelle environ (5 à 35%). Pour transformer toute cette austénite résiduelle en martensite, on effectue une trempe à basse température, un traitement par froid. Dans ce cas le point  $M_f$  se trouve au dessous de la température ambiante.

Si le point  $M_s$  est inférieur à  $20^\circ\text{C}$ , on constate la présence de l'austénite pur aux températures ambiantes.

Stabilisation de l'austénite. Si on maintient quelque temps la température inférieure au point  $M_s$  pendant le refroidissement, l'austénite non décomposée à cette température devient stable, et la transformation de l'austénite en martensite ne déclenche qu'à une température plus basse, et avec une faible intensité, et la quantité de martensite est faible.

propriétés de la martensite. La martensite possède une dureté, et une résistance élevée. L'accroissement de la teneur en carbone croît la dureté de la martensite, et renforce son aptitude à la rupture fragile

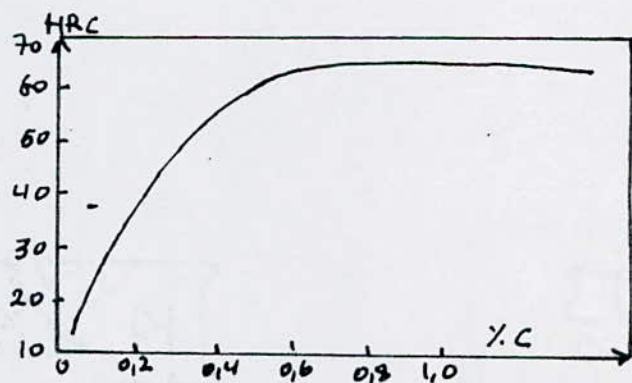


FIG 6 Dureté (HRC) de la martensite en fonction du %C

### 3 Transformation intermédiaire.

Nature de la bainite. La transformation intermédiaire consiste à former de la bainite. La bainite est une fine dispersion de ferrite



et de carbure produit par la décomposition de l'austénite dans le domaine de température qui se situe entre la transformation perlitique et martensitique.

Selon le domaine de température intermédiaire deux types de bainite peuvent être distingués

Bainite supérieure. Apparaissant généralement à des températures comprises entre  $500^{\circ}\text{C}$  et  $350^{\circ}\text{C}$ , correspond à une structure lamellaire, dans laquelle les lamelles grossières de ferrite sont séparées par un filet de carbure, se rapprochent de plus en plus avec l'abaissement de la température. Cette structure possède une tendance structurale perlitique.

Bainite inférieure. Apparaissant généralement à des températures comprises entre  $350^{\circ}\text{C}$  et celle du point  $M_s$ , correspond à une structure aciculaire analogue à celle de la martensite, les particules de carbures se déposent dans les lamelles de la phase  $\alpha$ .

Mécanisme de la transformation. La transformation bainitique cumule à la fois les éléments des transformations perlitique et martensitique: La diffusion du carbone, et le changement du réseau  $\gamma \rightarrow \alpha$ .

Aux températures correspondantes à la transformation intermédiaire, les atomes de carbone ont une mobilité appréciable, alors que les atomes de fer et les éléments d'alliage sont relativement immobiles. La redistribution des atomes de carbone dans l'austénite conduit à l'apparition des zones riches et pauvres en carbone.

La position du point  $M_s$  dans le domaine des températures intermédiaire, permet à les zones d'austénite à faible carbone, de subir une transformation  $\gamma \rightarrow \alpha$  qui se déroule suivant un mécanisme martensitique.

Les zones d'austénite riches en carbone, et pendant le séjour isotherme déclenche la précipitation des carbures, ce qui appauvrit naturellement ces zones en carbone, et favorise le développement de sa transformation  $\gamma \rightarrow \alpha$  qui se déroule suivant un mécanisme martensitique.

Pour une température donnée, les atomes de carbone ont une mobilité active, et la solution  $\alpha$  devient le siège de dégagement des carbures juste après le mécanisme  $\gamma \rightarrow \alpha$ .

Le processus de formation de la bainite supérieure et inférieure est le même, mais la différence présente dans le domaine de température. Pour la bainite supérieure les cristaux austénitiques sont le siège d'une différenciation de la concentration en carbone, les zones d'austenite deviennent sursaturées en carbone, alors que la phase  $\alpha$  est pauvre en carbone, ceci favorise naturellement le dégagement des carbures surtout par l'austenite.

Pour la bainite inférieure il se produit le phénomène inverse: généralement, l'austenite s'enrichit peu en carbone, et la phase  $\alpha$  ainsi formée est sursaturée en carbone. Il en résulte que les carbures se dégagent surtout dans les cristaux de la phase  $\alpha$ .

La transformation bainitique ne se poursuit pas jusqu'à la fin. Pour cette raison l'austenite non décomposée par le maintien isotherme peut subir par l'abaissement de la température une transformation martensitique suffisamment forte ou ne décomposer pas.

Propriétés de la bainite. Les structures intermédiaires sont plus dures que la perlite et leur dureté augmente progressivement, lorsque la température de formation diminue.

Les propriétés de la bainite inférieure confèrent certaines qualités, en particulier une meilleure ductilité. Pour les aciers à haute teneur en carbone ont une bonne propriété au fluage aux températures 400 - 500°C.

La décomposition de l'austenite dans le domaine supérieur réduit la plasticité de l'acier par rapport aux produits de sa décomposition. Cette dégradation de plasticité est due aux dégagements des carbures relativement grossières aux joints des grains de ferrite. Dans le domaine inférieur la dureté, la résistance, la plasticité sont légèrement améliorées. On remarque que plus la température décroît, plus la dureté et la résistance augmentent jusqu'à on arrive à des propriétés analogues à celle des propriétés de la martensite.

## II INFLUENCE DES ÉLÉMENTS D'ALLIAGE SUR L'ACIER

### 1 Généralité.

L'addition des éléments d'alliage peut donner lieu.

- + à la formation des solutions solides dans le fer.
- + à la dissolution de ces éléments dans la cémentite en remplaçant dans son réseau les atomes de fer ou à la formation des carbures particuliers.
- + à la production (lorsque la teneur en élément d'alliage est élevée) des composés intermétalliques avec le fer.

### 2 Influence des éléments d'alliage sur les transformations polymorphes du fer.

L'action exercée par les éléments d'alliage sur les variétés allotropiques du fer permet de classer en deux groupes.

#### 2.1 Éléments gammagènes. Ces éléments abaissent le point $A_3$ et élèvent le point $A_4$ . Il en résulte

que le diagramme d'équilibre fer-élément d'alliage enregistre une extension du domaine de la phase  $\gamma$  (Fig 1).

On rapporte à ce groupe d'éléments le manganèse et le nickel. On peut également ranger parmi les éléments de ce groupe le cuivre, le carbone et l'azote à cette différence près que leur faible teneur dans l'alliage étend le domaine d'existence de la phase  $\gamma$  mais leur solubilité dans le fer étant limitée, l'augmentation de la teneur en cuivre, en carbone et en azote retreint d'abord le domaine de la phase  $\gamma$  pour le faire disparaître ensuite.

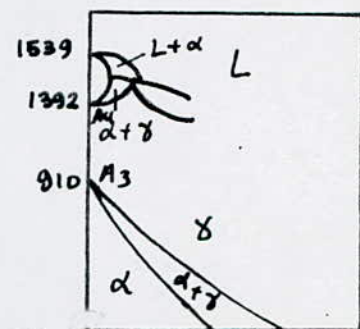


Fig 1 teneur en élément d'alliage  $\gamma$ .

## 22 Éléments alphagènes

Les éléments tels que Cr, W, Mo, V, Al, Si, etc abaissent le point  $A_4$  et élèvent le point  $A_3$ . Il en résulte que pour une concentration déterminée des éléments d'alliage (voir le point  $y$  de la fig 2), les lignes de transformation  $A_3$  et  $A_4$  se rencontrent et le domaine de la phase  $\gamma$  se trouve complètement fermé.

L'introduction dans un alliage de plusieurs éléments ne renforce pas toujours leur action sur les domaines  $\alpha$  et  $\gamma$  du diagramme d'équilibre. Il arrive qu'ils exercent une action opposée à l'action observée dans les alliages binaires. Ainsi dans la solution solide ternaire Fe - Cr - Ni, le chrome ne retreint pas mais élargit le domaine de la phase  $\gamma$ .

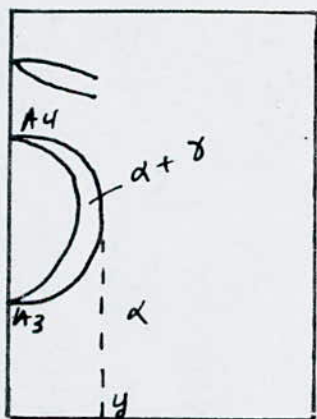


FIG 2 teneur en élément d'alliage en  $\gamma$ .

influence des éléments d'alliage sur le polymorphe du fer

## 3 Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de la ferrite et de l'austénite.

Les éléments d'alliage dissous dans la ferrite augmentent sa charge de rupture sans modifier sensiblement son allongement, à l'exception du Mn et du Si lorsque leur teneur dépasse 2,5 à 3,0%. voir (FIG 3 FIG 4).

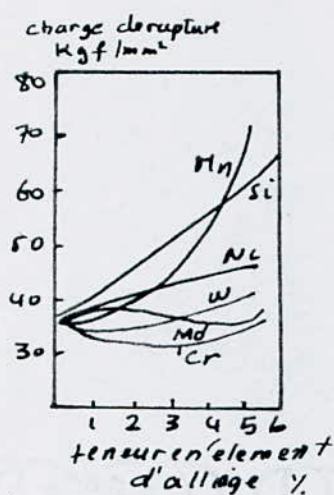


FIG 3

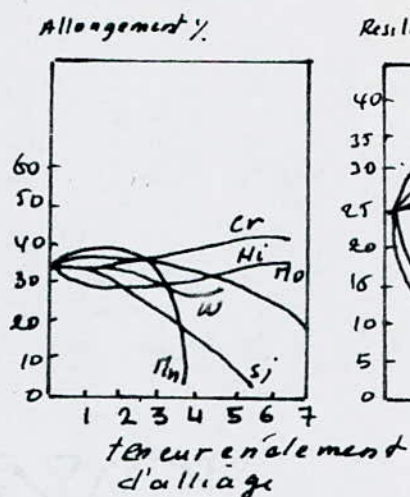


FIG 4

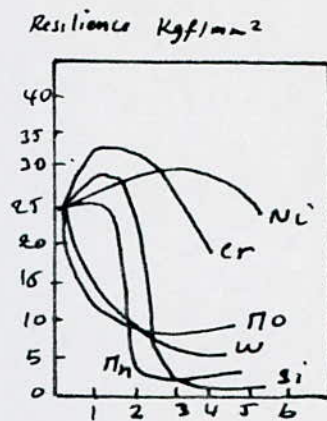


FIG 5

Influence des éléments d'alliage sur les propriétés mécaniques de la ferrite

Lorsque la teneur en éléments d'alliage est supérieure à 1 ou 2 %, ils diminuent la résilience (FIG 5). Il n'y a que le nickel qui présente une exception et qui, en rendant la ferrite plus résistante, accroît en même temps sa résilience. C'est ce qui explique la ductilité élevée des aciers au nickel.

Les éléments d'alliage dissous dans le fer  $\delta$  augmentent la résistance de l'austénite aux températures ordinaires et élevées.

4 Influence des éléments d'alliage sur la phase de carbure. En se basant sur le comportement des éléments d'alliage par rapport au carbone on peut les classer en trois groupes

4.1 Les éléments graphitisants. Au quels on rapporte le silicium, le nickel, le cuivre et l'aluminium et qui font partie de la solution solide

4.2 Les éléments neutres. Au quels on rapporte le cobalt qui ne forme pas de carbures avec l'acier et ne provoque pas de graphitisation.

4.3 Les éléments carburigènes. Qu'on peut les classer de la manière suivante en fonction de l'augmentation de leur affinité pour le carbone et de la stabilité des phases de carbures qu'ils forment:  $Fe \rightarrow Mn \rightarrow Cr \rightarrow Mo \rightarrow W \rightarrow Nb \rightarrow V \rightarrow Zn \rightarrow Ti$

Lorsque la teneur en éléments d'alliage (Mn, Cr, Mo, W) est faible, ils se dissolvent dans la cémentite en remplaçant dans cette dernière les atomes de fer.

La composition de la cémentite dans ce cas s'exprime par la formule  $(Fe, M)_3C$  où M est l'élément d'alliages. Les éléments carburigènes plus forts (Ti, V, Nb, Zn) ne se dissolvent pratiquement pas dans la cémentite et forment des carbures correspondants.

5 Combinaisons intermétalliques:

Lorsque la teneur en éléments d'alliages est élevée, ils forment avec le fer et entre eux des combinaisons intermétalliques.

Le rôle des phases intermétalliques est importants surtout pour les alliages de fer à faible carbone ou elles assurent le durcissement par dispersion.

Les phases  $\delta$  (alliage Fer-Cr) et X (de composition  $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$  et  $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ ) fragilisent un alliage, leur présence est donc indésirable.

6 Classes structurale des aciers alliés.

Selon la structure obtenue par refroidissement lent, on distingue cinq types d'aciers.

6.1 Aciers perlitiques. Ce sont des aciers faiblement alliés ayant une structure analogue à celle des aciers non alliés.

6.2 Aciers ferritiques. Ce sont des aciers riches en éléments alphas (Cr, Mo, W, Ti, V, Si) et présentent un diagramme d'équilibre sans lignes de transformation  $\delta \rightarrow \alpha$ .

6.3 Aciers austenitiques : ils sont très riches en éléments gammagènes (Ni, Mn, Cr) et se présentent, à température ambiante sous forme de solution solide  $\gamma$ .

6.4 Aciers martensitiques. Leurs courbes T.T.T présentent une période d'incubation suffisamment grande pour qu'un refroidissement à l'air conduise à une structure martensitique (aciers auto trempants)

6.5 Aciers Ledéburitiques. Comme les fontes blanches ils comportent l'eutectique ledéburitique et sont soumis à des traitements thermiques complexes.

