

وزارة التربية الوطنية  
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE - المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

*Métallurgie*

# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Étude comparative de la trempabilité  
des aciers au carbone austénisés  
dans les domaines monophasé  
et biphasé.*

Proposé par :

**M<sup>re</sup> CHITROUB**

Etudié par :

**BENCHABANA ABDELGHANI**

Dirigé par

**M<sup>re</sup> CHITROUB**

PROMOTION

*Juillet 1993*

وزارة التربية الوطنية  
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

*Metallurgie*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Étude comparative de la trempabilité  
des aciers au carbone austénisés  
dans les domaines monophasé  
et biphasé.*

Proposé par :

**M<sup>re</sup> CHITROUB**

Etudié par :

**BENCHABANA ABDELGHANI**

Dirigé par

**M<sup>re</sup> CHITROUB**

PROMOTION

*Juillet 1993*

## DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :

- Ma mère
- Mon père
- Mes frères et soeurs
- Toute la famille
- Tous mes amis

BENCHABANA ABDELGHANI

## REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé grâce à la collaboration de mon promoteur Monsieur CHITROUB qui m'a beaucoup aidé par son assistance et ses précieux conseils.

Je tiens à remercier également Monsieur KHALED, le technicien du laboratoire qui m'a aidé à faire mes expériences dans les meilleures conditions.

Mes remerciements vont aussi au département génie mécanique qui m'a aidé à l'usinage de mes éprouvettes.

Particulièrement je remercie tous les professeurs qui ont contribué à ma formation.

Nous remercions enfin toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce modeste mémoire.



## SOMMAIRE

I- INTRODUCTION	2
II- GENERALITES SUR LA TREMPABILITE DES ACIERS AU CARBONE	3
II-1- Diagramme d'équilibre fer - carbone métastable	3
II-1-1 Les phases du diagramme fer - cementite	3
II-2 Généralités sur la transformation de l'austénite	5
II-3 Notion de trempabilité	7
II-3-1 Méthode de caractérisation de la trempabilité	8
II-3-1-1 Méthode de GROSSMANN	8
II-3-1-1-1 Principe de la méthode	8
II-3-1-1-2 Sévérité de trempe	9
II-3-1-1-3 Détermination du diamètre critique idéal	10
II-3-1-2 Essai JOMINY	11
II-3-2 Facteurs influençant la trempabilité d'un acier	15
II-3-2-1 Diamètre du grain austénitique	15
II-3-2-2 La teneur en carbone	18
III- TECHNIQUES EXPERIMENTALES	21
III-1- Matériaux utilisés	21
III-1-1 Composition chimique	21
III-2 Méthode GROSSMANN	21
III-2-1 Mesure de dureté	22
III-2-2 Microstructures	22
III-3 Essai JOMINY	22

IV- RESULTATS ET INTERPRETATIONS	26
IV-1- Méthode GROSSMANN	26
IV-2- Essai JOMINY	39
IV-3- Interprétations	45
V- CONCLUSION	49
VI- ANNEXÉ	50
VII- BIBLIOGRAPHIE	55

# *PARTIE 1*

## I: INTRODUCTION :

Actuellement dans l'industrie, les aciers d'usage général sont de plus en plus remplacés par des aciers à propriétés améliorées tel que les aciers « dual phase » . Ces aciers présentant une microstructure composée de grains ferritique libre de cémentite et d'îlot de martensite .

La trempabilité des aciers « dual phase » est améliorée par de faibles additions de chrome et de molybdène .

Pour comprendre la trempabilité de ces aciers, nous avons jugé utile de faire une étude comparative entre les aciers au carbone monophasés et biphasés .

Pour cela, on a pris deux nuances d'aciers différentes, une représente les aciers au carbone hypoeutectoïdes, l'autre représente les aciers hypereutectoïdes .

Nous avons utilisé l'essai JOMINY et la méthode de GROSSMANN pour déterminer la profondeur de trempe .

L'étude est répartie en quatre parties :

La première partie traite les généralités sur la trempabilité des aciers au carbone .

Les techniques expérimentales sont décrites dans la deuxième partie .

Les résultats seront présentés et interprétés dans la troisième partie .

La quatrième partie quand à elle est réservée à la conclusion .



## II-GENERALITES SUR LA TREMPABILITE DES ACIERS AU CARBONE

### II-1- Diagramme d'équilibre fer - carbone métastable :

Le diagramme d'équilibre fer - cementite est représenté dans la figure 1 [1]. En composition, ce diagramme s'étend depuis le fer pur jusqu'à la cementite qui contient 6.67 % de carbone en poids ( $Fe_3C$ ).

Les phases solides du diagramme métastable sont :

l'austénite, la ferrite et la cementite . Pour une teneur de carbone inférieur à la teneur du point eutectoïde ( S ), les aciers sont appelés hypoeutectoïdes, pour une teneur supérieur, ils sont appelés hypereutectoïdes .

#### II-1-1- Les phases du diagramme fer-cementite:

Austénite  $\gamma$  : Solution solide d'insertion de carbone dans le fer  $\gamma$ , de structure cubique à faces centrée ( CFC ). La limite de solubilité atteint 2,1 % de carbone en poids à la température 1448<sup>0</sup> C .

Ferrite  $\alpha$  : Solution solide d'insertion de carbone dans le fer  $\alpha$ , de structure cubique centré ( CC ). La limite de solubilité atteint 0,02% de carbone en poids à la température 727<sup>0</sup> C.

Cementite  $Fe_3C$  : C'est un composé chimique de dureté élevée, la cementite cristallise dans le système orthorombique (  $a = 4,52 \text{ \AA}$  ;  $b = 5,09 \text{ \AA}$  ;  $c = 6,74 \text{ \AA}$  ). Elle présente différents modes de

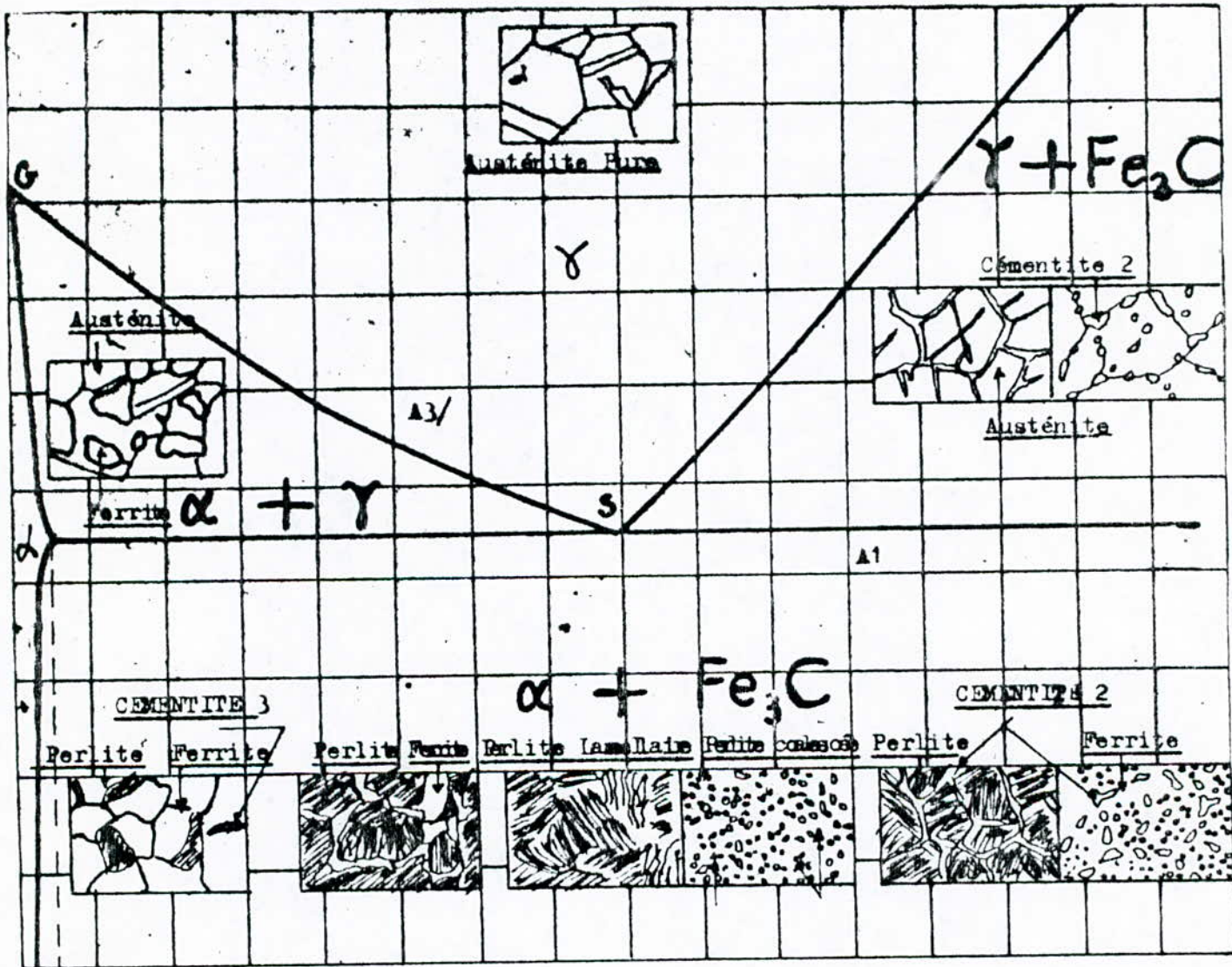


FIG:- 1 / DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CEMENTITE DANS LES ACIERS



formation.

## II-2- Généralités sur la transformation de l'austénite :

Si l'acier étudié est à l'état d'équilibre d'une température donnée, le diagramme thermodynamique Fe-C caractérisera la structure de l'acier, mais comme cela se produit dans la pratique, les alliages Fe + C subissent des refroidissements accélérés à partir du domaine austénitique et n'obéissent plus au diagramme d'équilibre .

Les transformations sont déplacées vers des températures plus basses et, par suite des phénomènes de surfusion, elles se font ensuite dans des domaines de température, pour lesquels les procédés de diffusion nécessaire à l'établissement de l'équilibre sont plus ou moins supprimés . Les transformations s'y font par des états intermédiaires ou métastables et le mécanisme de ces transformations ainsi que les structures métalliques subissent des changements considérables .

Selon la température de transformation, on distingue trois ( 0 3 ) domaines de décomposition de l'austénite :

- a / Domaine perlitique, impliquant également la transformation à l'équilibre ( domaine Ar' ) ;
- b / Domaine bainitique ( domaine Ar'' ) ;
- c / Domaine martensitique ( voir figure 2 ) .

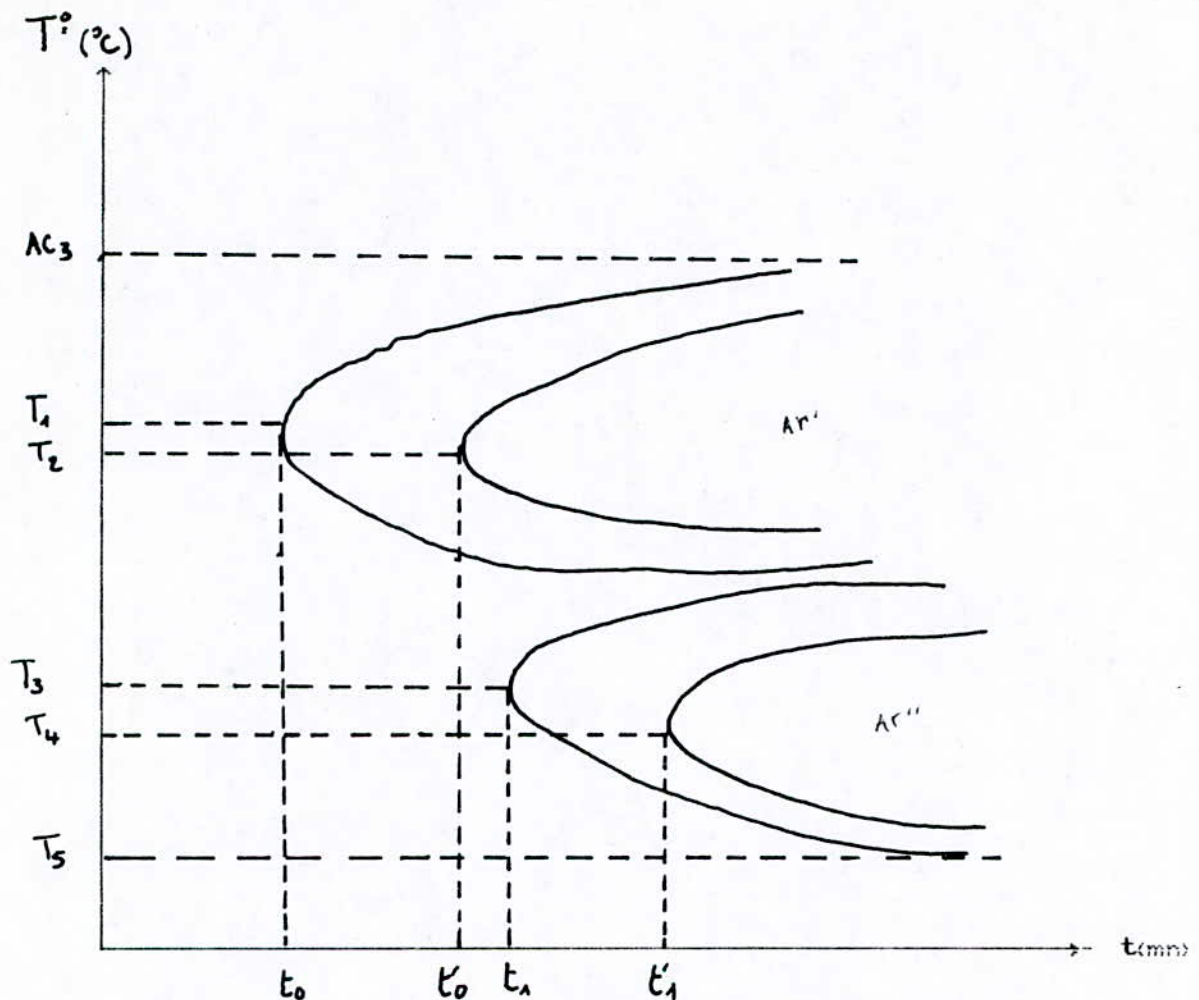


Figure 2: Courbe T.T.T typique d'un acier montrant  
 Les différents domaines de décomposition de  
 l'austénite

Le premier domaine est caractérisé par la transformation du réseau C F C en un réseau C.C ; transformation facilitée par les relations géométriques existant entre les deux mailles .Les procédés de diffusion se développent bien dans ce domaine et ceux ci sont d'avantage freinés lorsque la vitesse de refroidissement



augmente; cela entraîne un affinement de la perlite lamellaire .

Le domaine bainitique est caractérisé par l'arrêt de la diffusion du fer, par contre, l'atome mobile de carbone peut encore diffuser et amener la précipitation du carbone .

Apparaissant à partir d'une certaine vitesse critique de trempe la transformation martensitique correspond à un changement du réseau cristallin sans diffusion . Le carbone reste en solution et provoque, par élargissement tétragonal de la maille de fer, des tensions internes importantes .

#### II-2 Notion de trempabilité:

Lorsqu'on trempe une tige cylindrique d'acier, la vitesse de refroidissement est maximale à la surface de la tige et diminue graduellement vers l'intérieur . La différence entre le taux de refroidissement varie naturellement avec la sévérité de la trempe. La martensite ne se forme que dans les parties de la pièce où la vitesse de refroidissement est supérieure à la vitesse critique de trempe . Le changement de microstructure est également accompagné d'une variation de la dureté du métal .

La profondeur de trempe, pour une vitesse de refroidissement donnée, est donc une mesure de la trempabilité .On prend souvent comme critère la distance de la surface à la limite de la zone contenant 50 % de martensite .

## II-3-1 Méthode de caractérisation de la trempabilité :

Pour définir quantitativement la trempabilité, il y'a plusieurs méthodes qui sont :

-L'évolution de la dureté en fonction de la distance d'une surface refroidie. Ceci est l'essai JOMINY.

-Détermination du diamètre critique qui correspond à 50% de martensite à coeur. C'est la méthode GROSSMANN..

-Utilisation des diagrammes de refroidissement continu TRC.

Dans notre étude, on s'intéressera aux deux premières méthodes .

## II-3-1-1 Méthode de GROSSMANN:

GROSSMANN est l'un des chercheurs qui nous ont donné la précision par le calcul de trempabilité à partir de la composition chimique de l'acier.

### II-3-1-1-1 Principe de la méthode:

GROSSMANN a proposé une méthode qui lie quantitativement la trempabilité à la composition chimique. Il caractérise la trempabilité par le diamètre critique  $D_c$  d'un rond de l'acier considéré. Qui après avoir été trempé dans un milieu donnant un échange thermique infini acquiert en son coeur une structure à 50% de martensite.

Le milieu idéal défini par GROSSMANN pour s'affranchir de l'effet du milieu de refroidissement est caractérisé par une sévérité de trempe infinie .

La sévérité de trempe est égale selon GROSSMANN à :

$$H = \frac{\alpha}{2 * \lambda} \quad [ 2 ]$$

Où H : Coefficient de sévérité de trempe .

$\alpha$  : Coefficient de transfert de chaleur entre la pièce et le milieu .

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu de trempe .

#### II-3-1-1 : Sévérité de trempe :

C'est la force du milieu trempant à refroidir la pièce chauffé.

Le problème de sévérité peut être éliminé en utilisant un milieu de trempe idéal ou la sévérité est infinie ce qui veut dire que la surface du rond atteindrait la température de ce milieu instantanément .

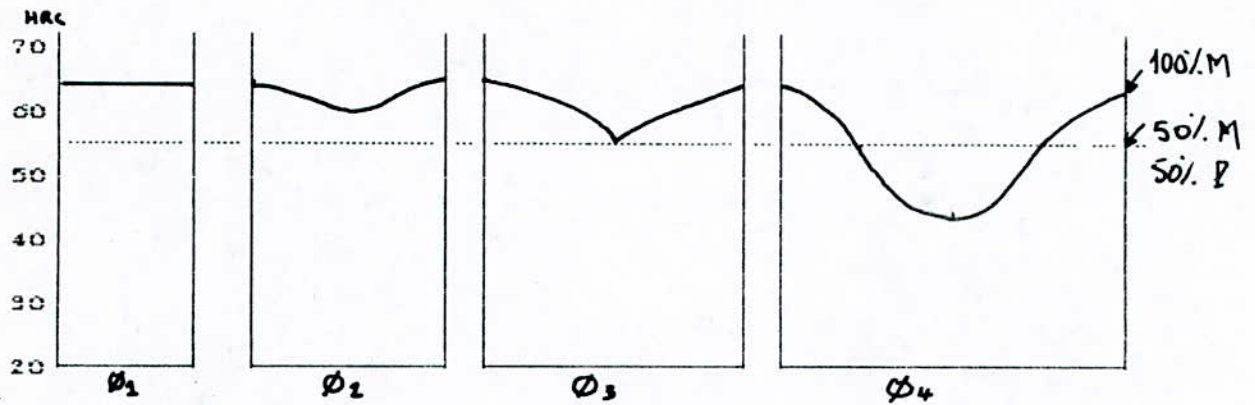
Le tableau suivant nous donne des valeurs du coefficient de sévérité de trempe par des milieux classiques utilisés [ 3 ].

H (mm <sup>-1</sup> )	Type de trempe
0.008	à l'huile sans agitation
0.014	à l'huile avec agitation modéré
0.020	à l'huile avec agitation bonne
0.024	à l'huile avec agitation violente
0.040	à l'eau sans agitation
0.060	à l'eau avec agitation forte
0.080	saumure sans agitation
0.200	saumure avec agitation violente
∞	milieu de trempe idéal

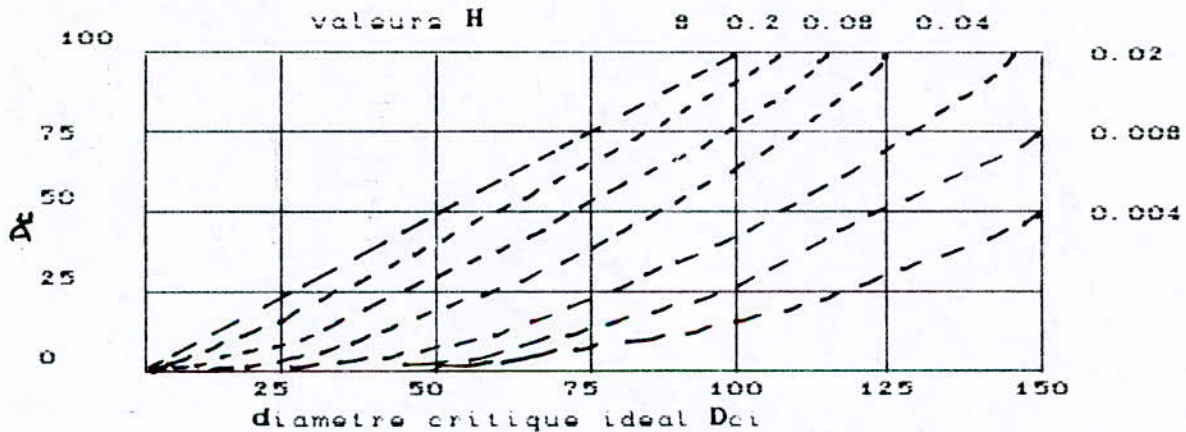
#### II-3-1-3 Détermination du diamètre critique idéal :

Le diamètre critique ( $D_c$ ) est le diamètre correspondant à 50 % de martensite à coeur avec une sévérité  $H = \infty$ , est déterminé à l'aide des courbes montrées aux figures 3 et 4 .





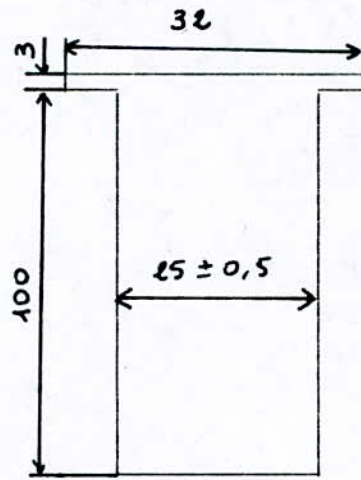
**Fig 3** : variation de la dureté en fonction de la distance sur des tiges cylindriques d'acier trempé



**Fig 4** : variation du diamètre critique en fonction du diamètre critique idéal pour différents sévérité de trempé d'après H.A GROSSMANN B.C RAIN [ 3 ]

**II-5-1-2 Essai JOMINY :**

L'essai de trempabilité JOMINY requiert l'utilisation d'un seul échantillon .L'éprouvette utilisée pour cet essai est une tige cylindrique de 100 mm de longueur et de 25 mm de diamètre (fig 5)



**Fig 5** : schéma de l'éprouvette de l'essai JOMINY

Cette éprouvette est d'abord austénisée puis suspendue au dessus d'un jet d'eau dont la pression est ajusté pour que l'eau, passant par une ouverture de  $12.5_{mm}$  , s'élève à une hauteur de  $12.5_{mm}$  .La température de l'eau est de  $24 \pm 3^{\circ} C$  (voir figure 6)

Avec un seul spécimen, il est alors possible d'obtenir une variété de vitesse de refroidissement, passant de la trempe à l'eau à une extrémité, jusqu'à la trempe à l'air à l'autre extrémité .

Lorsque l'essai est terminé, une couche d'environ  $0.4_{mm}$  est enlevée sur deux cotés opposés de l'éprouvette et la dureté est ensuite mesurée d'une extrémité à l'autre. La courbe de la figure ( 7) nous permet de voir que la dureté de l'extrémité refroidie à l'eau est plus élevée que celle de l'extrémité refroidie à l'air.