### 7 Etude des principaux aciers alliés.

#### 7.1 Acier au nickel

le nickel est un élément gammagène, soluble en toute proportion dans la ferrite et dans l'austénite.

Influence du nickel sur la structure, la transformation, et les propriétés

- abaisse les température de transformation
- IL a grandisse la zone austenitique (Fig 6)
- Accroît la trempabilité, et augmente la pénétration de trempe.
- IL diminue la vitesse critique de trempe.
- Le nickel s'oppose aux grossissements des grains de ferrite pendant le chauffage
- le nickel réduit les risques de trempe, tel que tapures et déformation.
- La solubilité du nickel dans la ferrite augmente la résistance mécanique sans augmenter la fragilité.
- Les aciers en nickel présentent une meilleure résistance à la traction avec limite de fatigue accrue.

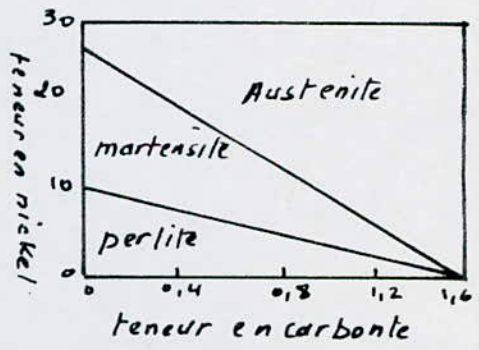


FIG 6 diagramme de GUILLET

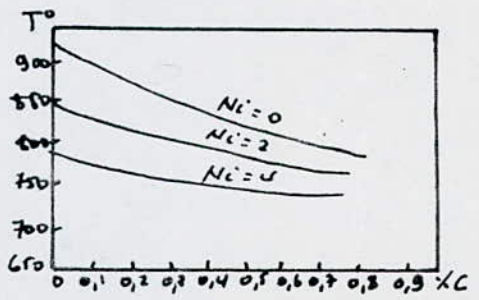


FIG 7 position du Point  $A_{c2}$

### 7.2 Acier au chrome

Le chrome est element alphasgene et carburigene.

Influence du chrome sur la structure et les proprietes

- Le chrome eleve le point  $A_1$  et abaisse  $A_3$
- IL accroît la trempabilite et augmente la penetration de la tremp
- L'acier au chrome est sensible à la surchauffe
- Durant le revenu le chrome augmente la resistance à l'adoucissement.
- Aux hautes temperatures, le chrome accroît les caracteristiques mecaniques.
- IL accroît la durete des aciers, la resistance à l'usure et à la traction sans augmenter la fragilité

pourcentage du chrome	Domaine d'utilisation
1%	outils, roulement a billes, limes, engrenages
5%	Tubes de crackages, outils
13%	coutellerie

### 7.3 Aciers au manganese.

Le manganese est unelement gammagene, et il est soluble dans la ferrite.

Influence du manganese sur la structure et les proprietes

- Le manganese abaisse les points de transformation.
- accroît la trempabilite, et il est diminue la vitesse critique de tremp.
- Le manganese facilite la surchauffe.
- Le manganese augmente les risques de tremp telque tapure et de deformation à cause de l'abaissement de la temperature.

pourcentage du carbone	pourcentage du manganese	Domaine d'utilisation
1-1,5 %C	12-14% Mn	aiguilles du chemin de fer, broyeur
1% C	1,5-2% Mn	outils de forme complique
0,65%	1-2% Mn	ressorts



#### 7.4 Aciers au tungstène.

Le tungstène est un élément alphagène et carburigène.

Influence du tungstène sur la structure et les propriétés de l'acier.

- le tungstène accroît fortement la trempabilité aux faibles teneurs
- Dans les aciers lédeburitiques, le tungstène est sous forme de carbures dispersés très durs et très stables, et augmente sa résistance à l'usure.
- Le tungstène mis en solution par austénisation retarde l'adoucissement durant le revenu.
- Il est employé pour les aciers à outils.

#### 7.5 Aciers au cobalt.

Influence du cobalt sur la structure et les propriétés de l'acier.

- Il élève la température de la trempe et les points de fusion de l'acier
- Le cobalt diminue la trempabilité lorsqu'il dissous en toutes proportions dans la ferrite et dans l'austenite.
- Le cobalt retarde la précipitation de la ferrite.
- Le cobalt améliore la résistance au fluage.
- Il est utilisé surtout pour les aciers d'outils (ARES), et aciers à haute résistance et alliage réfractaire

#### 7.6 Aciers au molybdène.

Le molybdène est un élément alphagène et carburigène à des effets analogues à celle du tungstène.

Influence du molybdène sur la structure et les propriétés de l'acier

- Le molybdène accroît fortement la trempabilité
- Élève la température de grossissement de l'austenite, et en même temps il s'oppose au grossissement des grains
- diminue la fragilité pendant le revenu à haute température

Mo %	0.5	1	1.5	2	3	5
E $N/mm^2$	175	180	197	245	225	169
R $N/mm^2$	365	390	405	482	485	398
A %	38	37	33	29	31	39
$\epsilon$	69	63,8	64	60	62	79

Le tableau précédent present l'influence du pourcentage du molybdene sur les proprietes de l'acier pour une teneur de 0.04% de carbone.

### 7.7 Aciers au silicium.

le silicium est element alphasene, et il est soluble dans la ferrite sans former de carbure.

Influence du silicium sur la structure et les proprietes de l'acier

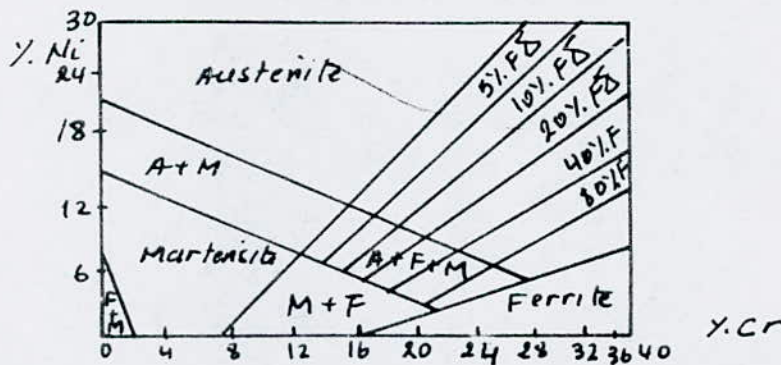
- Le silicium eleve les temperatures de transformation, et diminue la vitesse critique de trempe.
- Le silicium ameliore la trempabilite des aciers contenant les elements non graphitisants.
- Le silicium est utilise' dans les aciers comme desoxydant usuel, et accelere la decarburation

pourcentage des elements Si C Mn	Domaine d'utilisation
les aciers mangano - siliceux 1.5% 0.7 Mn 0.5% C	ressorts, vilebriquin, engrenage.

### 7.8 Aciers au nickel - chrome.

L'addition du chrome dans un acier au nickel a pour but de rendre l'acier plus homogene, et inoxydable, et d'augmenter sa charge de rupture en diminuant peu sa resiliance.

pourcentage du % C % Cr % Ni	Domaine d'utilisation
0.2-0.45 0.8-2 1-4	aciers pour construction automobile
0.1-0.4 3 4-6	engrenages, blindages, canons, projectile



### III ANALYSE DE LA REALISATION

1 Elaboration d'un support d'éprouvettes.

#### 1.1 Présentation

Afin de faciliter les prises de mesure de dureté d'une ligne rectiligne sur une éprouvette, nous allons élaborer un mécanisme permettant un double but : supporter rigidement les éprouvettes et guider convenablement ces dernières durant l'essai de dureté de rockwell.

#### 1.2 Modèle

La planche 1 illustre une vue d'ensemble en perspective du mécanisme aussi qu'une nomenclature détaillée des constituants.

#### 1.3 Définition des éléments.

Les planches 2 et 3 illustrent le dessin de définition des principaux éléments constitutifs du mécanisme, en l'occurrence le bâti et la glissière.

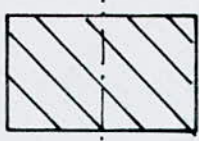
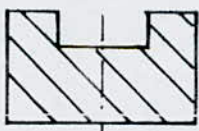
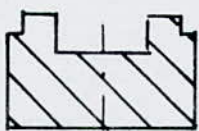
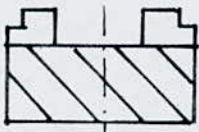
#### 1.4 Gamme d'usinage.

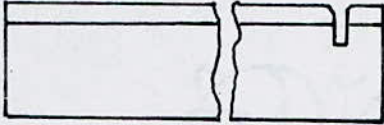
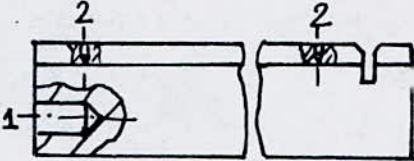
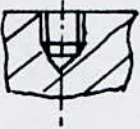
Nous présentons ici la gamme d'usinage relative à l'élaboration des pièces bâti et glissière.

## 1.5 Bati

Projet d'étude de fabrication		Bureau: ENP		Contrôle	
Ensemble Support d'éprouvette		Brut: profil rectangu- -laire	N° de pièce SE 1.02	ATELIER	
Element Bati		matiere: fonte	Cotation: pièce unique	ENP	
OP	Designation	Poste de travail	croquis		outil
	Debit de matiere profil rectangulaire	scie meccanique			Scie
1	dressage des plans paralleles	fraiseuse universelle			fraise cylindrique 1 taille
2	usinage de la rainure	fraiseuse universelle			fraise cylindrique 2 tailles
3	perçage des trou $\phi$ 5 mm	perceuse à colonne			forêt $\phi$ 5 mm
4	taroudage $\phi$ 6 mm				jeu de tarouids $\phi$ 6 mm

# 1.6 Glissiere

projet d'étude de fabrication		Bureau : ENP		Contrôle
Ensemble : Support d'éprouvette		Brut : profil rectangulaire	N° de pièce SE 1:01	ATELIER ENP
Element : glissiere		matiere : fonte	codage : pièce unique	
op	Designation	poste de travail	croquis	outil
	debit matiere profil rectangulaire	scie mecanique		scie
1	dressage des plans paralleles	fraiseuse universelle		fraise cylindrique une taille
2	usinage de la rainure longitudinale	fraiseuse universelle		fraise cylindrique 2 tailles
3	usinage des entailles laterales	fraiseuse universelle		fraise cylindrique 2 tailles
4	usinage de la rainure transversale	fraiseuse universelle		fraise cylindrique 3 tailles

5	chanfreinage	fraiseuse universelle		fraise biconique
6	perçage des trous 1 - 2 - 2	perceuse à colonne		forêt $\phi$ 2 mm $\phi$ 3 mm
7	taraudage des trous 1 $\phi$ 9 mm 2 $\phi$ 4 mm			jeu de tarauds $\phi$ 9 mm $\phi$ 4 mm

## 2 Elaboration des épreuves

### 21 Elaboration des épreuves longues

Les épreuves qui servent aux prises de mesure de dureté longitudinale, présentent les formes indiquées dans la planche 4 avec la cotation fonctionnelle correspondante puisqu'elles seront montées dans un mécanisme spécial.

La gamme d'usinage illustre les phases d'élaboration relatives à ces épreuves.

### 22 Elaboration des épreuves rondelles.

Ces derniers servent aux prises de mesure de dureté radiale, elles sont réalisées en plusieurs diamètres et présentant une même hauteur (voir Fig 1).

La gamme d'usinage illustre les phases d'élaboration relatives à ces épreuves.

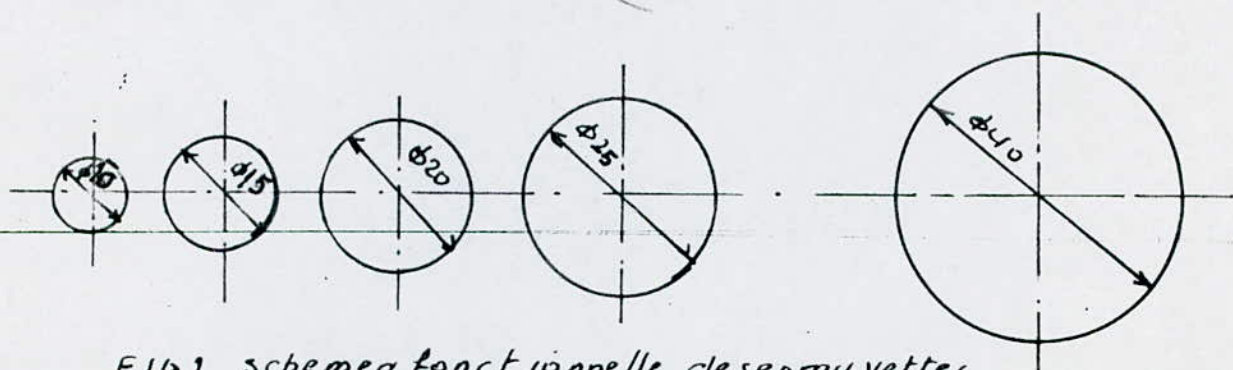
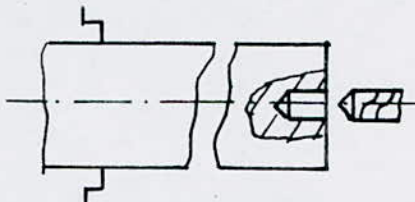
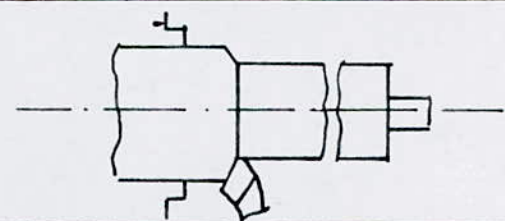
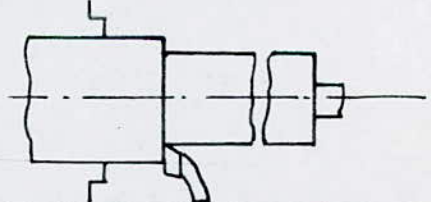
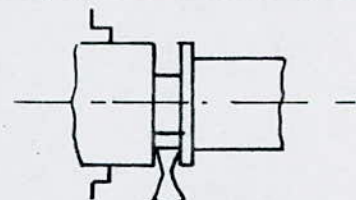
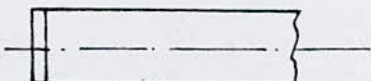


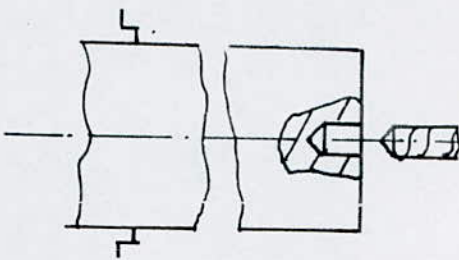
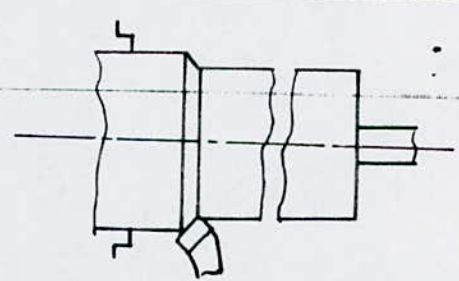
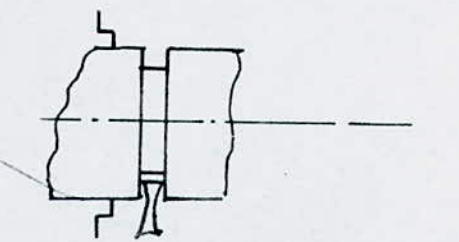
Fig 1 schéma fonctionnelle de sept épreuves rondelles

### 23 Eprouvettes longues

Projet d'étude de fabrication		Bureau : ENP		Contrôle
Ensemble : eprouvettes		Brut : profil rond	No de pièce	ATELIER ENP
Element : eprouvettes longues		matière : 12NC11 30NC11	Codena : 6 pièces	
OP	Désignation	Poste de travail	Croquis	outil
	debit de matiere profil rond	scie mecanique		scie
1	centrage	Tour		forêt de centrage
2	chariotage au diametre extérieur	TOUR		outil à charioter
3	chariotage et dressage de l'épaulement	TOUR		outil à dresser
4	trouçonnage	TOUR		outil couteau
5	Fraisage des meplats	fraiseuse universelle		fraise à une taille



## 24 E prouvettes rondelles

Projet d'étude de fabrication		Bureau: ENP		contrôle
Ensemble: Eprouvettes		Brut: profil rond	N° de pièce	ATELIER ENP
Element: eprouvettes rondelles		matière: 12 NC11 30 NC11	Codage: 54 pièces Ø 5-10 -15-20-25-30-35-	
OP	Designation	Poste de travail	croquis	outil
	debit de matiere profil rond	scie meconique		scie
1	centrage	Tour		forêt de centrage
2	chariotage au diametre voulu 40 35 30 25 20 15 10	Tour		outil à charioter
3	tronçonnage	Tour		outil couteau

## IV TREMPABILITE ET PÉNÉTRATION DE TREMPE

### 1 Trempeabilité.

La trempeabilité d'un acier est son aptitude à augmenter sa dureté après la trempe, et de former de la martensite en se refroidissant l'acier à partir d'une structure austénitique.

La trempeabilité de l'acier est définie essentiellement par le pourcentage de carbone. Plus le carbone est élevé dans la martensite, plus sa dureté est grande. Elle dépend aussi des éléments d'alliage, de la répartition des carbures.

### 2 Pénétration de trempe.

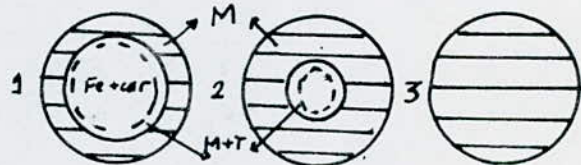
La pénétration de trempe est l'aptitude d'un acier à recevoir une couche trempée à structure martensitique ou troostite plus martensite.

La pénétration de trempe dépend de la composition chimique de l'acier, de la dimension des grains austénitiques, de la section et forme des pièces.

Pendant le refroidissement des pièces, l'obtention de la structure désirée dépend essentiellement de la vitesse critique de trempe. Une structure martensitique totale n'est obtenue que si la vitesse de refroidissement au cœur de la pièce est supérieure à la vitesse critique de trempe (pour éviter la formation de la perlite et de la bainite). Dans le cas contraire, la trempe ne pénètre dans la pièce qu'une certaine profondeur et la pénétration de trempe est incomplète. Dans ce cas le cœur sera le siège d'une décomposition d'austénite avec précipitation d'un agrégat de ferrite + cémentite ou (troostite, sorbite, perlite).

La pénétration de trempe peut être déterminée par la distance de la surface de la pièce à la zone martensitique ( $n\%$  martensite,  $(100-n)\%$  troostite) (voir FIG 1).

FIG 1 illustre la pénétration de trempe pour un acier allié  
3 structure martensitique



On peut déterminer la pénétration de trempe d'après la dureté. La dureté d'une structure troostite + martensite est déterminée par le pourcentage de l'acier en carbone, et les éléments d'alliage avec un degré faible.

Le tableau ci-dessous représente la dureté des couches martensite + troostite en fonction du pourcentage de carbone.

%. carbone	Dureté en HRC des couches Troostite + Marten	
	acier au carbone	acier faiblement allié
0,08 - 0,17	-	25
0,18 - 0,22	25	30
0,23 - 0,27	30	35
0,28 - 0,32	35	40
0,33 - 0,42	40	45
0,43 - 0,52	45	50
0,53 - 0,62	50	55
> 0,62	> 60	> 65

## 2.1 Influence des éléments d'alliage sur la pénétration de trempe.

Tout d'abord le carbone, influe sur la pénétration de trempe en fonction de son pourcentage dans l'acier, en augmentant cette teneur, la dureté accroît.

La pénétration de trempe dépend de la vitesse critique de trempe qui diffère suivant les aciers, et de la stabilité de l'austénite. Cette stabilité de l'austénite est renforcée sur tout par l'addition simultanée en proportions accrues de plusieurs éléments d'alliage. Ces éléments d'alliage qui diminuent brusquement la vitesse critique de trempe, en augmentant la stabilité d'austénite (voir Fig 2), et rendre la profondeur de trempe beaucoup plus grande que dans le cas des aciers au carbone.

Parmi les alliages qui augmentent cette profondeur de trempe le Cr, Mn, Mo par contre l'influence de Ni et Si est relativement faible. Le cobalt agit différemment, et augmente la vitesse critique de trempe.

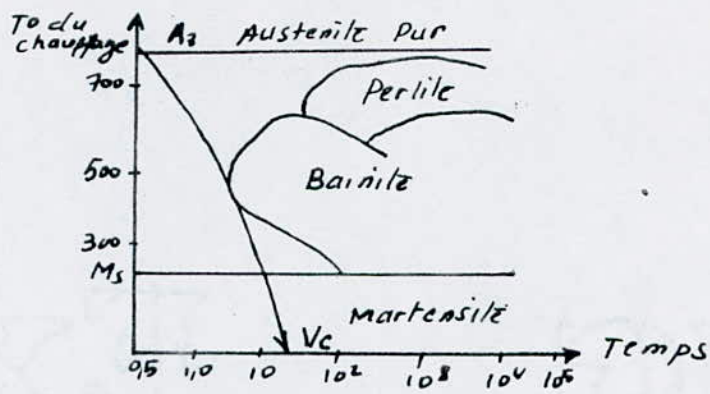


FIG 2 illustre la position de la vitesse critique dans trempe dans le diagramme T.T.T

2.2 Influence de la dimension du grain sur la pénétration de trempe. Pendant le chauffage l'augmentation de la température et la durée grossissent les grains austénitiques, et la surface des joints diminue. Cette grosseur du grain accroît la profondeur de trempe, et l'état martensitique est donc facile à réaliser avec un grain grossier que pour un acier à grain fin.

2.3 Influence de la pénétration de trempe sur les propriétés de l'acier. Les propriétés des pièces de construction dépendent essentiellement de la pénétration de trempe, et surtout pour les pièces qui travaillent avec des efforts très grandes, et des charges dynamiques alternées importantes. Pour cela il faut choisir des aciers avec une grande pénétration de trempe, et une structure complètement martensitique, avec une dureté élevée. Après la trempe on exécute le revenu à haute température, et on gagne une structure sorbitique avec une dureté élevée, et une fragilité faible.

3 Méthodes de détermination de la pénétration de trempe.

3.1 Essai Jominy

3.1.1 Définition

L'essai Jominy normalisé aux États-Unis par l'ASTM, et en France par AFNOR (04-303), en URSS par GOST (5657-69)

### 3.1.2 Description.

On utilise l'essai Jominy pour la trempabilité des aciers quand la section des pièces devient ~~est~~ considérable.

L'essai consiste au début à préparer par usinage des éprouvettes cylindriques (longueur 100 mm, diamètre 25 mm) ensuite les porter à la température de trempe  $A_{c3} + 50^{\circ}\text{C}$  pendant 30 mn. On refroidit cette éprouvette dans un dispositif spécial, où elle sera maintenue verticalement sur un support et reçoit un jet d'eau froid sur l'extrémité inférieure. Le refroidissement durera environ 10 minutes, et puis on mesure la dureté sur toute la génératrice de l'éprouvette.

Après avoir déterminé les mesures, on trace les courbes de Jominy qui représentent la dureté mesurée en unité Rockwell en fonction de la distance entre le point considéré et le bout refroidi (Fig 3)

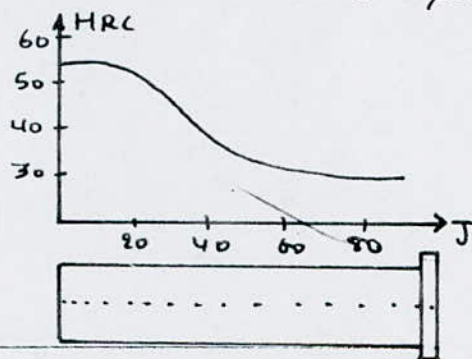


FIG 3 illustre la répartition de la dureté en fonction de la distance de Jominy

On procède à l'essai Jominy pour qualifier la trempabilité des aciers faiblement alliés à leur aptitude aux traitements thermiques. La courbe de Jominy doit être située dans une bande limitée définissant la nuance considérée (Fig 4)

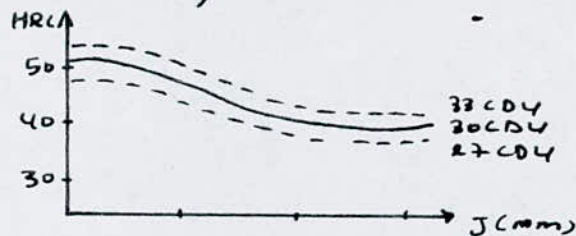


FIG 4 courbes limites pour un acier à environ 1% C et 0,2% Mn de titre voisinage en carbone 0,27 - 0,3 - 0,33

3.1.3 Action des éléments d'alliage sur les courbes de jominy.  
Les éléments d'alliage en fonction de leurs teneur dans l'acier élève les courbes de jominy vers le haut par rapport aux aciers au carbone, puisque les éléments d'alliage diminuent la vitesse critique de trempe, et augmentent la stabilité de l'austenite surfusionnée (voir FIG 5)

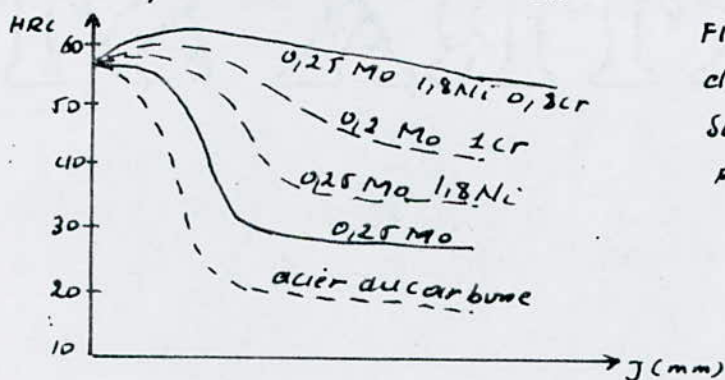


FIG 5 illustre l'influence des éléments d'alliage sur les courbes de jominy pour un acier à 0,4% C

3.1.4 Relation entre les courbes de jominy et la vitesse de refroidissement et les courbes T.T.T

Les éléments d'alliage amènent un fort déplacement des courbes T.T.T vers la droite d'autant plus marqué que la teneur en est plus élevée, et augmentent la stabilité de l'austenite surfusionnée, et l'allure de ces courbes dépend essentiellement de la composition chimique de l'acier.

On utilise les courbes T.T.T pour tracer la répartition de la vitesse de refroidissement sur une ligne génératrice de l'éprouvette. Cette répartition de vitesse de refroidissement dépend de la température, et la durée du maintien, et de l'agent refroidisseur.

Cette éprouvette est portée à la température d'austénitisation et refroidi par un jet d'eau froid sur le bout.

La structure désirée dépend de la vitesse de refroidissement causée par l'agent refroidisseur.