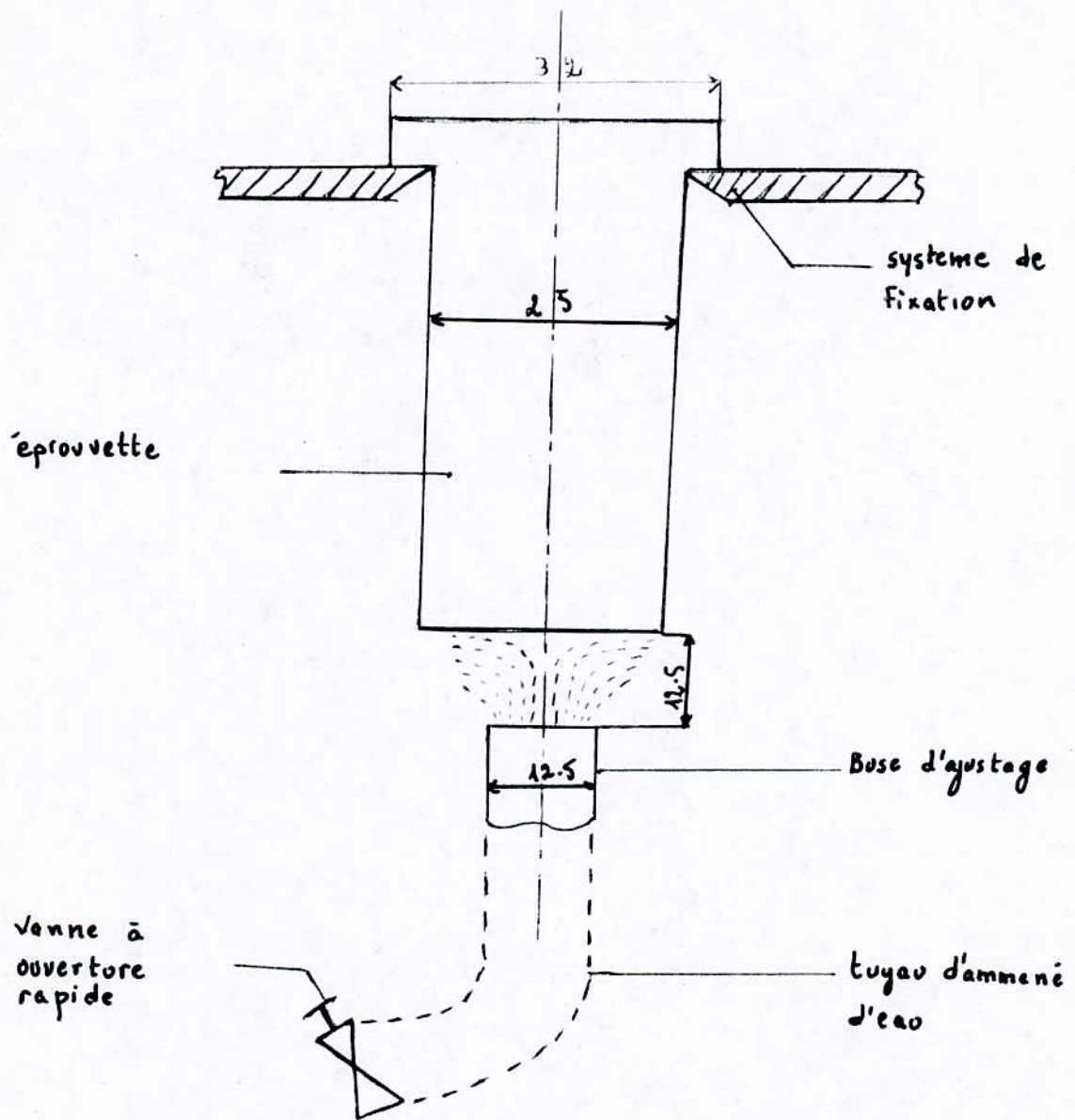


Figure 6 : Schéma de dispositif de trempe de l'essai JOMINY

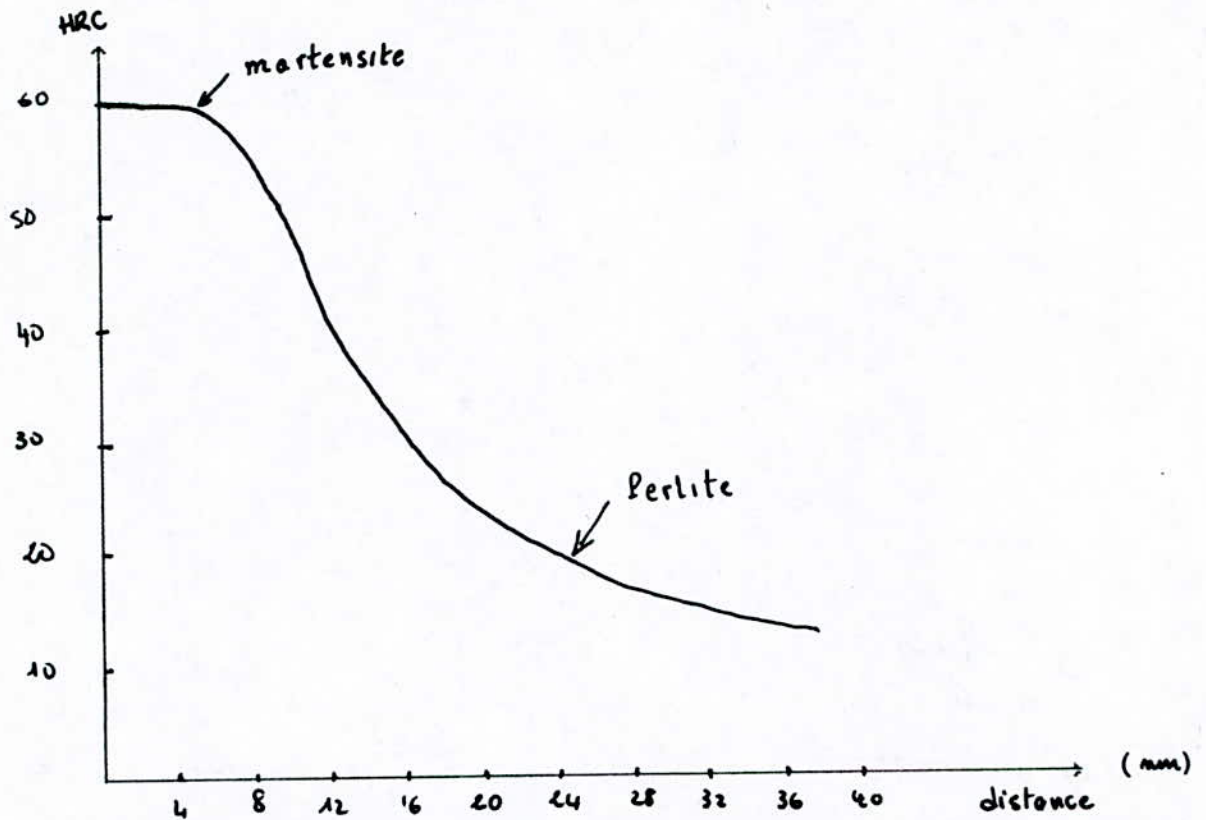


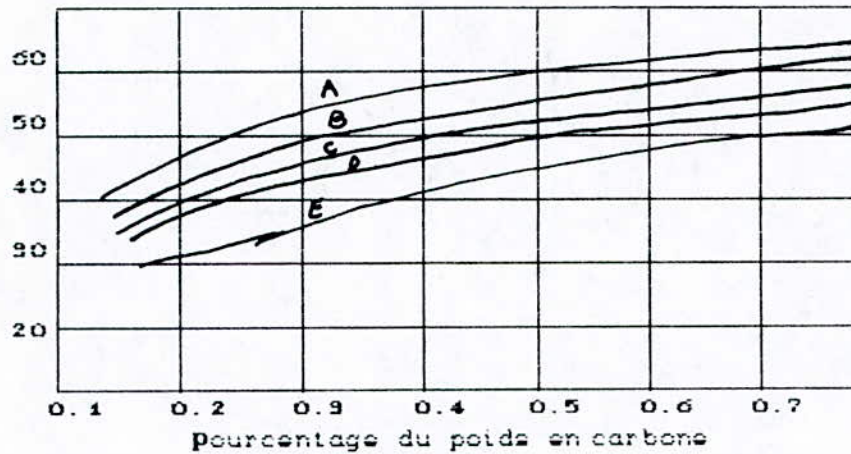
fig 7: variation de la dureté en fonction de la distance sur un cylindre pour essai JOMINY.

Connaissant la dureté pour 50 % de martensite, on détermine la distance à partir de l'extrémité refroidie à l'eau pour laquelle, on rencontre cette zone semi martensitique (Fig 8 ) [ 4 ] .

Puis à l'aide des courbes donnant le diamètre critique en fonction de la distance le long d'une éprouvette JOMINY . On détermine le diamètre critique  $D_c$  pour cet acier particulier (Fig 9 ). Cette méthode pour déterminer le diamètre critique idéal d'un acier est beaucoup plus rapide que la méthode GROSSMANN .



H.R.C



- A : 100.0 % de martensite
- B : 95.0 % de martensite
- C : 90.0 % de martensite
- D : 80.0 % de martensite
- E : 50.0 % de martensite

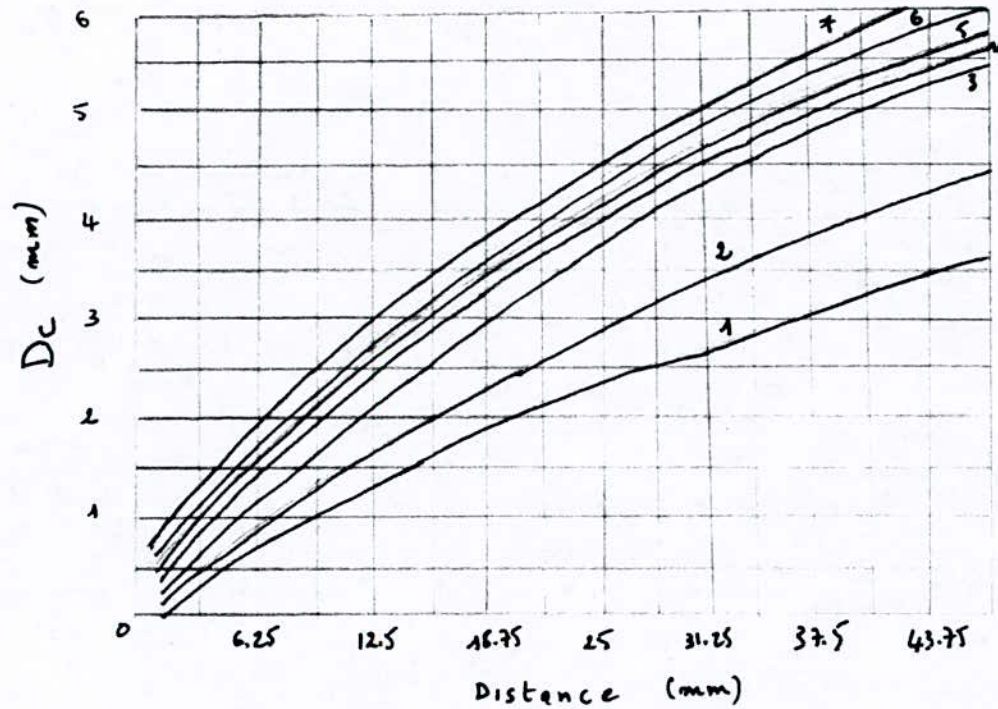
**Fig 8 :** dureté moyenne d'une structure martensitique en fonction du pourcentage de carbone de l'acier

### II-3-2 Facteurs influençant la trempabilité d'un acier :

La trempabilité d'un acier varie avec la composition chimique de cet acier et aussi avec la grosseur du grain austénitique au début de la trempe.

#### II-3-2-1 Diamètre du grain austénitique :

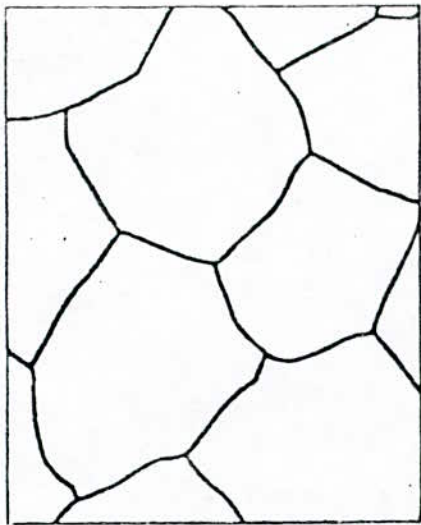
La trempabilité diminue lorsque les grains austénitiques sont de faibles dimensions. La dimension du grain austénitique est déterminée suivant des dimensions standards ( voir Fig 10 ) [ 4 ]



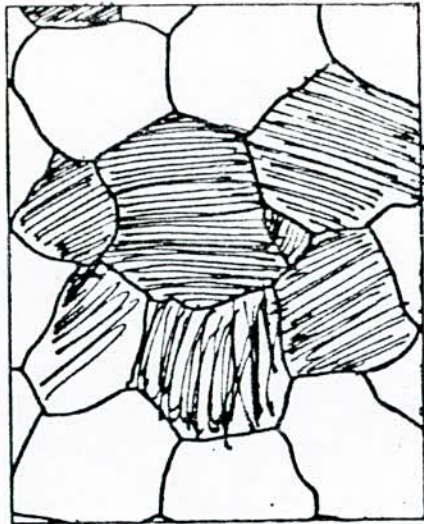
- 1: huile sans agitation
- 2: huile bonne agitation
- 3: eau sans agitation
- 4: eau bonne agitation
- 5: saumure sans agitation
- 6: saumure bonne agitation
- 7: trempé idéal

Figure 9: Variation du diamètre critique en fonction de la distance mesurée sur la tige JOMINY pour différents valeurs de "H"

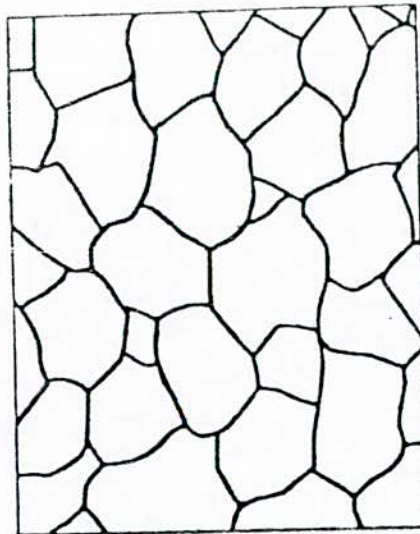




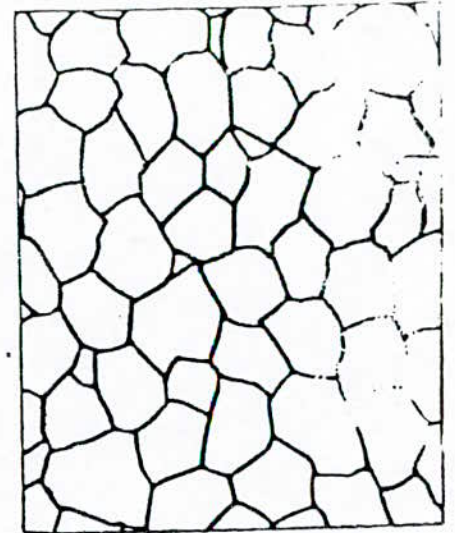
Grain no 1



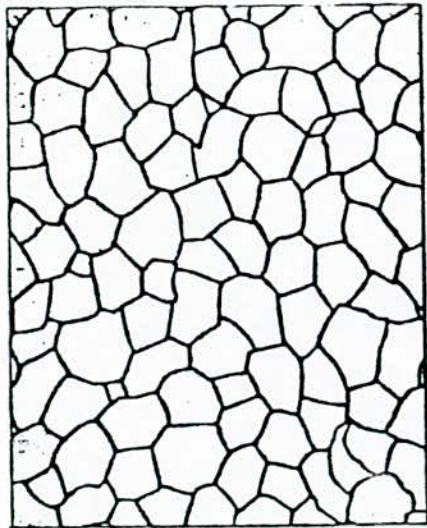
Grain no 2



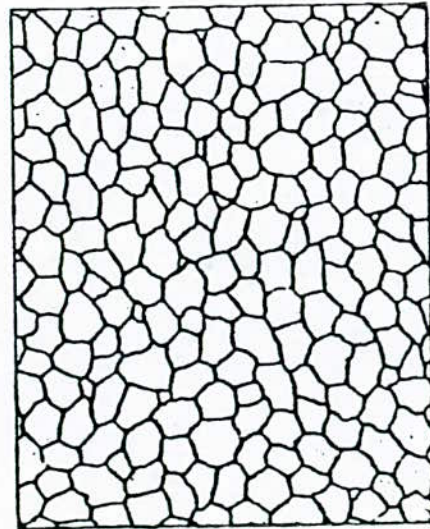
Grain no 3



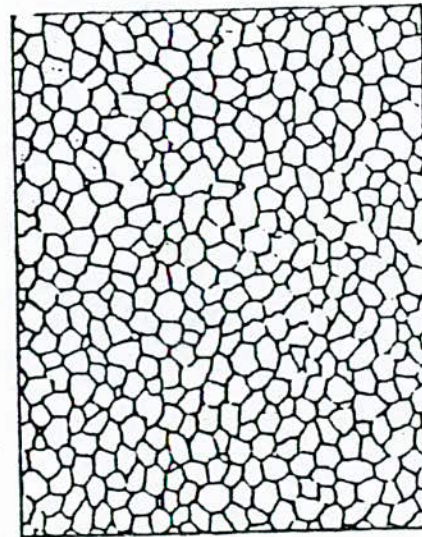
Grain no 4



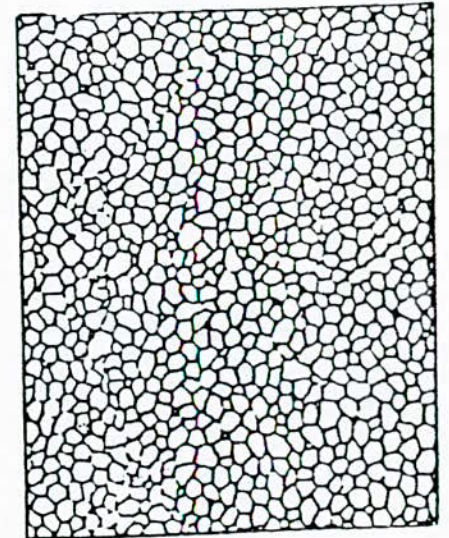
Grain no 5



Grain no 6



Grain no 7



Grain no 8

Figure 10 Dimensions standards A.S.T.M. du grain austénitique avec un grossissement de 100X.

## II-3-2-2 La teneur en carbone ;

La trempabilité d'un acier est énormément influencée par la concentration en carbone . On peut voir à la figure suivante que le diamètre critique idéal (  $D_c$  ) augmente avec le concentration ( Fig 11 ) [ 5 ] .

Les aciers à basse teneur en carbone ont une trempabilité assez faible à cause de la formation de la ferrite proeutectoïde et de perlite lors du refroidissement de l'alliage .

les éléments d'alliage influencent aussi grandement la trempabilité de l'acier. La plupart des éléments d'alliage améliorent la facilité à la trempe .



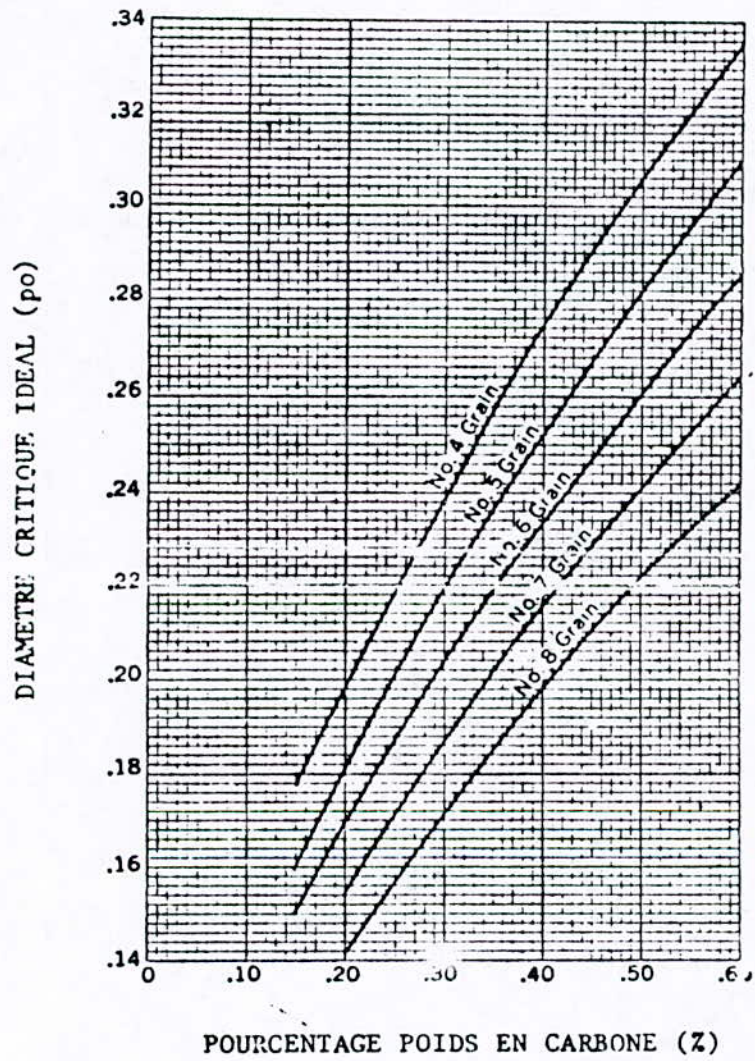


Figure 11. Variation du diamètre critique idéal en fonction du % de carbone et de la grosseur du grain austénitique.

# *PARTIE 2*

### III: TECHNIQUES EXPERIMENTALES .

#### III-1- Matériaux utilisés :

On a pris comme exemple des aciers hypoeutectoïdes la nuance XC 42, et pour celui des aciers hypereutectoïdes on a pris la nuance XC 110.

#### III-1-1 Composition chimique :

La composition chimique de ces deux aciers est donnée dans le tableau I après analyse spectrométrique .

Eléments Nuances	% C	% Mn	% Si	% Cr	% P	% S
XC 42	0.42	0.636	0.320	0.091	0.002	0.016
XC 110	1.28	0.650	0.333	0.093	0.002	0.015

Tableau I :Composition chimique des aciers utilisés.

#### III-2- Méthode GROSSMANN :

On a utilisé cinq diamètres différents allant de 25 à 5 mm pour chaque nuance d'acier et pour les deux domaines monophasé et biphasé .

La température de trempe est  $A_{6s} + 50^{\circ}C$  pour le domaine monophasé et  $A_1 + 50^{\circ}C$  pour le domaine biphasé .Le temps de maintien est de 30 minutes et le milieu de refroidissement est l'eau à la température  $23 \pm 2^{\circ}C$  .



### III-2-1 Mesure de dureté :

Les mesures de dureté ont été prises sur des échantillons sectionnés, bien polis tout au long du diamètre .

L'appareil est le duromètre Rockwell avec affichage digital de type " LECO " dont le principe de mesure est basé sur la méthode Rockwell .

La charge utilisée est de 150 kgF . Le pénétrateur est un cône en diamant d'angle au sommet  $120^\circ$  et ayant une extrémité sphérique de 0.2 mm de diamètre .

### III-2-2 Microstructures :

Des photos de microstructures ont été prises sur des échantillons polis mécaniquement jusqu'à 1000 microns et finis à la solution d'allumine puis attaqués au nital .

Le microscope utilisé est du type " CARLZBISS JENA " .