La vitesse critique de trempe dépend des éléments d'alliage. Si on observe le diagramme T.T.T (voir FIG 6) on trouve que la vitesse  $v_1$  donne une structure complètement martensitique et qui correspond à la vitesse maximale

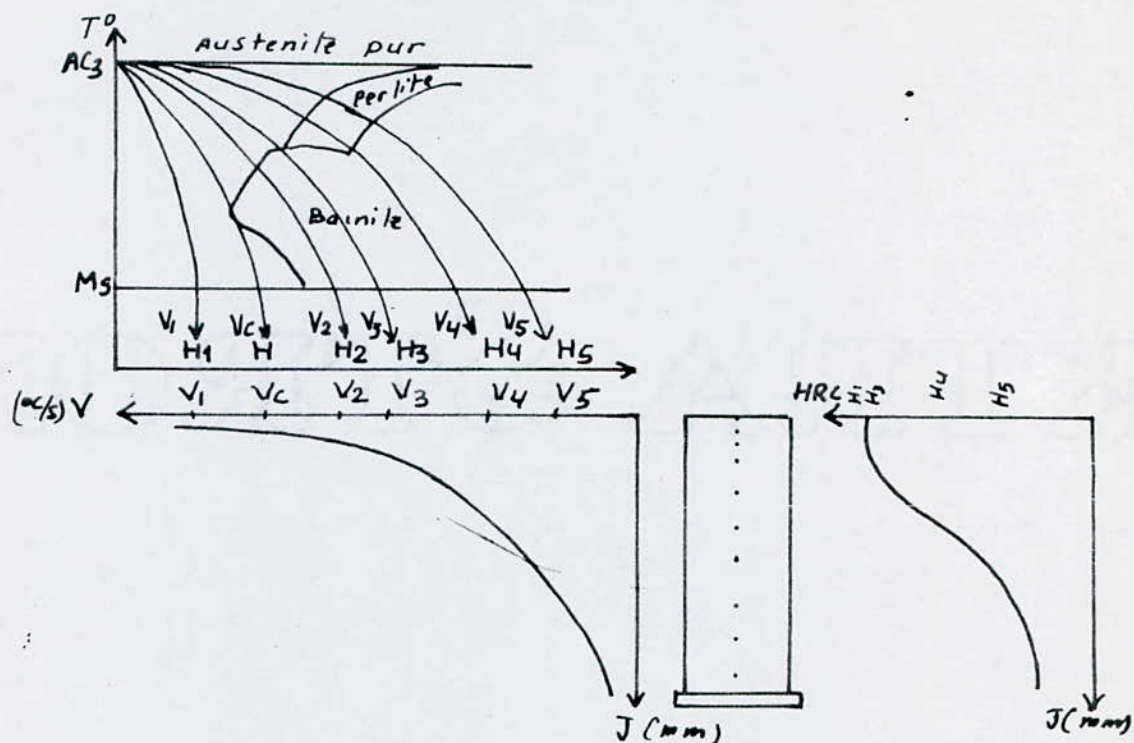


FIG 6 illustre une liaison entre les courbes (dureté, T.T.T, vitesse de refroidissement)

supérieure à la vitesse critique de trempe. Si on déplace par section longitudinale on remarque que l'état martensitique n'est pas parfaitement réalisé (vitesse  $V_2$ ), et on a une constitution mixte martensite + bainite avec une vitesse de refroidissement inférieure à la vitesse critique de trempe.

Si on continue à déplacer longitudinalement, la vitesse de refroidissement continue à diminuer :  $V_3, V_4, V_5$  jusqu'à  $V_6$ . Cette valeur minimale de la vitesse correspond à l'extrémité supérieure de l'éprouvette avec une structure complexe. La répartition de la dureté est liée aussi à l'agent refroidisseur. Cette valeur maximale de la dureté correspond à la valeur maximale de la vitesse de refroidissement.

### 3.2 Trempe volumétrique.

Il existe aussi un essai pour déterminer la pénétration de trempe sur les pièces cylindriques, c'est à dire qu'on détermine cette pénétration suivant le rayon et non suivant la longueur comme dans l'essai Jominy

### 3.2.1 Description.

L'essai consiste à préparer au début par usinage des rondelles plates de différent diamètre ( $d_1, d_2, d_3, \dots$ ), les porter à la température de trempe  $A_{c2} + 50^\circ\text{C}$  pendant une durée fixe pour chaque diamètre et puis les refroidir dans bain de refroidissement (Huile, L'eau, air).

On mesure la dureté Rockwell par section transversale on obtient les courbes de pénétration de trempe (voir Fig 7)

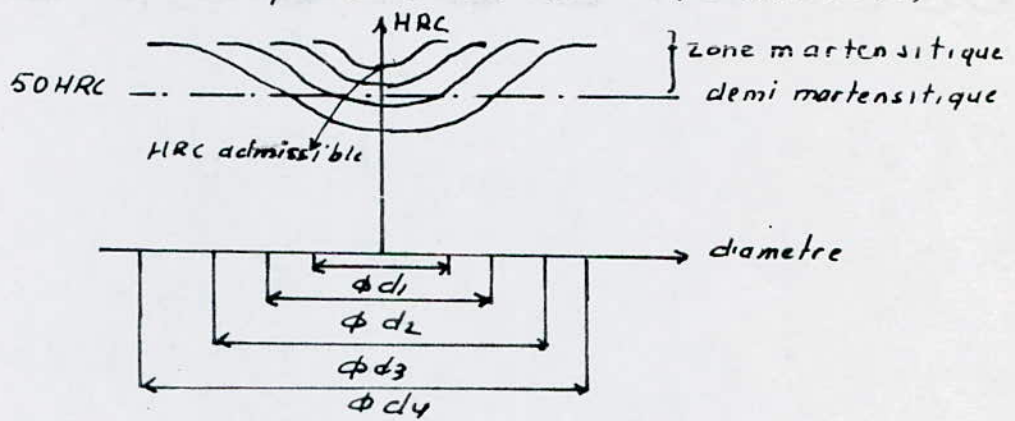


Fig 7 Distribution de la dureté Rockwell par section transversale.

Si on choisit une dureté minimale HRC admissible pour la structure martensitique, on constate que seulement le diamètre ( $d_1, d_2$ ) qui est trempé jus qu'au cœur, alors que les autres sont trempés superficiellement ou partiellement et la pénétration est incomplète.

### 3.2.2 Relation entre la vitesse de refroidissement et la dureté.

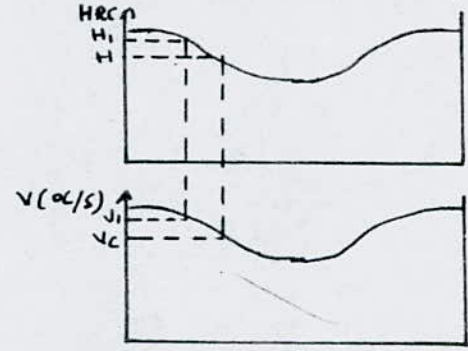


Fig 8 illustre une liaison entre la vitesse de refroidissement et la dureté d'une pièce cylindrique.



Le refroidissement auquel sont soumis les pièces, produit pour différents points de la structure des vitesses de refroidissement variables.

Les couches superficielles subissent un refroidissement rapide avec une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse critique de trempe. Dans les couches suivantes cette vitesse diminue jusqu'à devenir inférieure à la vitesse critique de trempe.

L'état martensitique est facile à réaliser dans les couches superficielles avec une pénétration totale de la trempe, et une dureté élevée, mais dans les couches internes elle devient difficile, et la pénétration de trempe est incomplète avec une structure complexe et une dureté faible.

## V UTILISATION DE NOMOGRAMME

### 1 Définition :

Le nomogramme est un ensemble de courbes présentant plusieurs milieux de refroidissement. Ces courbes indiquent la capacité de la pénétration de trempe pour des pièces de formes quelconques avec un agent de refroidissement différent. Les résultats sont exprimés souvent par le diamètre critique. La valeur de ce diamètre détermine la dimension d'une section susceptible de prendre une trempe totale à structure martensitique, ou Troostite + martensite.

### 2 Nomogramme pour les pièces de formes quelconques.

Pour déterminer la pénétration de trempe des pièces de formes quelconques, on introduit la notion du coefficient de forme, et à l'aide de nomogramme, on détermine cette pénétration à partir des pièces cylindriques complètement trempées puisque la forme de l'échantillon diffère de la forme cylindrique.

$$D_e = K_f \times D_c$$

$D_e$  diamètre de l'échantillon

$D_c$  diamètre du cylindre

$K_f$  coefficient de forme

Supposons que l'échantillon est un parallélépipède de section carrée  $a$  et longueur  $L$ , et un cylindre de diamètre  $d$  et de longueur  $L$ .

on définit le rapport  $n = L/a$  pour le parallélépipède, et  $n = L/d$  pour le cylindre, et le coefficient de forme  $K_f$  tel que

$$K_f = (S/V)_p / (S/V)_c$$

$(S/V)_p$  rapport pour le parallélépipède.

$(S/V)_c$  rapport pour le cylindre.

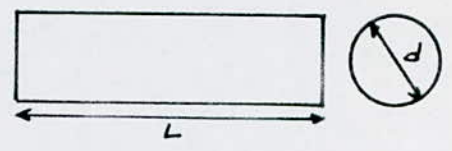
$S$  : c'est la section de la pièce considérée.

$V$  : c'est le volume de la pièce considérée.

Pour le cylindre on a

$$S = \pi r^2 + \pi r^2 + 2\pi r L = 2\pi r(L+r)$$

$$V = \pi r^2 L$$



$$S/V = 2\pi r(L+r) / \pi r^2 L = 2(L+r) / L \cdot r \text{ avec } r = d/2, \text{ et } n = L/d$$

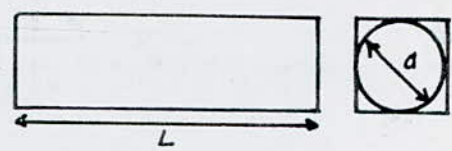
$$S/V = 2(nd + d/2) / nd \cdot d/2 = 2n+1 / n \cdot d/2$$

$$S/V = 2n+1 / n \cdot r$$

pour la parallelepipede

$$S = a^2 + a^2 + 4La = 2a^2 + 4La = 2a(2L+a)$$

$$V = a^2 L$$



$$S/V = 2a(2L+a) / a^2 L \text{ avec } L = an \text{ et } a = 2r$$

$$S/V = 2 \cdot 2r(2 \cdot 2r n + 2r) / 4r^2 \cdot 2rn = 2n+1 / n \cdot r$$

$$K_f = (S/V)_p / (S/V)_c = 2n+1 / nr \cdot nr / 2n+1 = 1$$

Le coefficient de forme est égale à l'unité. Dans ce cas la pénétration de trempe est totale dans la parallelepipede comme dans le cylindre, et la vitesse de refroidissement au coeur des deux pieces est identique.

fixons nous le rapport  $L/d = 3$ , le rapport  $L/a = n$  variable. Dans ce cas le coefficient de forme est donne' par

$$K_f = (2n+1/nr) \cdot 3R/7 = (2n+1/n) \cdot 3/7$$

La variation de  $K_f$  en fonction de  $n$  est illustrée dans le tableau suivant

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
$K_f$	1,287	1,07	1,0	0,965	0,945	0,93	0,92	0,913	0,905	0,9	0,892

3 Exploitation des resultats de l'essai jominy.  
Après avoir presente' les resultats par la methode graphique qui exprime la dureté en fonction de la distance de jominy.

On détermine la distance entre l'extrémité refroidie et le point correspondant à la zone demi martensitique HRC 50 M (voir Fig 1).

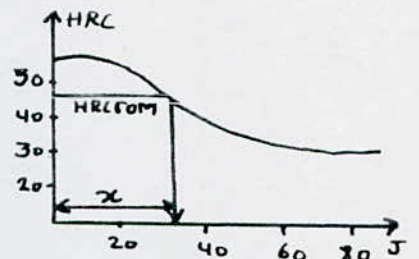


Fig 1 représente la distance HRC 50 M

Après avoir déterminé cette distance, on utilise le nomogramme, et on détermine le diamètre critique. Ce diamètre est le diamètre maximal d'une éprouvette trempée à cœur dans les conditions d'un refroidissement parfait.

Comment on utilise le nomogramme ?

Dans la partie supérieure de nomogramme il existe deux échelles (I, II). L'une représente les distances de la zone demi martensitique pour une structure de 50% Troostite et 50% martensite, et l'autre de même mais simplement pour une structure complètement martensitique.

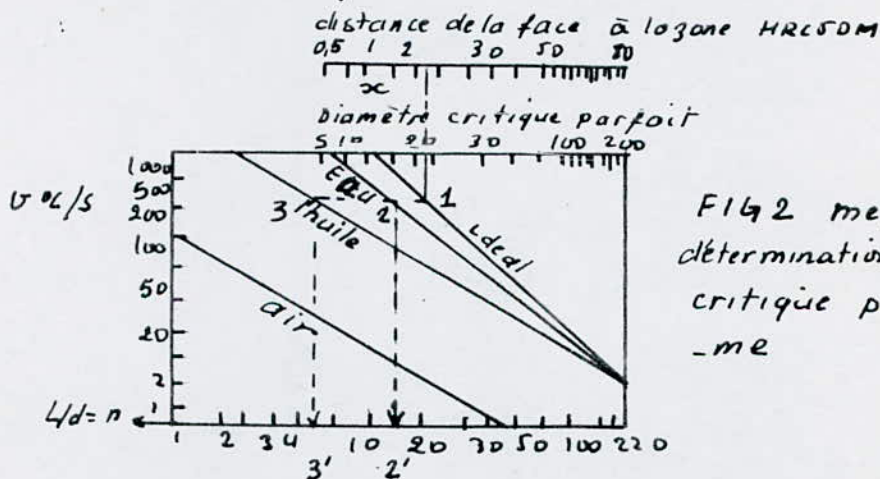
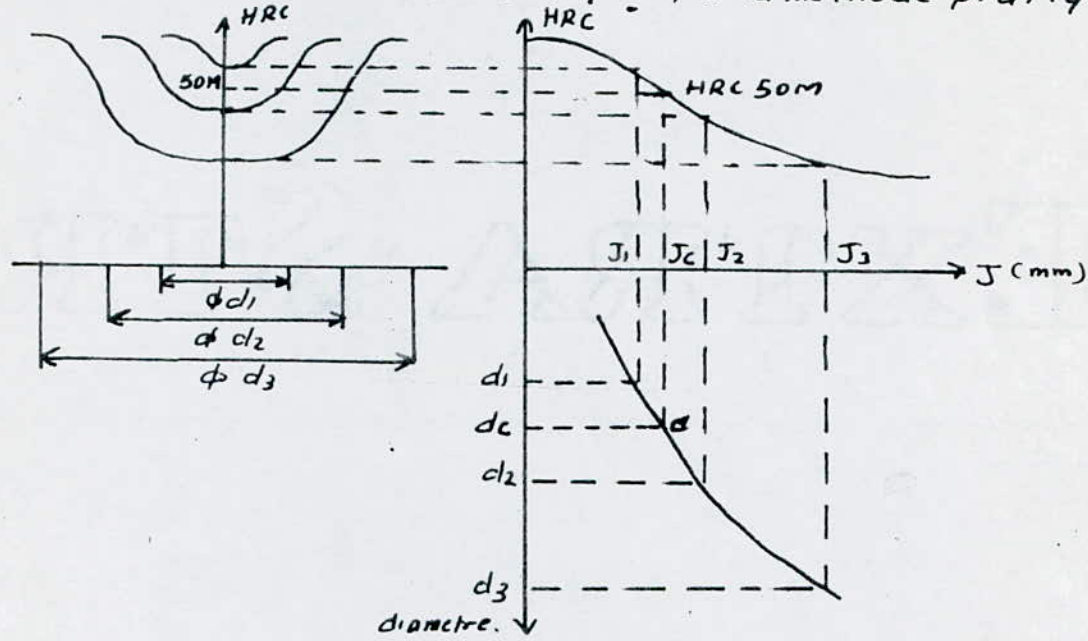


Fig 2 méthode de détermination du diamètre critique par le nomogramme

Après avoir déterminé la distance  $x$  sur l'échelle désirée I ou II, on abaisse à partir de ce point une perpendiculaire jusqu'à où l'intersection avec la courbe de refroidissement idéal (point 1). Pour passer au diamètre critique réel, on mène du (point 1) une horizontale jusqu'à l'intersection avec les courbes de refroidissement suivantes : (eau (2), l'huile (3), air (-)). A partir de ces points on abaisse encore des perpendiculaires sur l'échelle du diamètre critique. Les points 2', 3' indiquent la valeur recherchée pour chaque rapport  $L/d = h$  (voir Fig 2).