### III-3 Essai JOMINY :

Quatre éprouvettes de l'essai JOMINY ont été usinées selon la norme indiquée au paragraphe II: 1-2 .

L'appareil utilisé est schématisé dans la figure 12.

L'essai consiste à chauffer une éprouvette pendant 30<sup>mn</sup> à la température choisie, à refroidir à l'eau une de ses extrémités puis on usine sur deux génératrices à  $180^\circ$  un méplat de 0.4<sup>mm</sup> de profondeur .La mesure de dureté s'effectue le long d'une génératrice à l'aide du duromètre " LECO " décrit précédemment.



La première mesure est faite à une distance de 1.5 mm de l'extrémité refroidie à l'eau, la seconde à 3mm puis à chaque 2 mm jusqu'à atteindre la distance de 15mm . Au delà de cette distance on prend les mesures de telle sorte à avoir un bon tracé de la courbe .Pour chaque mesure, on prend deux valeurs; la valeur maximale et la valeur minimale .

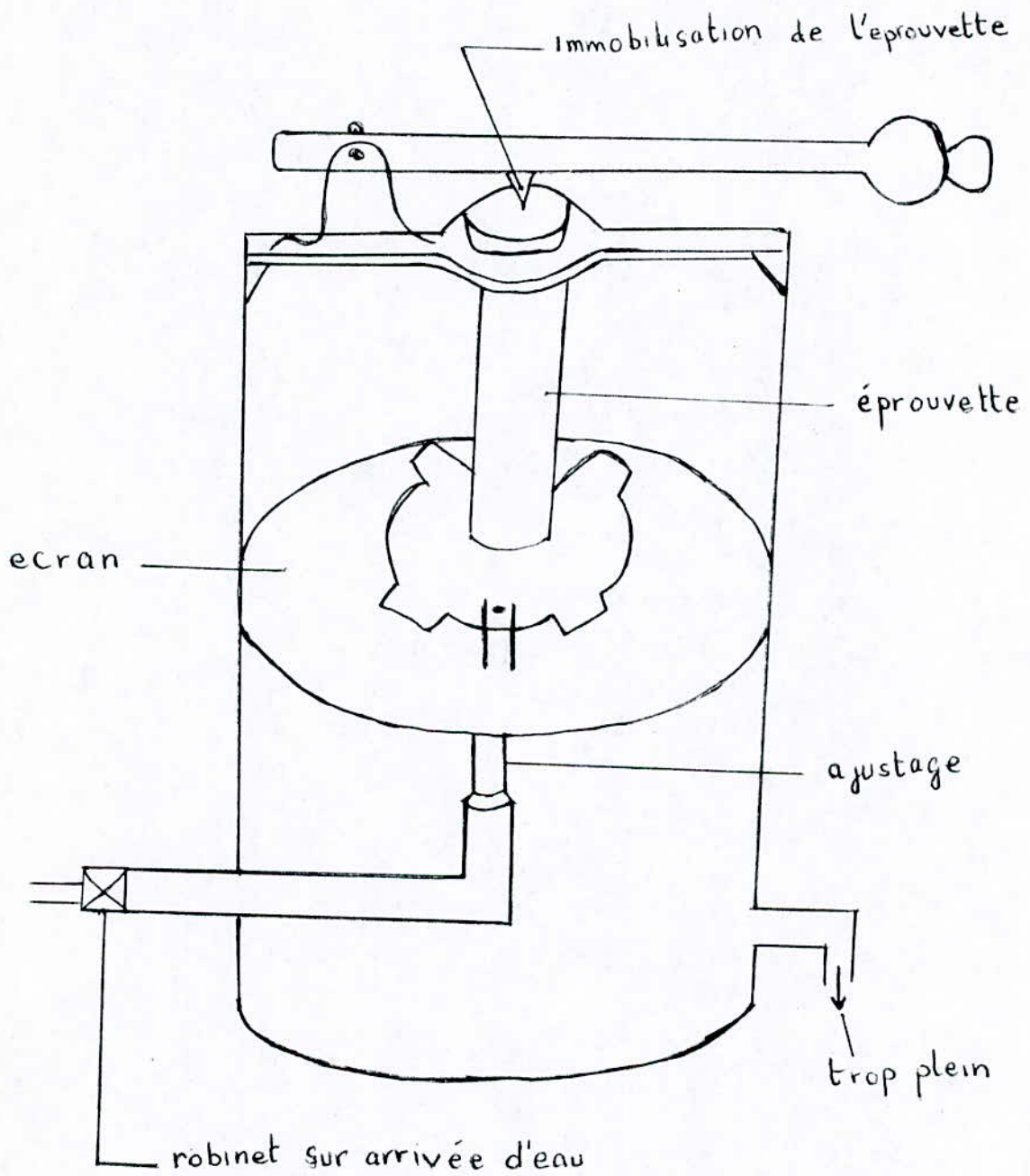


Figure 12 Appareil de trempe de l'essai Jominy

*PARTIE 3*

#### IV- RESULTATS ET INTERPRETATION

##### IV-1- Méthode GROSSMANN :

les tableaux II, III, IV, et V représentent les résultats de la dureté tout au long d'un diamètre sectionné des nuances XC 42 et XC 110 austénisées dans les deux domaines monophasé et biphasé .



$\phi = 25 \text{ mm}$		$\phi = 20 \text{ mm}$		$\phi = 15 \text{ mm}$		$\phi = 10 \text{ mm}$		$\phi = 5 \text{ mm}$	
DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)
1	55.0	1	55.5	1	56.6	1	60.5	1	62.5
2	49.2	2	54.3	2	56.3	2	60.3	2	61.7
4	41.8	3	52.4	3	54.4	4	54.1	3	61.5
6	39.6	5	46.3	5	47.3	5	40.5	4	62.2
8	37.8	7	40.1	7	38.4	6	52.7		
10	37.6	9	35.2	9	46.9	8	60.1		
12	35.4	11	37.1	11	53.1	9	60.4		
14	36.5	13	41.7	13	55.2				
16	39.2	15	48.1	14	56.1				
18	40.2	17	50.0						
20	42.6	18	51.3						
22	45.4	19	53.2						
23	47.0								
24	54.4								

DPE : Distance à partir de l'extrémité

D.M : Dureté moyenne

Tableau II : Résultats des mesures de duretés pour les différents diamètres de l'acier XC 42 austénisé dans le domaine monophasé à  $T_{\gamma} = 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$\phi = 25 \text{ mm}$		$\phi = 20 \text{ mm}$		$\phi = 15 \text{ mm}$		$\phi = 10 \text{ mm}$		$\phi = 5 \text{ mm}$	
DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)
1	54.3	1	54.7	1	55.0	1	55.6	1	55.8
3	42.5	3	49.3	3	43.7	3	52.3	2	53.0
5	37.2	5	42.7	5	35.2	5	41.7	3	52.5
7	27.5	7	35.2	7	22.1	7	46.2	4	55.1
9	22.5	9	29.5	9	23.4	9	54.9		
11	16.1	11	30.1	11	32.3				
13	19.8	13	33.3	13	46.1				
15	22.7	15	37.5	14	54.9				
17	33.6	17	46.4						
19	35.8	19	53.6						
21	43.1								
23	46.2								
24	53.9								

DPE : Distance à partir de l'extrémité

D.M : Dureté moyenne

Tableau III : Résultats de mesure de dureté pour les différents diamètres de l'acier XC 42 austénisé dans le domaine biphasé à  $T\gamma = 780^{\circ}\text{C}$



$\phi = 25$ mm		$\phi = 20$ mm		$\phi = 15$ mm		$\phi = 10$ mm	
DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)
1	72.2	1	72.5	1	72.8	1	73.5
3	60.7	3	70.3	3	70.6	3	71.5
5	55.3	5	66.1	5	66.7	5	66.1
7	45.6	7	54.4	7	56.4	7	70.3
9	39.4	9	40.6	9	48.5	9	72.9
11	36.5	11	38.9	11	59.3		
13	35.6	13	46.5	13	65.4		
15	38.3	15	58.3	14	71.8		
17	48.7	17	63.4				
19	57.6	19	70.1				
21	63.5						
23	69.8						
24	70.5						

DPE : Distance à Partir de l'Extrémité

D.M : Dureté moyenne

Tableau IV : Résultats de mesure de dureté pour les différents diamètres de l'acier XC 110 austénisé dans le domaine monophasé à  $T_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$

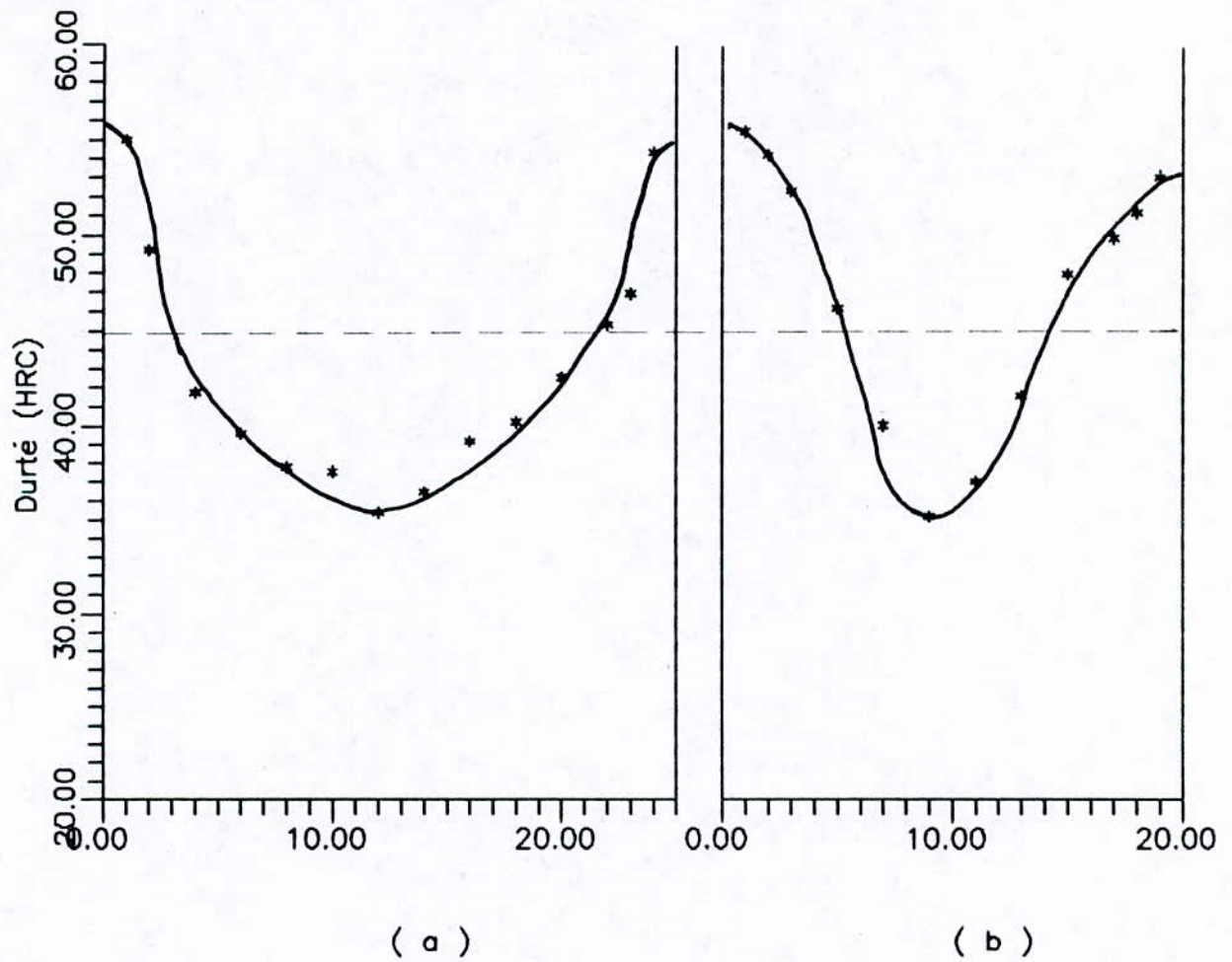
$\phi = 25$ mm		$\phi = 20$ mm		$\phi = 15$ mm		$\phi = 10$ mm	
DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)	DPE (mm)	D.M (HRC)
1	72.8	1	72.9	1	74.3	1	76.5
3	66.3	3	70.5	3	73.5	3	75.0
5	53.4	5	64.2	5	68.9	5	70.5
7	45.3	7	53.8	7	48.3	7	73.5
9	38.7	9	45.6	9	66.5	9	76.2
11	35.5	11	42.1	11	70.4		
13	34.8	13	44.6	13	73.5		
15	39.6	15	48.1	14	74.8		
17	43.5	17	66.5				
19	55.8	19	70.6				
21	64.7						
23	69.9						
24	72.6						

DPE : Distance à Partir de l'Extrémité

D.M : Dureté Moyenne

Tableau V : Résultats de mesure de dureté pour les différents diamètres de l'acier XC 110 austénisé dans le domaine biphasé à  $T_{\gamma} = 780^{\circ}\text{C}$





**Figure 13** : Variation de la dureté le long d'un diamètre pour l'acier XC 42 austénisé dans le domaine monophasé à  $T_y = 850\text{ }^\circ\text{C}$   
 (a) :  $\phi = 25\text{ mm}$  ; (b)  $\phi = 20\text{ mm}$

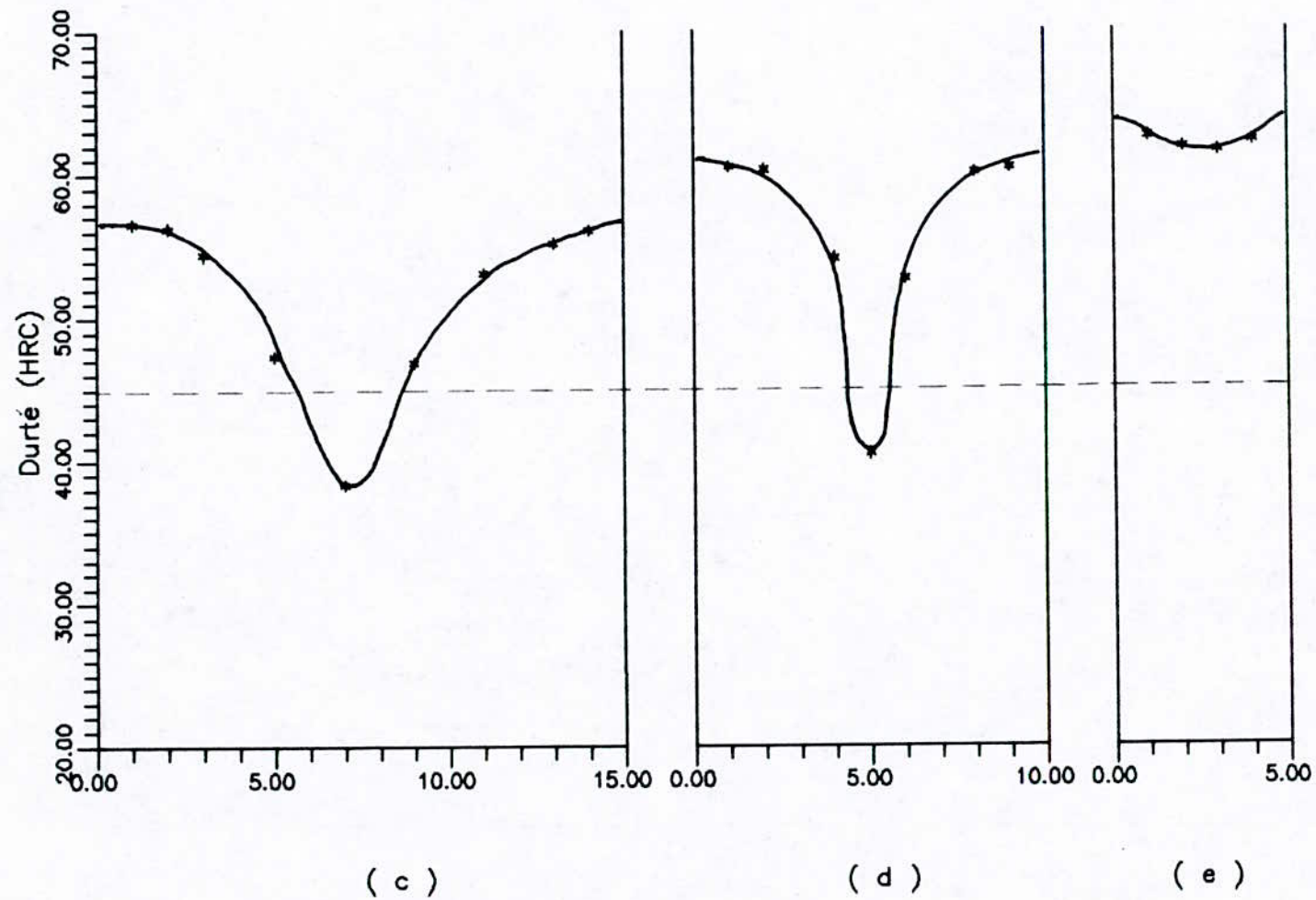


Figure 14 : Variation de la dureté le long d'un diamètre pour  
 l'acier XC 42 austénisé dans le domaine monophasé  
 $T_A = 850\text{ }^\circ\text{C}$   
 (c) :  $\varnothing = 15\text{ mm}$  ; (d) :  $\varnothing = 10\text{ mm}$  ; (e) :  $\varnothing = 5\text{ mm}$

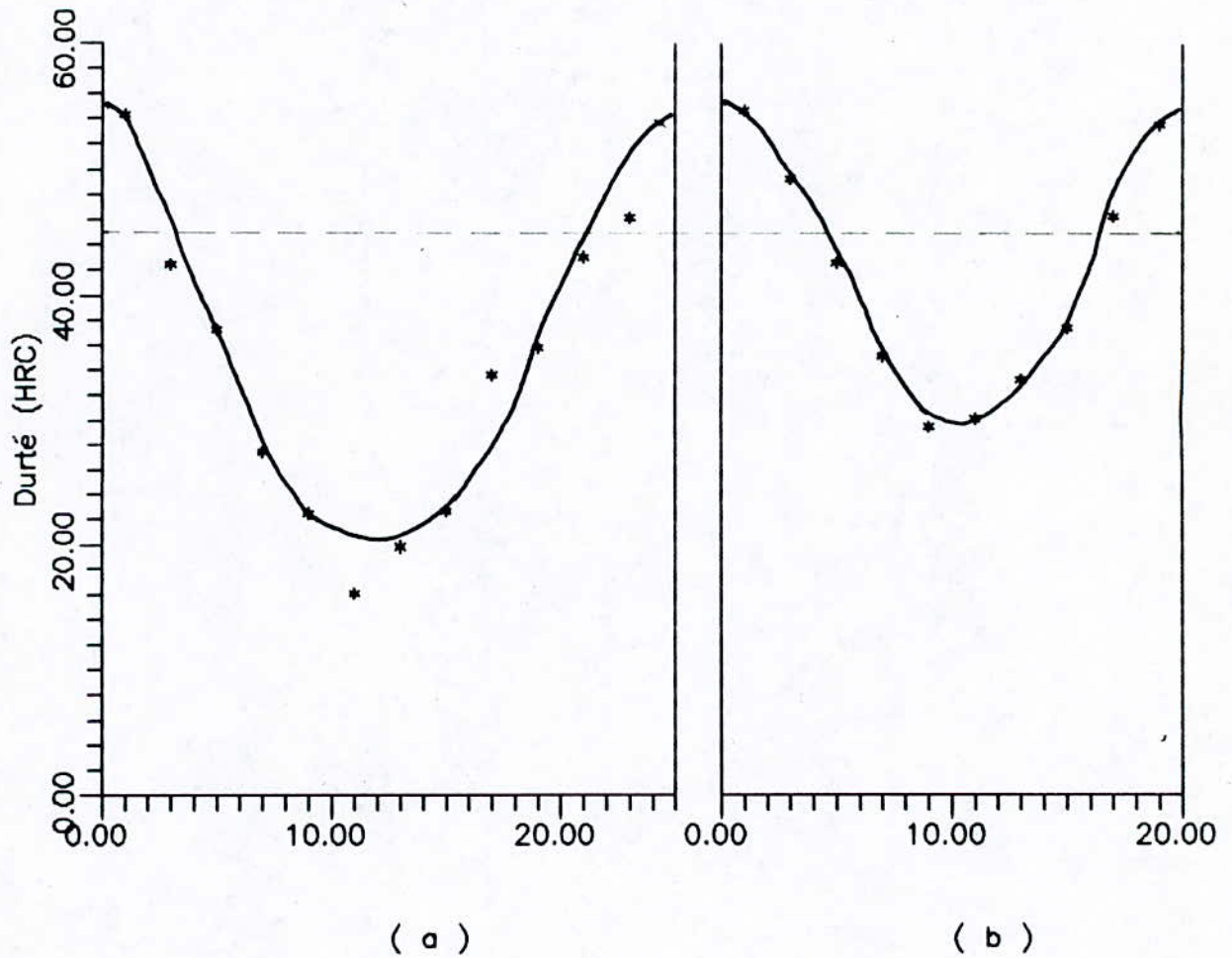


Figure 15 : Variation de la dureté le long d'un diamètre pour l'acier XC 42 austénisé dans le domaine biphasé à  $T_{\gamma} = 780 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 (a) :  $\phi = 25 \text{ mm}$  ; (b)  $\phi = 20 \text{ mm}$



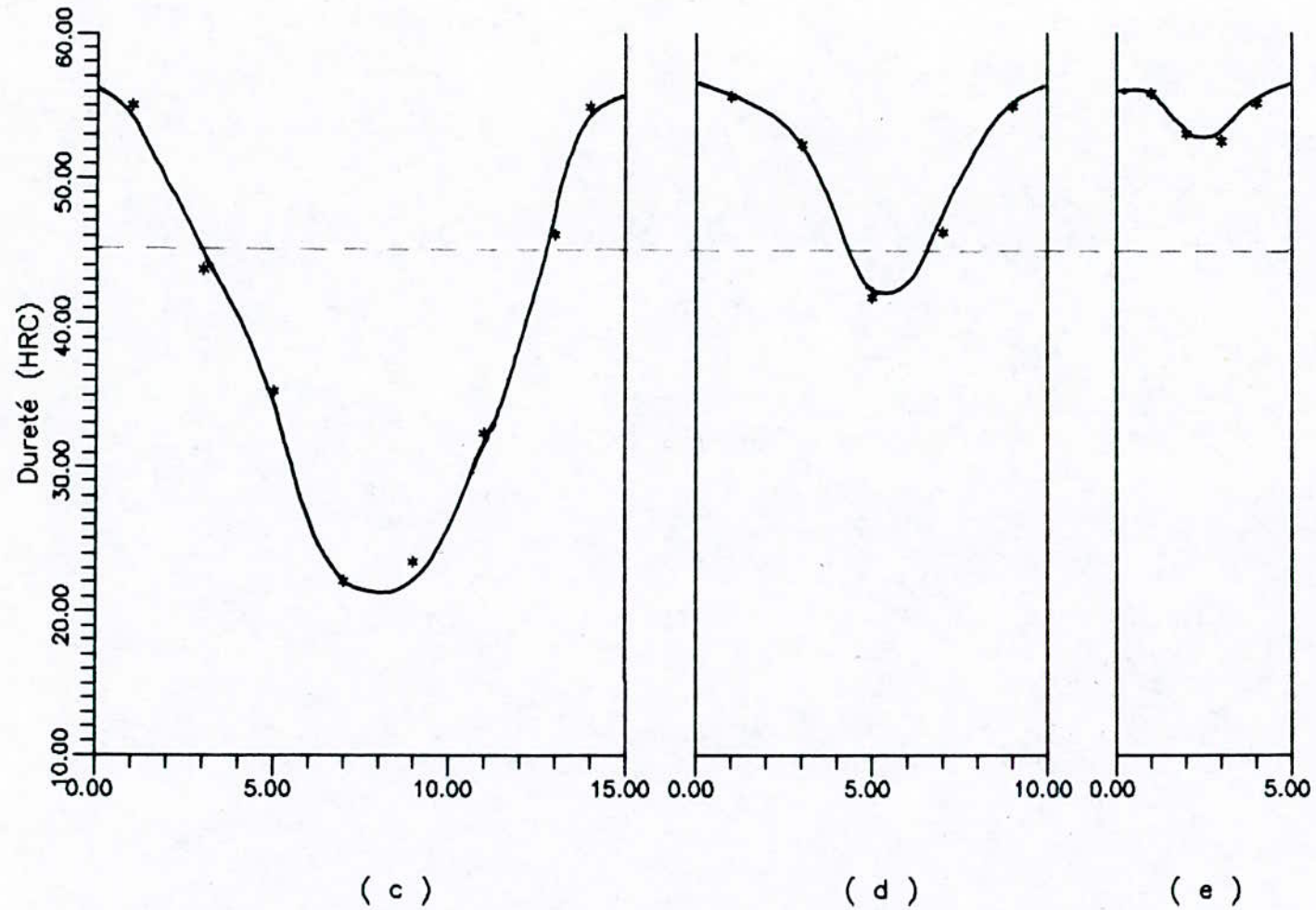


Figure 16 : Variation de la dureté le long d'un diamètre pour  
 l'acier XC 42 austénisé dans le domaine biphasé  
 $T_y = 780^\circ\text{C}$   
 (c) :  $\phi = 15$  mm ; (d) :  $\phi = 10$  mm ; (e) :  $\phi = 5$  mm