#### 4 Détermination du diamètre critique par la méthode pratique



Cette méthode est utilisée pour déterminer le diamètre critique des pièces trempées en passant par les courbes de Jominy. Après avoir représenté les courbes de Jominy, de dureté transversale, et diamètre des pièces trempées en utilisant un seul agent de refroidissement, on détermine le diamètre critique par la recherche dans un premier temps de la distance entre le bout refroidi et le point correspondant à la zone de demi-martensitique, et à partir de ce point on abaisse la perpendiculaire jusqu'à son intersection avec la courbe  $d = f(J)$ . On mène de ce point (a) une horizontale jusqu'à l'intersection avec l'ordonnée  $d$ . Le diamètre critique indique la valeur recherchée.

En général après la trempe dans l'eau, les aciers aux carbones ont une pénétration totale pour des pièces de  $\phi$  12 mm, et pour les aciers alliés ce diamètre arrive à un  $\phi$  (50 - 100 mm). Pour obtenir une pénétration totale pour des pièces de  $\phi$  (200 - 300 mm), il faut exécuter cette trempe dans l'huile parce que la vitesse critique de trempe est faible et surtout par l'addition des éléments d'alliage.

## VI ÉTUDE PRATIQUE DE LA TREMPABILITÉ

### 1 Installation et opération pour essai de trempabilité.

#### 1.1 Dispositif nécessaire pour l'installation.

L'installation de trempabilité doit comporter les dispositifs suivants : un dispositif hydraulique pour le refroidissement des échantillons, un four électrique pour le chauffage de ces dernières, un appareil de mesure de dureté (duromètre Rockwell).

Afin d'améliorer les mesures, il est plus commode de placer les dispositifs dans l'ordre suivant :

On dispose un four électrique en premier lieu puis on place à côté de ce dernier l'installation hydraulique et en troisième lieu le duromètre de Rockwell (voir Fl. 1).

#### 1.2 Mode opératoire.

Après avoir choisi la nuance d'acier pour effectuer les essais de trempabilité, on prépare, par usinage, des éprouvettes dont les formes et les dimensions sont indiquées dans le chapitre III.

##### 1.2.1 Essai jominy.

Après (avoir) la réalisation des éprouvettes, on la met dans un couvercle avec une quantité de graphite. Ce graphite sert à préparer une atmosphère calme pour éviter la décarburation et la des oxydations du métal durant le chauffage, puis on la met dans four électrique qui, par un maintien à une température isotherme  $A_{c3} + 50^{\circ}C$  pendant 30 minutes, permet la transformation complète de l'acier en austénite.

On tire l'éprouvette du four, et on la place sur un support de l'installation de refroidissement. Cette éprouvette est maintenue verticalement, et après l'ouverture du robinet d'arrêt, elle reçoit un jet d'eau froid sur l'extrémité inférieure pendant un temps supérieur ou égale à 10 minutes.

Après obtention d'un refroidissement total de l'éprouvette, on la met sur dispositif spécial (voir chapitre III), et on place

Ce dernier sur le duromètre Rockwell pour effectuer les prises de dureté sur le meplat parallèle aux génératrices de l'éprouvette avec un pas de 1.5 mm.

Après 16 mesures on continue à prendre les mesures tous les 3 mm jusqu'à l'extrémité supérieure de l'éprouvette, on doit procéder d'une façon identique pour le second meplat.

### 1.2.2 Trempe volumétrique.

Après la réalisation des éprouvettes avec des diamètres différents (10-15-20-25-30-35-40), nous allons les mettre dans un four électrique, et par un maintien à une température isotherme  $A_{c3} + 50^{\circ}C$ , on obtient l'état austénitique.

La durée du chauffage est fixe pour chaque diamètre (voir tableau).

nombre (pièces)	3	3	3	9	3	3	3
diamètre	10	15	20	25	30	35	40
durée mn	15-20	20-25	30-35	35-40	40-45	45-60	50-55

Après on plonge ces éprouvettes dans différents agents de refroidissement; on commence par l'eau avec 3 pièces pour chaque diamètre, et dans l'huile avec 3 autres pièces de diamètre 25 mm, et dans l'air calme avec trois autres pièces de diamètre 25 mm, quand on aura un refroidissement total de tout l'échantillon, on mesure la dureté Rockwell suivant le diamètre.

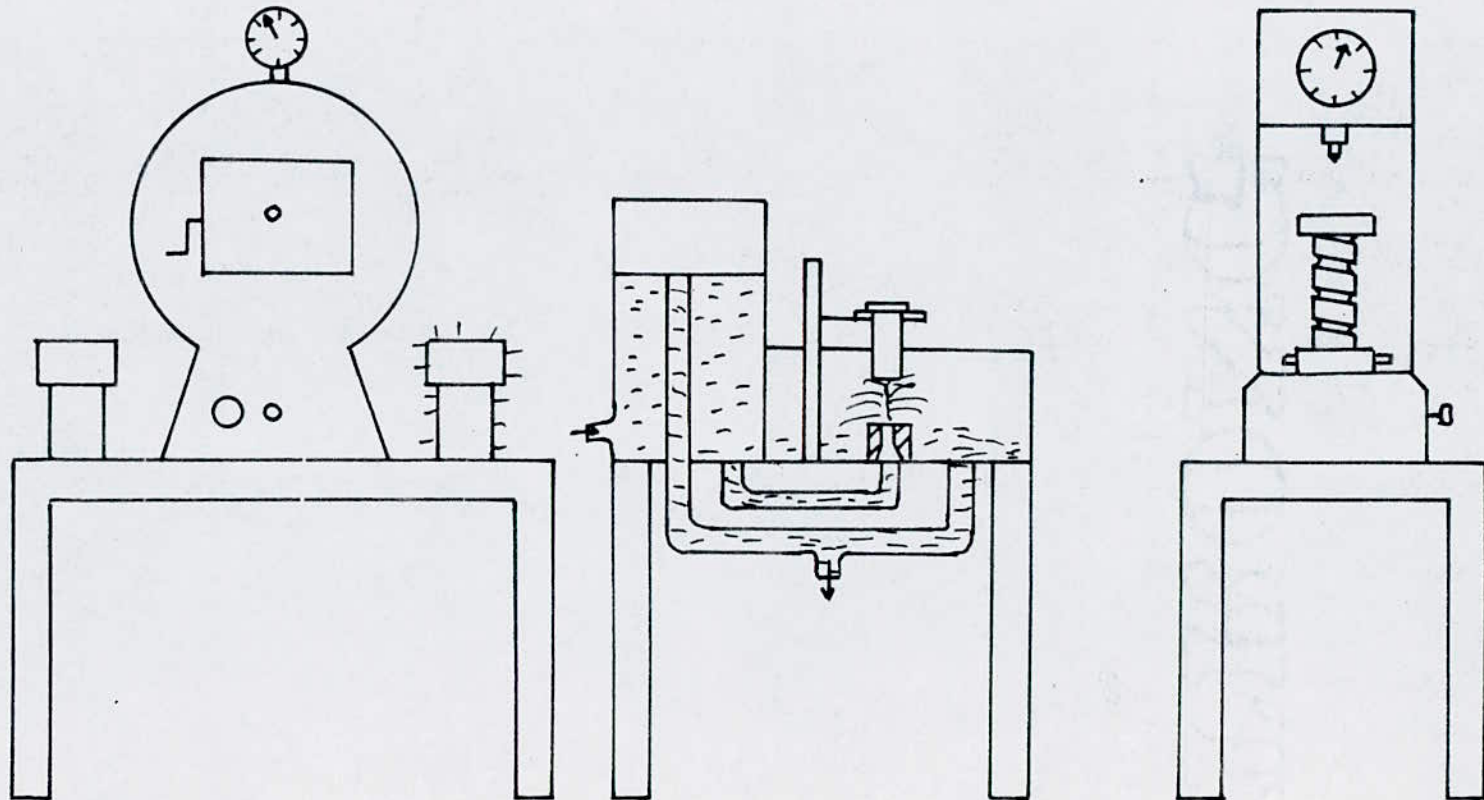
### 1.3 Elaboration des résultats

Après avoir effectué les séries de mesures de dureté, on élabore les résultats comme suit.

Pour les éprouvettes longues, on prend les moyennes des mesures et on trace les courbes de dureté en fonction de la distance entre le bout refroidi et le point considéré.

pour les éprouvettes rondelles, on prend les moyennes des mesures et on trace les courbes de dureté en fonction de la distance transversale. Après le traçage des courbes on compare les deux méthodes et on déduit les conclusions correspondantes.

FIG 1  
INSTALLATION POUR ESSAI de TREMPABILITÉ





## 2 Essai de trempabilité

### 2.1 Choix de l'acier

Pendant les essais de trempabilité, on a utilisé l'acier de nuance 12NC11 et 30NC11.

Le tableau suivant donne certain renseignements concernant l'acier utilisé :

NUANCE	TRAITEMENT THERMIQUE	Caractéristique	composition	emploi	
30NC11	forgeage 900-1050 °C Trempe à l'huile 850 °C Non revenu revenu 200 °C 300 °C 400 °C	R = 180 kgf/cm <sup>2</sup> E = 160	C : 0,3 Ni : 3 Cr : 0,8	arbre Goujon de culasse Boulons de bielle bielle vilebrequin	
		175			150
		170			145
		155			130
12NC11	forgeage 850-1100 °C Trempe à l'huile 825-850 revenu à 200 °C non cémenté 300 °C 400 °C	R = 130 kgf/cm <sup>2</sup> E = 110	C : 0,12 Ni : 3 Cr : 0,8	engrenages axe de piston - organe direction	
		125			90
		110			85

Le tableau suivant indique les séries de mesures de la dureté sur les éprouvettes longues.

distance (mm)	12NC11			30NC11		
	HRC 1 meplat	HRC 2 meplat	HRC moyenne	HRC 1 meplat	HRC 2 meplat	HRC moyenne
1.5	34.9	36.5	35.7	48.4	50	49.2
3	35.8	36.3	36.01	49.1	50.4	49.7
4.5	35.9	36.1	36	50	48.7	49.3
6	33	32.6	32.8	50.1	49.9	50
7.5	29.9	29.8	29.85	51.1	48	49.6
9	27.8	27.5	27.65	50.4	48.3	49.3
10.5	25.1	27	26.05	51	48.5	49.7

12	24.2	26.9	29.5	50.6	47.2	48.0
13.5	26.1	23.7	24.9	50.8	47.2	49
15	25.3	21.8	23.5	50.8	49.5	50.1
16.5	21.8	20.3	21.05	50.7	50.1	50.4
18	19.8	20	19.9	50	48.2	49.1
19.5	22.8	20	21.4	49.9	46.8	48.3
21	19.9	17.6	18.75	46.4	47.2	46.8
22.5	20.5	18.9	19.7	45.6	46	45.8
24	20.3	18.6	19.4	46	47.3	46.6
27	19.4	18.8	19.1	44.4	43.4	43.9
30	17.4	18.1	17.7	43.8	40.2	44
33	16.8	15.6	16.2	42.8	44	43.4
36	16.2	16.9	16.5	43.6	42.1	42.8
39	15.2	16.8	16	42.1	44	43.05
42	18.6	16.5	17.5	42.2	44.2	43.2
45	15	15.8	15.4	44.4	42.6	43.5
48	16.9	17.1	17	40.4	41.8	41.1
51	17.5	16.2	16.9	39.1	41.7	40.5
54	14.7	16	15.2	42.1	40.8	41.4
57	16.2	15.6	15.9	39.2	42.2	40.7
60	18.1	16.2	17.1	38.9	39.4	39.1
63	15.5	15.9	15.7	40	38.1	39.05
66	18.9	17	17.9	38.1	38	38.05
69	17.9	16.2	17	43	40.1	41.5
72	18.2	15.9	17	41	38.8	39.9
75	16.9	16	16.4	42.5	39.6	41.05
78	13.6	16.9	17.7	37	40	38.5
81	18.8	16.4	17.6	38	36.2	37.1
84	18.1	16.2	17.1	39.8	38	38.9
87	16.2	15	15.6	37.2	36.9	37.05
90	17.8	15.3	16.5	36.2	36.7	36.45
93	15.1	13.9	14.5	34.2	36.4	35
96	-	-	-	-	-	-
99	-	-	-	-	-	-