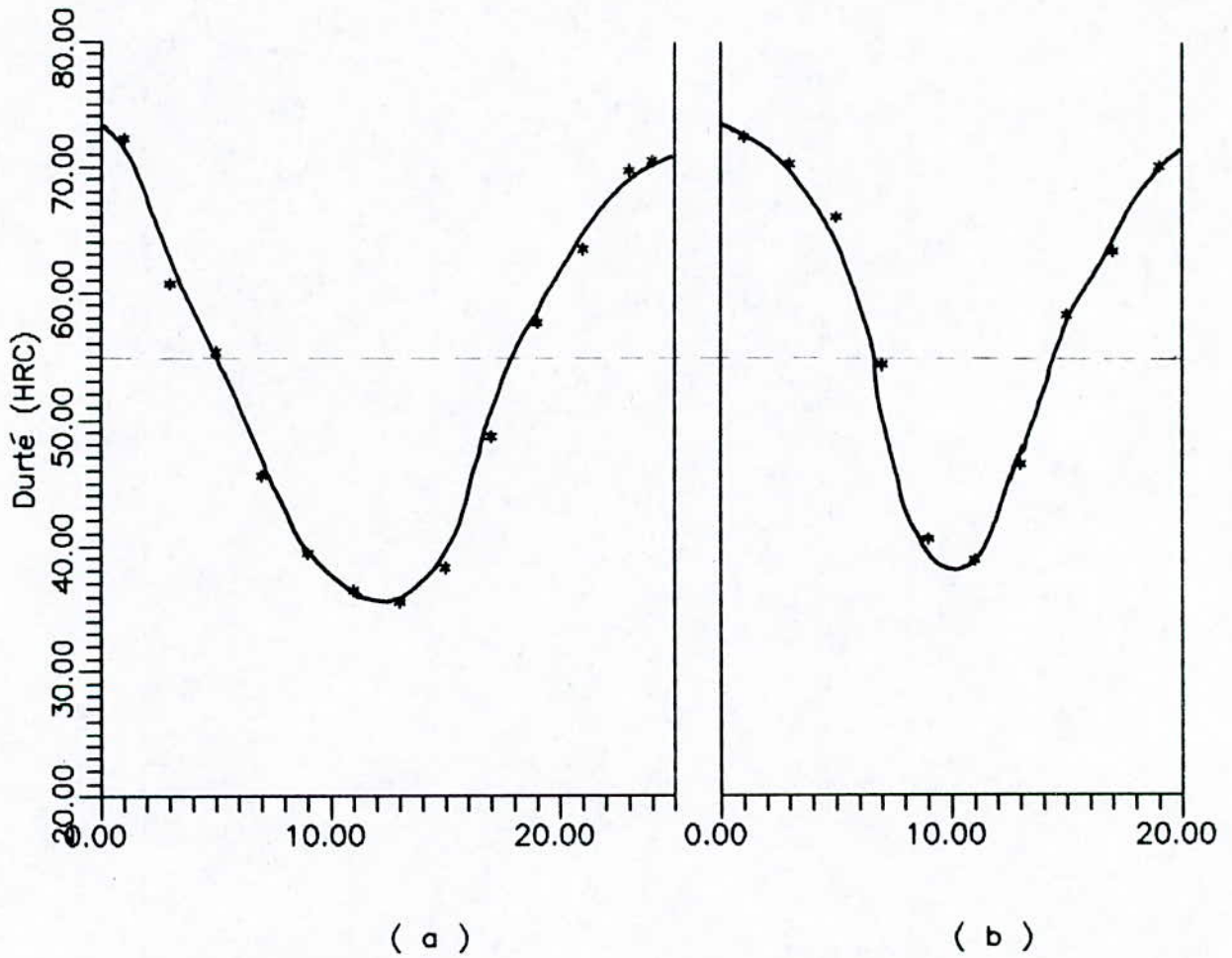


Figure 17 : Variation de la dureté le long d'un diamètre pour l'acier XC 110 austénisé dans le domaine monophasé à  $T_y = 900^\circ\text{C}$   
 (a) :  $\phi = 25$  mm ; (b) :  $\phi = 20$  mm

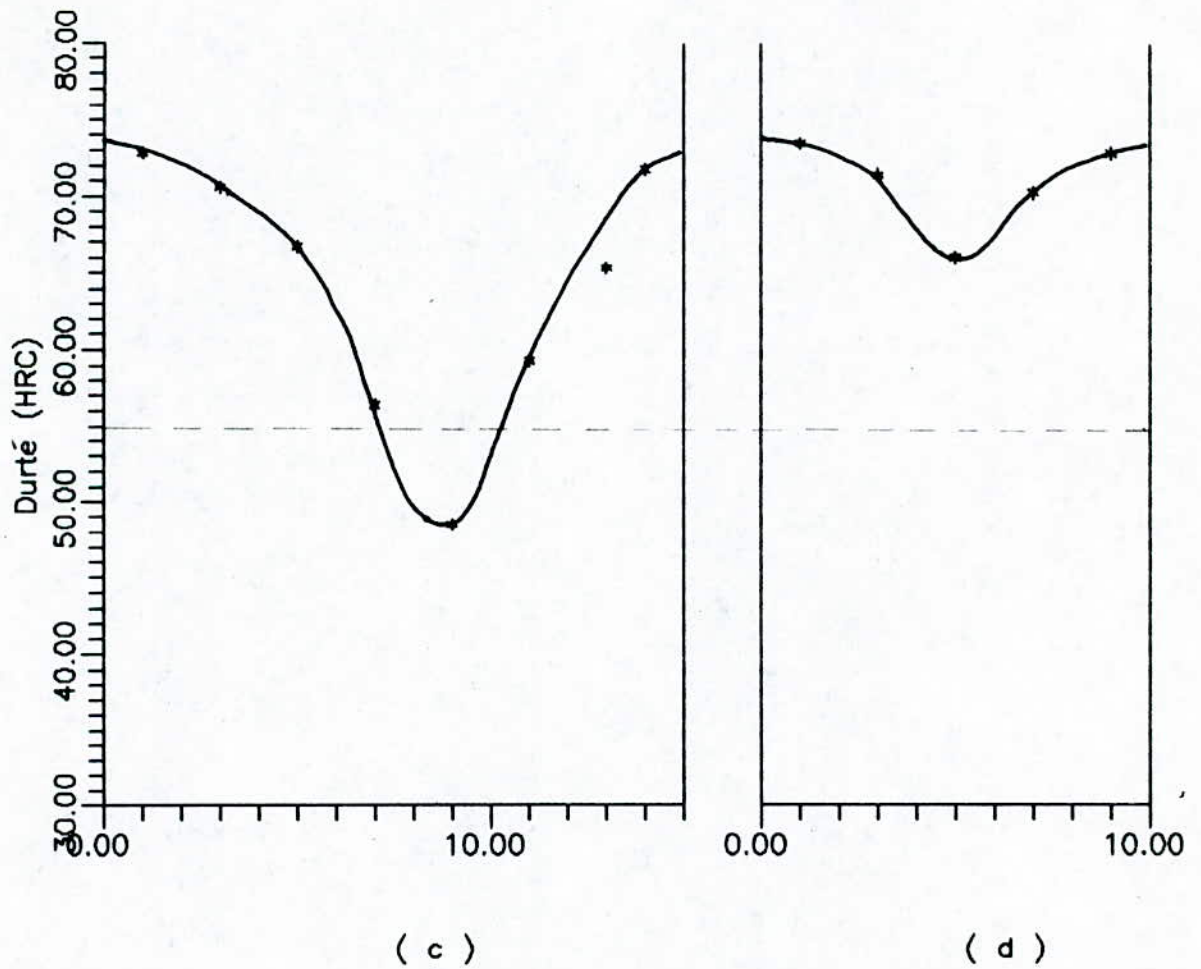


Figure 18 : Variation de la dureté le long d'un diamètre pour l'acier XC 110 austénisé dans le domaine monophasé à  $T_y = 900^\circ\text{C}$   
(c) :  $\varphi = 15 \text{ mm}$  ; (d) :  $\varphi = 10 \text{ mm}$

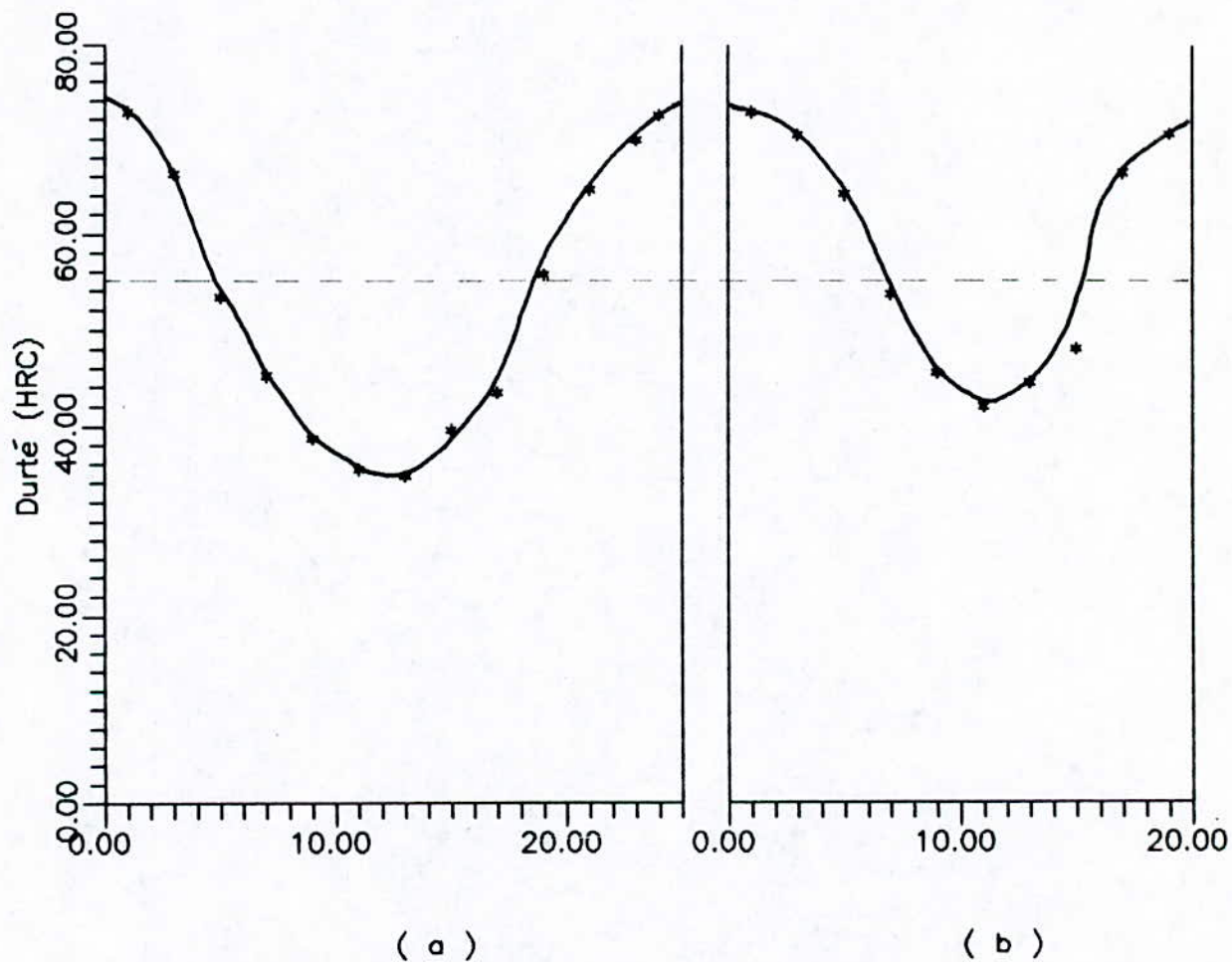


Figure 19 : Variation de la dureté le long d'un diamètre pour l'acier XC 110 austénisé dans le domaine biphasé à  $T_\gamma = 780 \text{ }^\circ\text{C}$   
 (a) :  $\varphi = 25 \text{ mm}$  ; (b) :  $\varphi = 20 \text{ mm}$