## Resultats de la trempa volumique

diámetro	12NC11	30NC11
φ	HRC moyenne milieu detrempa H <sub>2</sub> O	HRC moyenne milieu H <sub>2</sub> O
40	41.9 41.8 41.6 39.3 37.4 36.1 36.8	55.2 55.4 55.2 55.2 53.9 52.8
-	40.8 39.2 36.1 37.9 39.3 41.1	52.6 52.5 51.4 50 50.1 50.4
-	40.2 41.2 40 42.2 42.3	51.2 51.4 51.8 52.3 52.8 53.8 55.2
35	41 39.9 39.4 38.9 34.7 35.2	53.4 52.7 50.6 50.5 51.2 50.4
-	36.2 37 36.8 35 36.9 38.1 35.5	50.1 50.9 51.1 50.9 51.4 52.2
-	35.4 35.2 37.5 37.8 40.1 41	51.5 53.8 54.2
30	41.8 40.2 39.8 37.9 36.7 34.6	55 54.5 53.8 53.2 52.8 51.7 50.1
	36.8 35.2 35.4 37 39.8 41.5 41.8 42	50.2 51.6 52.4 52.8 53.9 54.9
25	41.8 41 40.1 39.2 40 39.1 38.9	56.9 55.7 53.6 52.2 51.8 50.9
-	38.4 38.7 40.1 41.8 42	52.8 53.8 54.1 54.7 55.8
20	42.1 41.1 40.9 38.9 39 40.5 40.8 41	55.9 55.1 54 53.4 50.9 51.2 52.2 53.8
15	38.9 38.1 36.8 34.9 35.4 38.6 39.8	54.2 52.6 51.8 52.8 53.8 52.5 53.7
10	38.3 38 36.1 36.2 38.4 38	52.1 51.8 50.6 51.6 51.8
	HRC moyenne milieu HUILE	HRC moyenne milieu Huile
25	35.1 38 36.2 33.1 34.1 32 32.1 35.1	48.2 49.5 46.8 45.2 44.4 43.8
-	38 38 35.8	46.1 46 48.6 47.8 48.4
	HRC moyenne milieu AIR	HRC moyenne milieu AIR
25	16.9 16.5 14.9 10 13 10 14.9 15	39.9 37.8 36.2 36.8 30.5
-	14.2 16.4 16.7	29.8 32.5 34.4 38.8 39.2 39.6

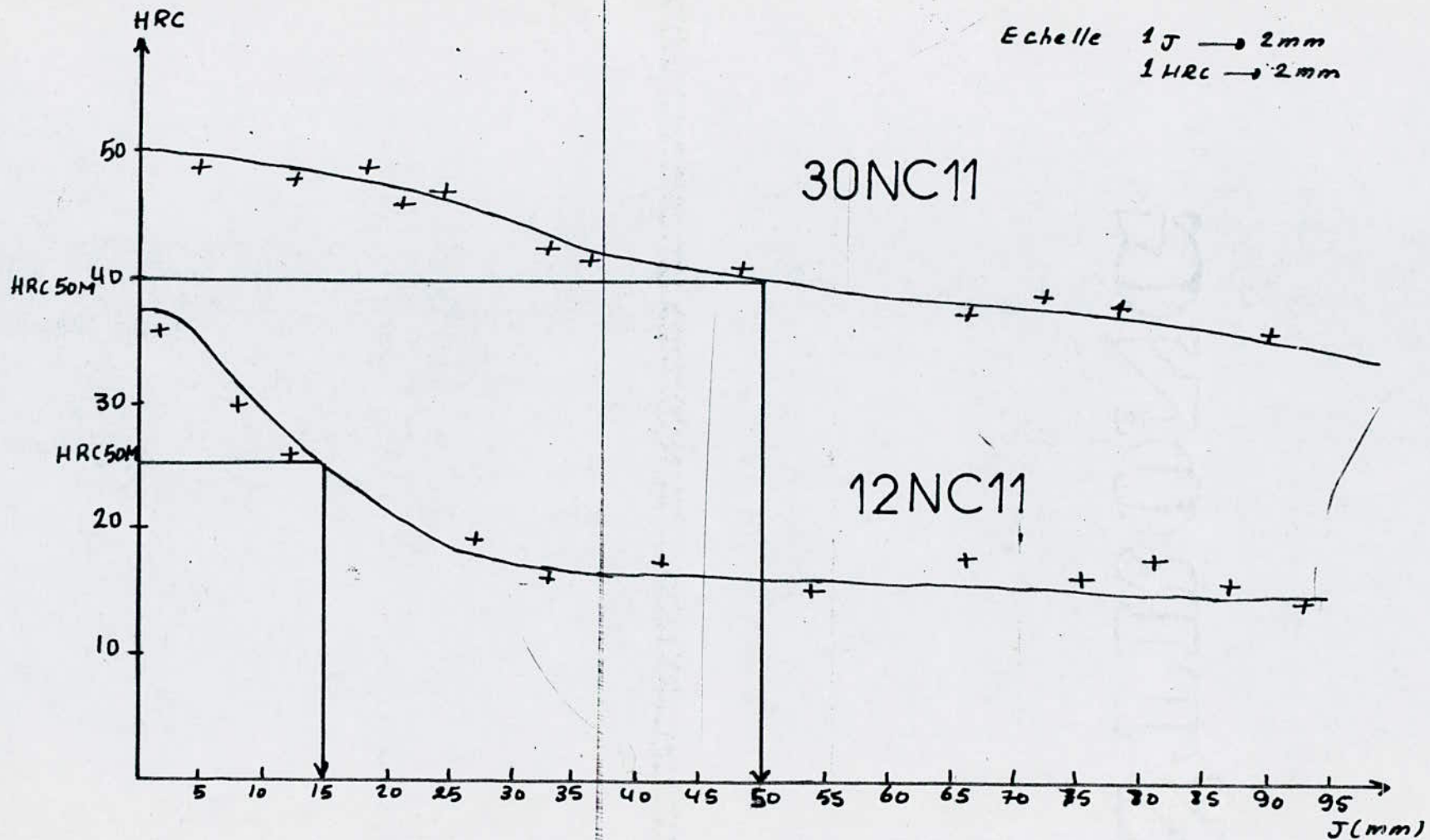


FIG 2 Représentation des courbes dureté (en HRC) en fonction de la distance J (mm)

TREMPE DANS L'EAU

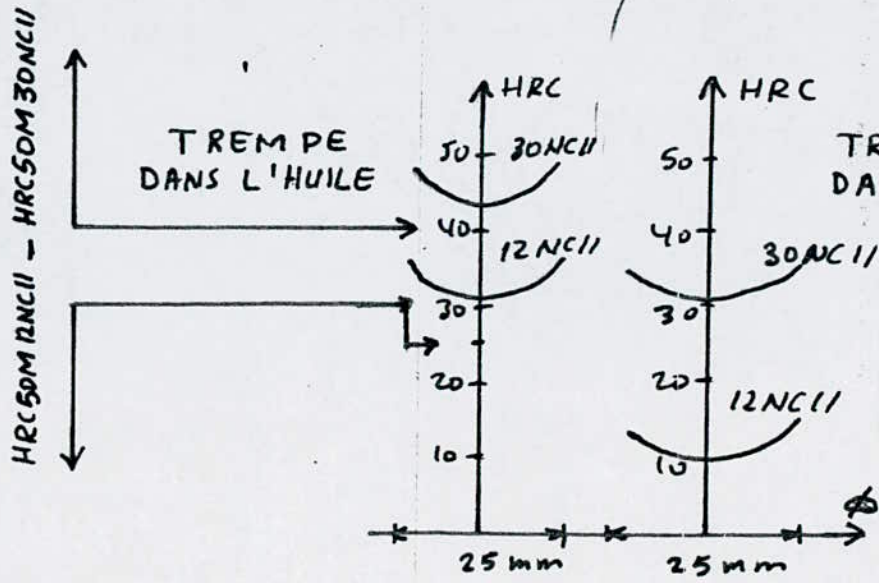
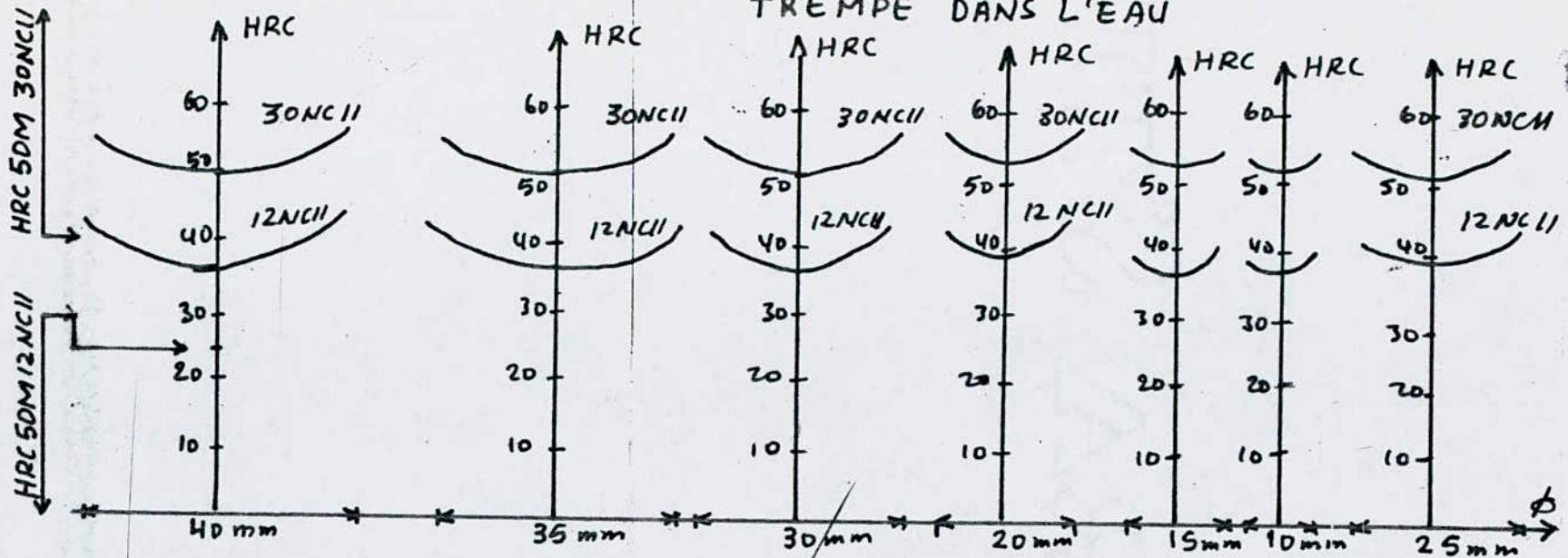


FIG 3 Represente la dureté par section transversale des cylindres

## 22 Exploitation des résultats

Après le tracé de ces courbes dureté en fonction de la distance de jominy, on peut déterminer la distance entre le bout refroidi et le point correspondant à la zone demi martensitique à l'aide du tableau suivant : dureté des couches troostite + martensite en fonction du pourcentage de carbone.

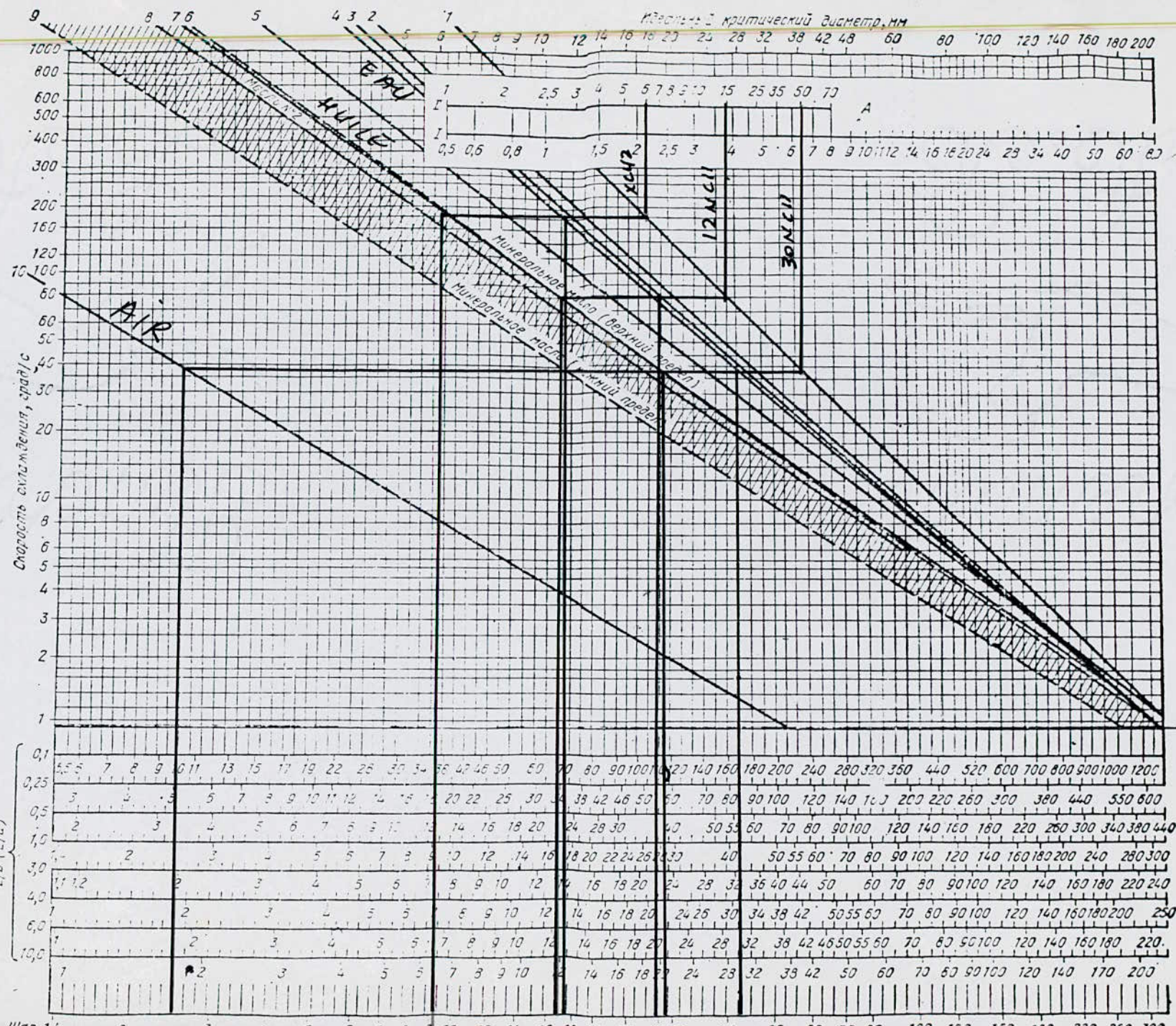
% carbone	acier allié HRC50M
0,08 - 0,17	25
0,28 - 0,32	40

Après avoir déterminé la distance de jominy, on détermine à l'aide de nomogramme les dimensions critiques des pièces avec les formes suivantes (sphère, cylindre, disque, carré, parallépipède) en utilisant les rapports  $L/d$  et  $L/a$

NUANCE	12 NC 11			30 NC 11		
	15 mm			50 mm		
Distance						
$L/d$ milieu	H <sub>2</sub> O	Huile	air	H <sub>2</sub> O	Huile	air
0.1	113	62	-	170	115	10
0.25	50	33.2	-	85	58	5.1
0.5	36	22.1	-	57.5	39	3.4
1	26	16.8	-	42	28.4	2.6
3	21.8	12.4	-	33.6	23.2	1.9
4	19.8	12.7	-	32.4	21.8	1.8
6	12.9	12.2	-	31	21	1.75
10	12	11.8	-	30	20.3	1.7

Résultats de nomogramme - acier 12NC11 - trempe dans l'eau								
$L/d$	0,1	0.25	0.5	1	3	4	6	10
pièces obtenues	$d=113$	$d=50$	$d=36$	$d=26$	$d=21.8$	$d=19.8$	$d=12.9$	$d=8$
-5	$L=11.3$	$L=12.5$	$L=18$	$L=26$	$L=65.4$	$L=79.2$	$L=113.4$	$L=180$

Крестовик критический диаметр, мм



Число иголок  $L/D$  (L/D)

0,1	5,5	7	8	9	11	13	15	17	19	22	26	30	34	38	42	46	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	240	280	320	350	440	520	600	700	800	900	1000	1200
0,25	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18	20	22	25	30	34	38	42	46	50	60	70	80	90	100	120	140	160	200	220	260	300	380	440	550	600	
0,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	24	28	30	40	50	55	60	70	80	90	100	120	140	160	180	220	260	300	340	380	440				
1,0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	30	40	50	55	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	240	280	300				
3,0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	30	40	50	55	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	240	280	300				
4,0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	30	40	50	55	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	240	280	300				
6,0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	30	40	50	55	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	240	280	300				
10,0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	30	40	50	55	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	240	280	300				

Resultats de nomogramme - acier 30NC11 - Trempe (H <sub>2</sub> O)								
L/d	0.1	0.25	0.5	1	3	4	6	10
dimension des pieces	d=170 L=17	d=85 L=21.2	d=57.6 L=28.7	d=43 L=43	d=33.6 L=100.8	d=32.4 L=129.6	d=27 L=193	d=30 L=300

Le tableau ci dessus donne les dimensions critique des pieces trempées.

## 23 Interpretation des courbes et des resultats.

Après le trace des courbes presentant la dureté en fonction de la distance Jominy, on remarque que cette dureté diminue du bout refroidi à l'extrémité supérieure de l'éprouvette.

L'effet du pourcentage de carbone a été aussi remarquable, en comparant la dureté des deux aciers pour une distance de Jominy.

Si cette distance égale à 20mm, l'acier 12NC11 possède une dureté de 23 HRC, et l'acier 30NC11 a une dureté de 47 HRC. Cette différence de dureté, explique l'effet du pourcentage de carbone dans l'augmentation de la dureté, étant donné qu'ils comportent les mêmes éléments d'alliage.



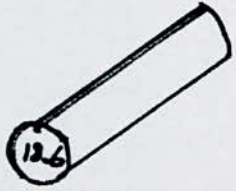
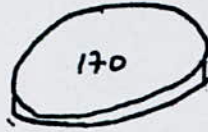

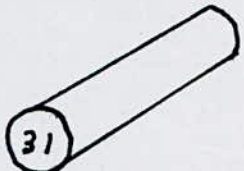
Après la détermination des distances de Jominy, on remarque que l'acier 30NC11 possède une distance (50mm) beaucoup plus grande que celle de l'acier 12NC11 (15mm).

La distance de l'acier 30NC11 (50mm) a été augmentée surtout par l'augmentation du pourcentage de carbone, puisque les deux aciers comportent les mêmes proportions en éléments d'alliage.



Les résultats obtenus par utilisation de nomogramme, explique l'effet combiné de plusieurs facteurs, pourcentage de carbone, les éléments d'alliage, le milieu de trempe.

Le tableau ci dessous montre l'effet de ces facteurs.

L/d	0.1	1	6
12 NC 11 Trempe (H <sub>2</sub> O)			
30 NC 11 Trempe (H <sub>2</sub> O)			

Selon ce tableau, on trouve que les dimensions critiques des pièces dépend du pourcentage de carbone, étant donné que les aciers portent les mêmes éléments d'alliage.

L'effet de la vitesse de refroidissement dans l'augmentation des dimensions critique des pièces a été aussi remarquable, en comparant ces dimensions dans le tableau suivant.

		Diametre critique		
NUANCE	L/d	Agent: H <sub>2</sub> O	Agent: HUILE	Agent: AIR
12 NC 11	0.1	113	68	-
30 NC 11	0.1	170	115	10

A partir de ce tableau, on trouve que les pièces trempées dans l'eau ont une grande pénétration de trempé par rapport aux pièces trempées dans l'huile. Mais ces dernières ont une grande pénétration de trempé par rapport aux pièces trempées à l'air.

Pendant la trempé volumique, on utilise comme agent de trempé les milieux suivants (EAU, HUILE, AIR).

Après le tracé des courbes dureté par section transversale (voir Figs page 43), on remarque que le refroidissement dans l'eau assure, dans les sections ( $\phi$  10...40) données des pièces, l'obtention de la martensite pénétration complète dans les deux aciers, et que le HRC admissible pour les différents diamètres ( $\phi$  10...40) est supérieur à HRC 50M celle de la zone demi-martensitique.

HRC admissible. C'est la dureté minimale d'un acier correspond généralement au centre des pièces.

Le tableau ci-dessous donne les dimensions critiques des pièces trempées dans l'eau.

L/d	Diamètre critique trempé (H <sub>2</sub> O)	
	12NC11	30NC11
0.1	40 mm	40 mm
0.20	35	35
0.33	30	30
0.4	25	25
0.5	20	20
0.6	15	15
1	10	10

On a utilisé aussi comme agent de trempe, l'huile pour refroidir les pièces avec le diamètre ( $\phi 25\text{mm}$ )

Le refroidissement dans l'huile (voir Fig 3 page 43) assure, dans les sections ( $\phi 25\text{mm}$ ) données des pièces l'obtention de la martensite pénétration complète dans les deux aciers, et que le HRC adm est supérieur à HRC 50M celle de la zone demi martensitique. Mais le HRC adm de l'eau reste toujours supérieur à celui de l'huile

Le tableau ci-dessous donne les dimensions critiques des pièces trempées dans l'huile.

	Diamètre critique trempé (HUILE)	
L/d	12NC11	30NC11
0.4	25mm	25mm

On utilise aussi comme agent de trempe, l'air pour le refroidissement des pièces avec le diamètre ( $\phi 25\text{mm}$ ).

Le refroidissement à l'air (voir Fig 3 page 43) n'assure pas l'obtention de la martensite, dans les sections ( $\phi 25\text{mm}$ ). Dans les deux aciers, le HRC adm est inférieur à HRC 50M, et on peut classer la dureté minimale des pièces dans l'ordre suivant :

$$\text{HRC adm (EAU)} > \text{HRC adm (HUILE)} > \text{HRC 50M} > \text{HRC adm (AIR)}$$

Le tableau ci-dessous donne les dimensions critiques des pièces trempées à l'air

Diametre critique Trempe (Air)		
L/d	12NC11	30NC11
0.4	-	-

L'effet de la vitesse de refroidissement dans une trempe volumique a été aussi remarquable, après utilisation des différents agents de refroidissement, et la comparaison des résultats obtenus.

Cette observations a été obtenue, en comparant les tableaux précédents.

La variation de la vitesse de refroidissement suit l'évolution des courbes de dureté (voir Fig 4)

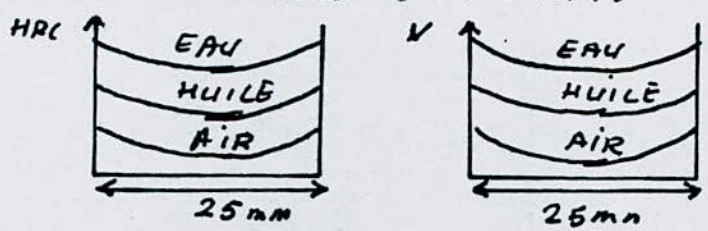


FIG 4 : Repartition de la vitesse de refroidissement par section des pièces cylindriques.

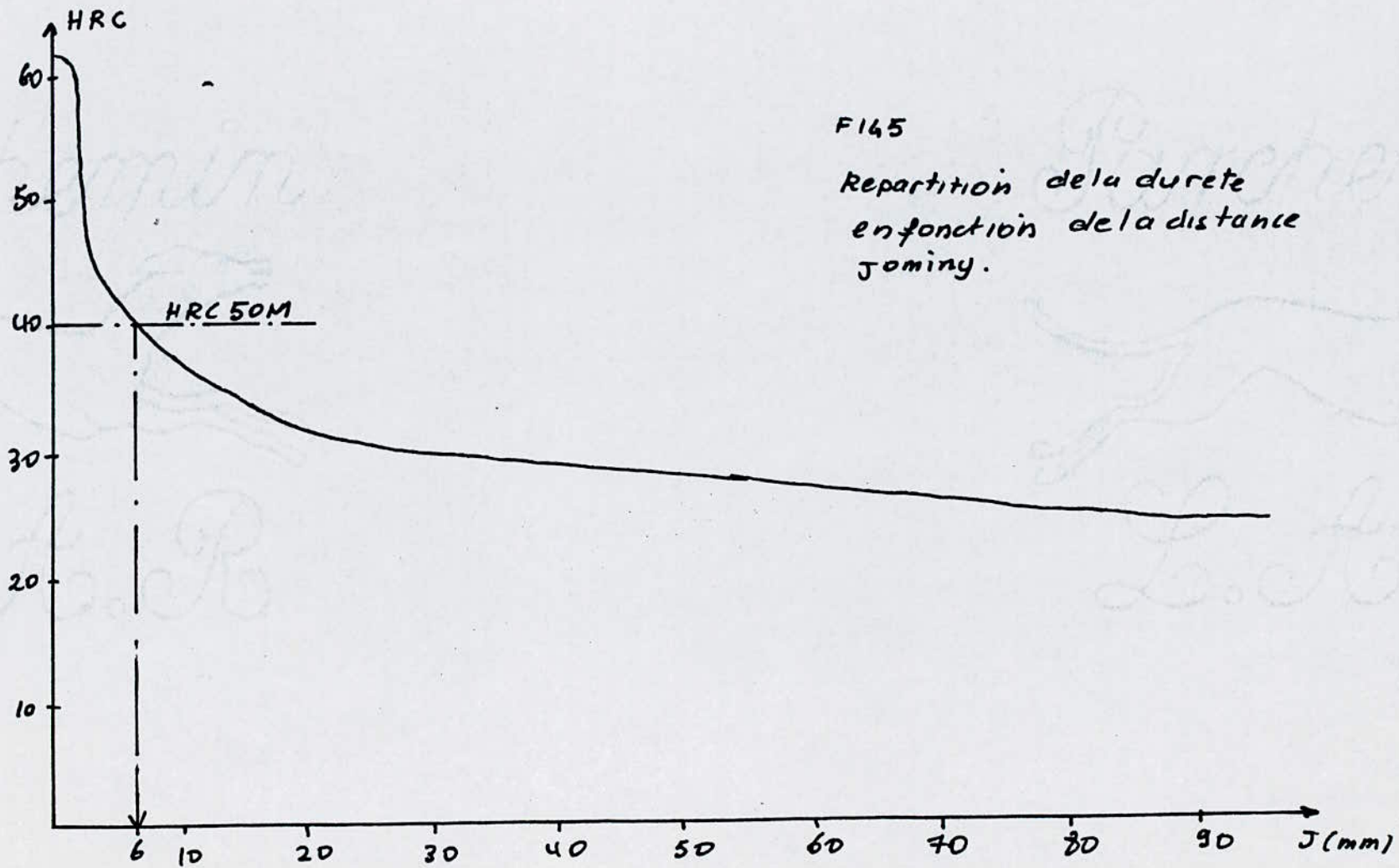
on deduit de la figure 4 que l'eau possède une grande vitesse de refroidissement. Cette vitesse dépasse généralement la vitesse critique de trempe, dans l'intervalle  $A_1 - M_s$  et surtout quand il s'agit des aciers faiblement alliés.

Un essai de trempabilité a été fait par un étudiant du semestre passé, où il a utilisé un acier de nuance XCr2, qui présente les caractéristiques suivantes.

- pourcentage de carbone	$0.4 \div 0.45$
- pourcentage de manganèse	$0.5 \div 0.8$
- pourcentage de silicium	$\leq 0.4$
- Temperature de recuit	$820 \div 845 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Limite d'élasticité	$E = 36 \text{ hbar}$
- Résistance à la rupture	$66 - 74 \text{ hbar}$
- Allongement	$16\%$
- Dureté Brinell	$210 \text{ HB}$

Le matériau est employé pour la fabrication des bielles, vilebrequins, tiges, arbres

Les résultats de cette essai sont représentés dans la (Fl65)



F145

Repartition de la durete  
en fonction de la distance  
jominy.

Après utilisation de nomogramme et la détermination des dimensions critiques des pièces, on peut tirer les conclusions à partir de la comparaison des résultats.

NUANCE	XC42			12NC11			30NC11		
DISTANCE	6 mm			15 mm			50 mm		
milieu L/d	H <sub>2</sub> O	HUILE	AIR	H <sub>2</sub> O	HUILE	AIR	H <sub>2</sub> O	HUILE	AIR
0.1	70	26	-	113	68	-	170	115	10
0.25	34	19	-	50	33.8	-	85	58	5.1
0.5	22.8	12.6	-	36	22.1	-	57.5	39	3.4
1	18	9	-	26	16.8	-	43	23.4	2.6
3	13.4	8	-	21.8	13.4	-	33.6	23.2	1.9
4	12.5	6.8	-	19.8	12.7	-	32.4	21.8	1.8
6	12.2	6.5	-	18.9	12.2	-	31	21	1.25
10	12	6.2	-	18	11.9	-	30	20.3	1.7

Ces résultats montrent que la pénétration de trempe dans les aciers alliés est beaucoup plus grande que celle des aciers au carbone.

Cette augmentation de pénétration dans les aciers alliés est assurée surtout par l'addition des éléments d'alliage avec les proportions accrues.

Si les pièces mécaniques possèdent des formes compliquées (vilbrequins, bielles) et des dimensions considérables.

dans ces conditions, il est préférable de procéder aux aciers alliés et faiblement alliés pour assurer la pénétration de trempe dans toute les parties importante de la pièce, et après la trempe, on exécute le revenu à haute température pour obtenir des propriétés mécaniques élevées.

Les aciers alliés et faiblement alliés sont les plus répandus en construction mécanique, automobile, aviation, matériel militaire, et ceci à cause de leur preuves dans le domaine pratique, et surtout après l'exécution du traitement demandé.



## VI CONCLUSION

Selon cette étude on peut dire qu'il est nécessaire de faire des essais de trempabilité pour les pièces d'utilisation mécanique, ceci permettra de connaître les aciers de forte trempabilité, qui sont d'ailleurs les plus répondus en construction mécanique, car ils permettent de réaliser une trempe totale.

Dans ce projet, on a fait des essais de trempabilité sur deux échantillons d'acier de nuance 12Nc11 et 30Nc11, le résultat obtenu montre que la pénétration de trempe dépend principalement des éléments d'alliage, du pourcentage de carbone et du milieu de trempe.

Ces observations ont été illustrées lors de la comparaison des résultats.

Nous avons essayé la pénétration par la trempe volumique et par méthode Jominy, et on a remarqué que les deux essais conduisent aux mêmes résultats.

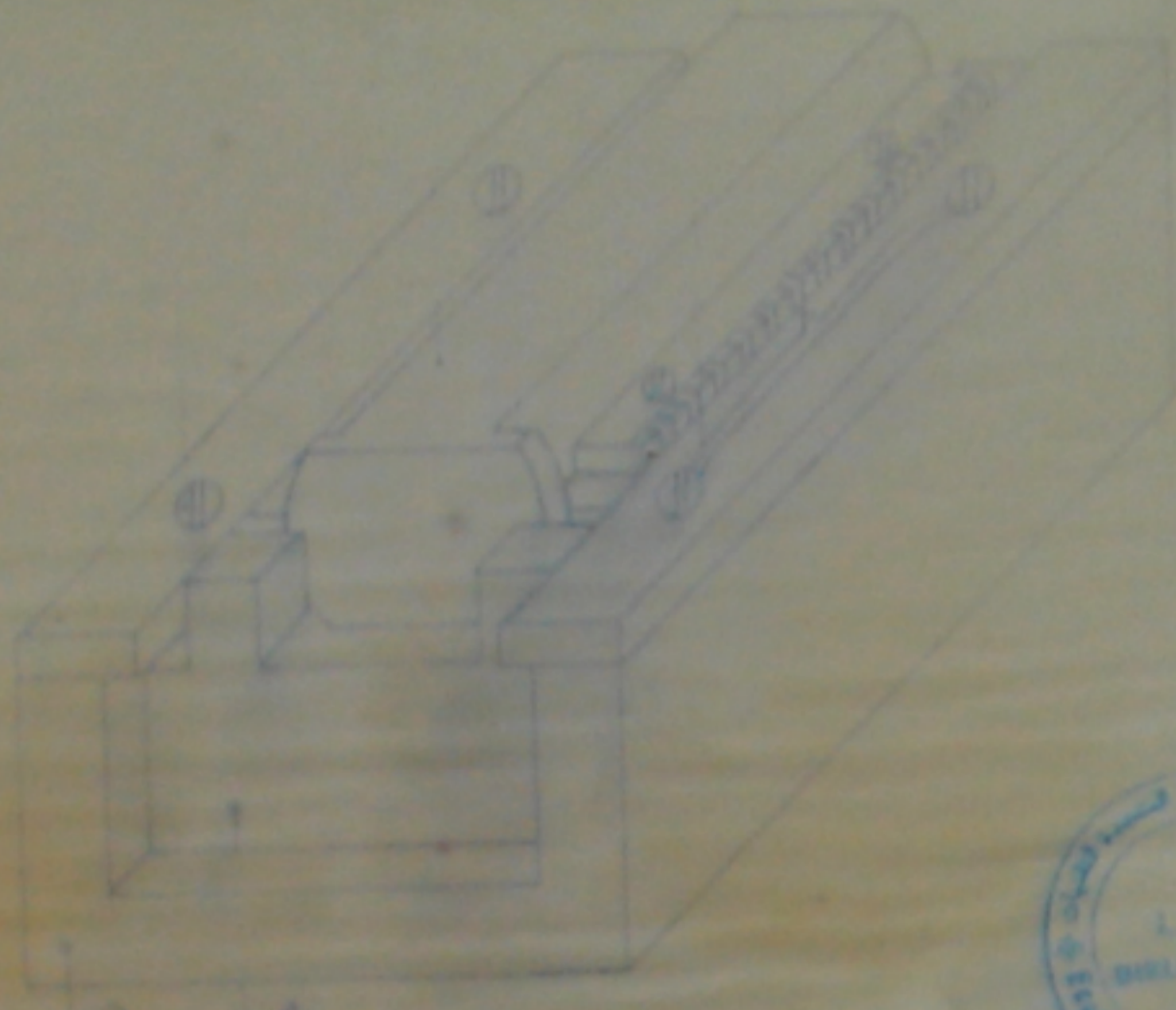
L'essai Jominy, et à l'aide de nomogramme, qualifie les aciers du point de vue de leur aptitude aux traitements thermiques.

L'élaboration de support et prouvettes nous a facilité les prises de mesure de dureté le long de la génératrice de l'éprouvette.

L'installation de trempabilité peut être exploitée, pour tester la pénétration de trempe des aciers de production nationale.

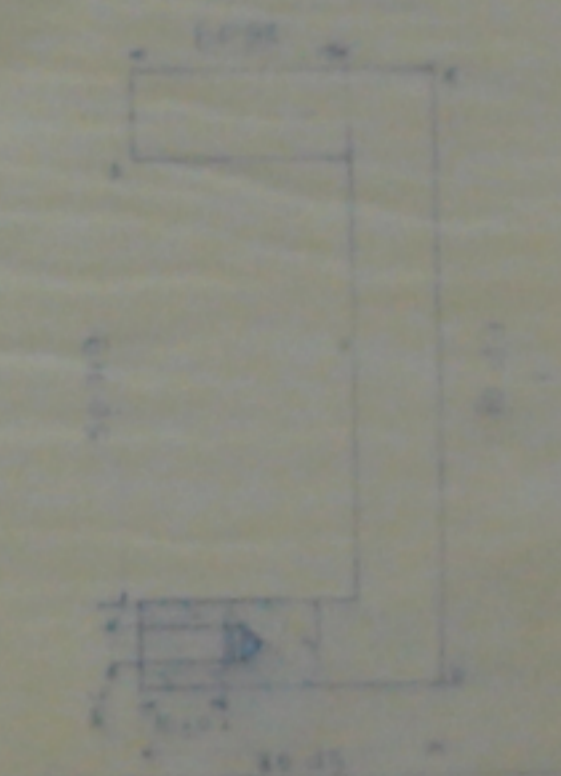
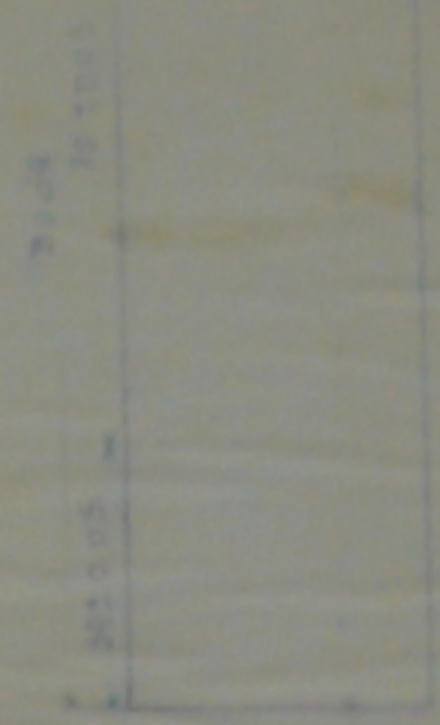
# BIBLIOGRAPHIE

- 1- I. LAKHTINE - Métallographie et traitements thermiques  
des métaux  
Edition MIR 1978
- 2- R. CAZAUD et R. Le ROUX - Métallurgie, mise en forme et  
traitement  
Edition Dunod
- 3- A. ROOS et B. MILET - précis de métallurgie appliquée  
Troisième Edition
- 4- A. CHEVALIER - Guide du dessinateur industriel  
Edition 1979
- 5- chaussin et Hilly - Métallurgie Tome 1  
Troisième Edition

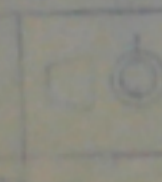


2 1

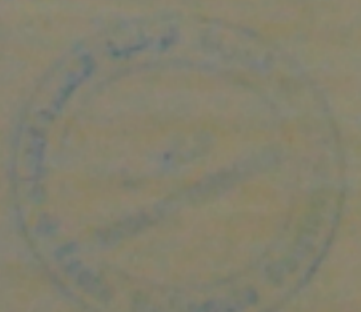
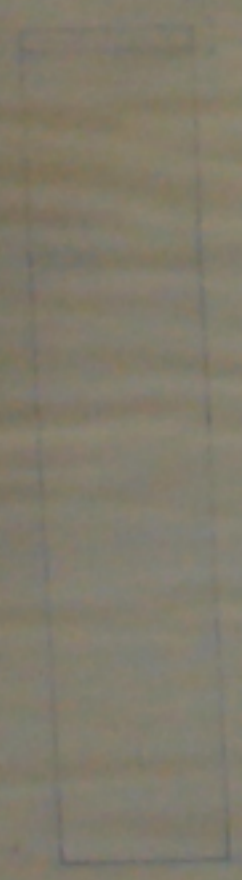
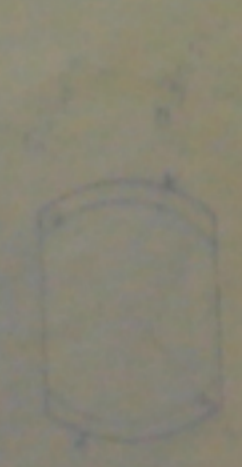
11	GE00001	Dessinateur	
12	GE00002	Responsable	
13	GE00003	Assistant	
14	GE00004	Assistant	
15	GE00005	Assistant	
16	GE00006	Assistant	
17	GE00007	Assistant	
18	GE00008	Assistant	
19	GE00009	Assistant	
20	GE00010	Assistant	
21	GE00011	Assistant	
22	GE00012	Assistant	
23	GE00013	Assistant	
24	GE00014	Assistant	
25	GE00015	Assistant	
26	GE00016	Assistant	
27	GE00017	Assistant	
28	GE00018	Assistant	
29	GE00019	Assistant	
30	GE00020	Assistant	



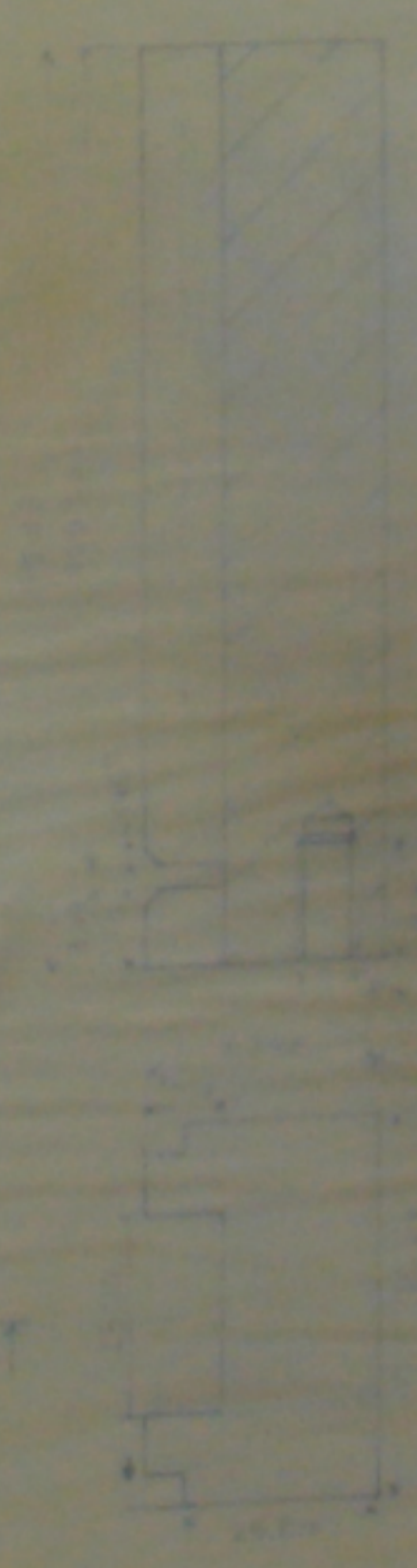
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

 SUPPORT  
DEPROUVETTE

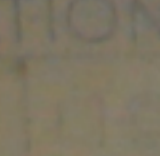
BATI  
ENPA  
DEPROUVETTE



PM05587  
Annexe



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

 EPROUVETTE ENPA

GLISSIERE ENPA