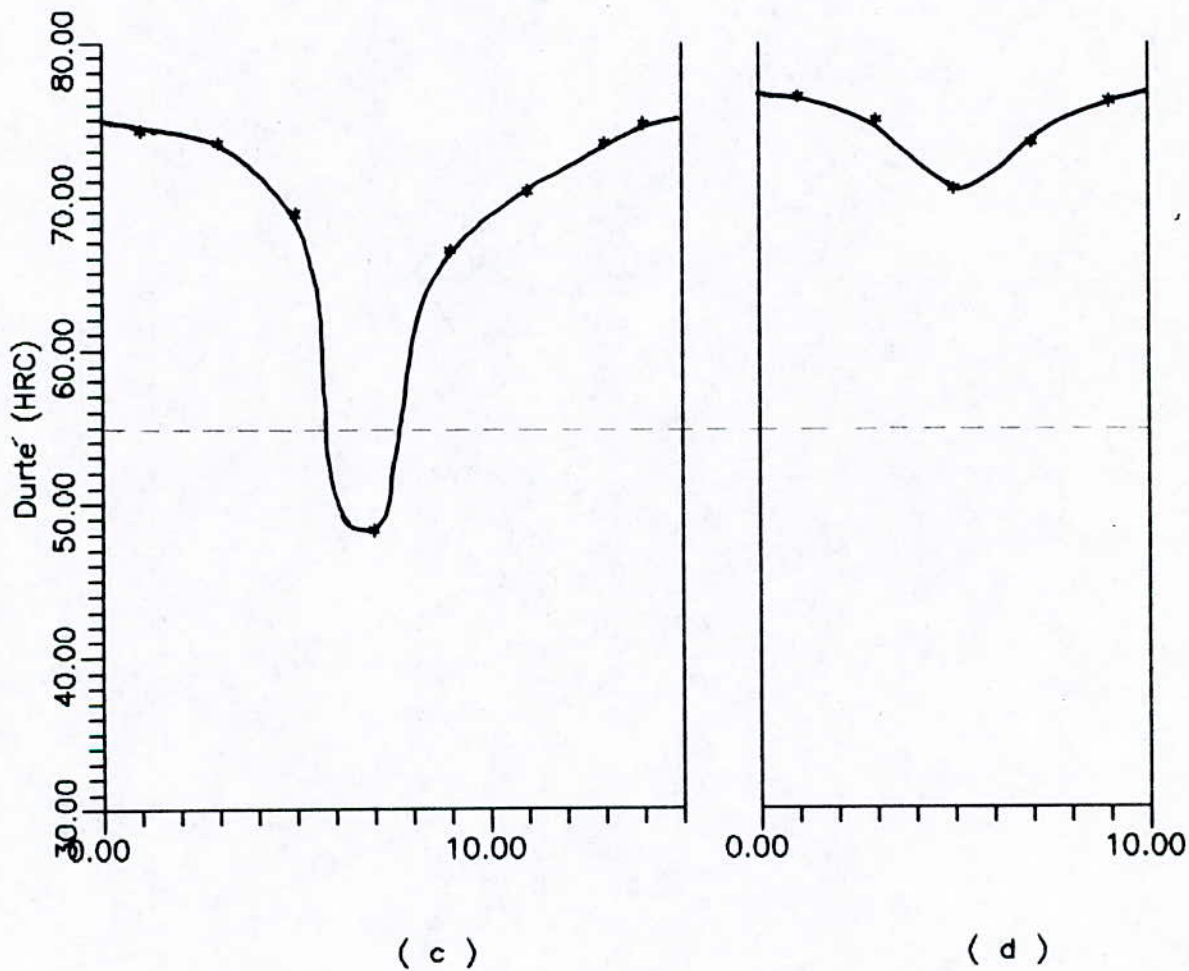


Figure 90 : Variation de la dureté le long d'un diamètre pour l'acier XC 110 austénisé dans le domaine biphasé à  $T_y = 780^\circ\text{C}$   
 (c) :  $\varnothing = 15$  mm ; (d) :  $\varnothing = 10$  mm

IV-2- Essai JOMINY :

Les tableaux VI et VII représentent les résultats de l'essai JOMINY appliqué aux deux nuances ( XC 42 et XC 110 ) austénisées dans le domaine monophasé et biphasé .

D.P.E.T ( mm )	Domaine Monophasé $T_{\gamma} = 850^{\circ}\text{C}$		Domaine Biphasé $T_{\gamma} = 780^{\circ}\text{C}$	
	Dureté ( HRC )			
	MIN	MAX	MIN	MAX
J1.5	50.5	55.6	40.1	50.2
J3	47.6	55.3	23.5	48.5
J5	42.2	51.4	21.5	45.4
J7	24.5	37.5	20.3	43.0
J9	19.5	23.5	17.4	35.6
J11	16.7	20.6	17.1	26.3
J13	14.2	19.1	14.9	22.7
J15	12.4	17.5	14.0	21.5
J20	9.8	15.9	12.2	17.3
J25	8.1	13.7	9.1	13.2
J35	5.5	10.5	7.4	11.1
J45	3.5	8.1	5.1	7.7
J55	2.6	6.2	3.5	6.2
J65	2.1	5.0	2.2	5.1

D.P.E.T : Distance à Partir de l'Extrémité Trempée

Tableau VI : Résultats de mesure de dureté de l'essai JOMINY pour l'acier XC 42 .

D.P.E.T. ( mm )	Domaine Monophasé T <sub>γ</sub> = 900 °C		Domaine Biphasé T <sub>γ</sub> = 780 °C	
	Dureté ( HRC )			
	MIN	MAX	MIN	MAX
J1.5	69.4	73.1	65.8	76.2
J3	61.3	70.0	56.5	63.1
J5	52.0	65.5	47.0	50.7
J7	43.4	60.9	43.5	47.5
J9	35.5	53.9	40.2	43.8
J11	31.3	45.3	37.5	41.6
J13	29.4	43.7	35.0	39.1
J15	27.5	41.0	33.1	37.0
J20	26.2	38.7	28.5	33.1
J25	24.9	36.2	25.4	31.5
J35	22.5	34.5	22.3	29.2
J45	21.3	31.5	21.5	28.5
J55	19.4	28,5	20.3	26.9
J65	18.8	26.3	19.9	26.4

D.P.E.T. : Distance à Partir de l'Extrémité Trempée

Tableau VII : Résultats de mesure de dureté de l'essai JOMINY  
pour l'acier XC 110 .

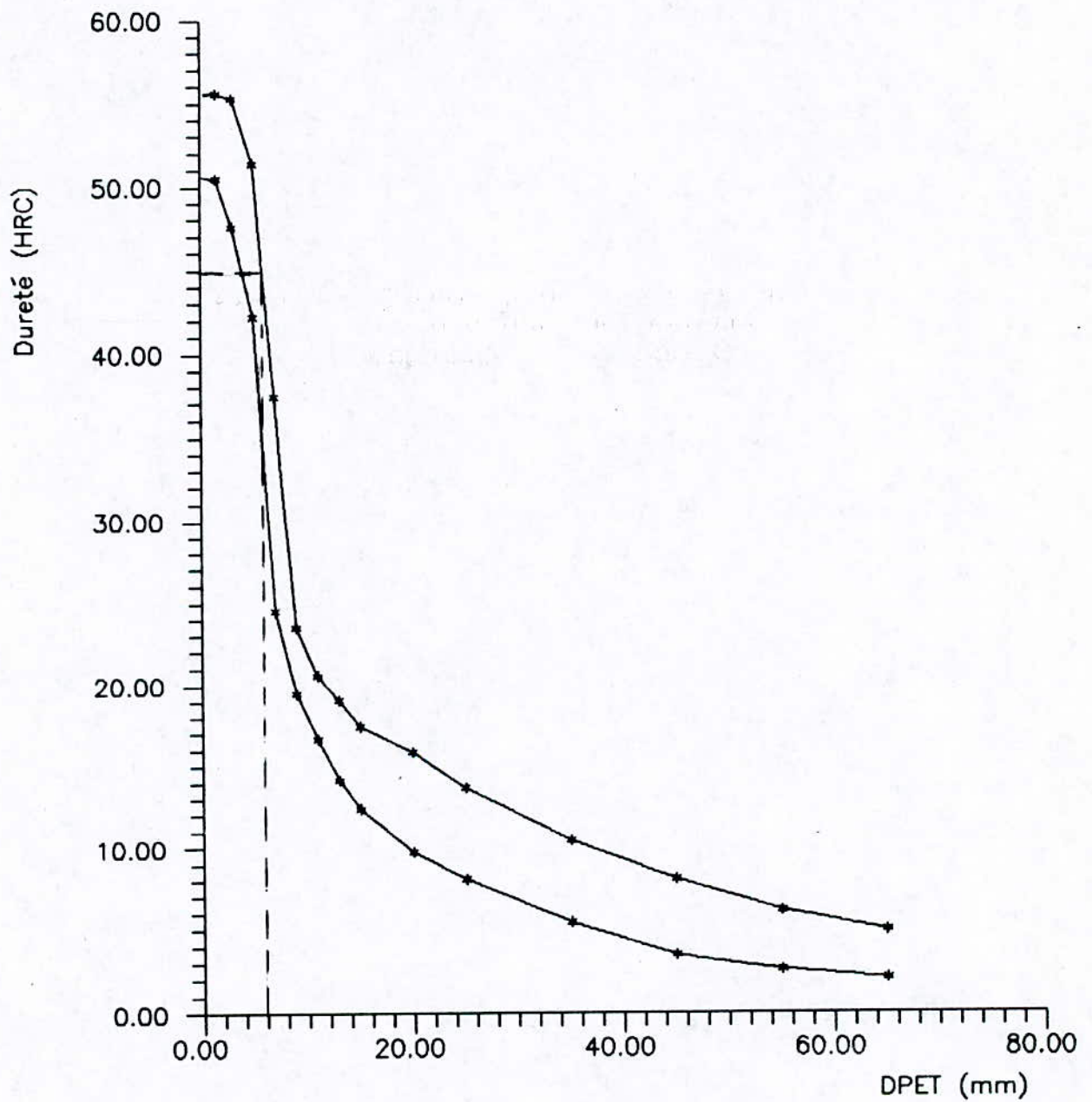


Figure 31: Essai JOMINY pour l'acier XC 42  
austénitisé dans le domaine  
monophasé  $T_y = 850^{\circ}\text{C}$



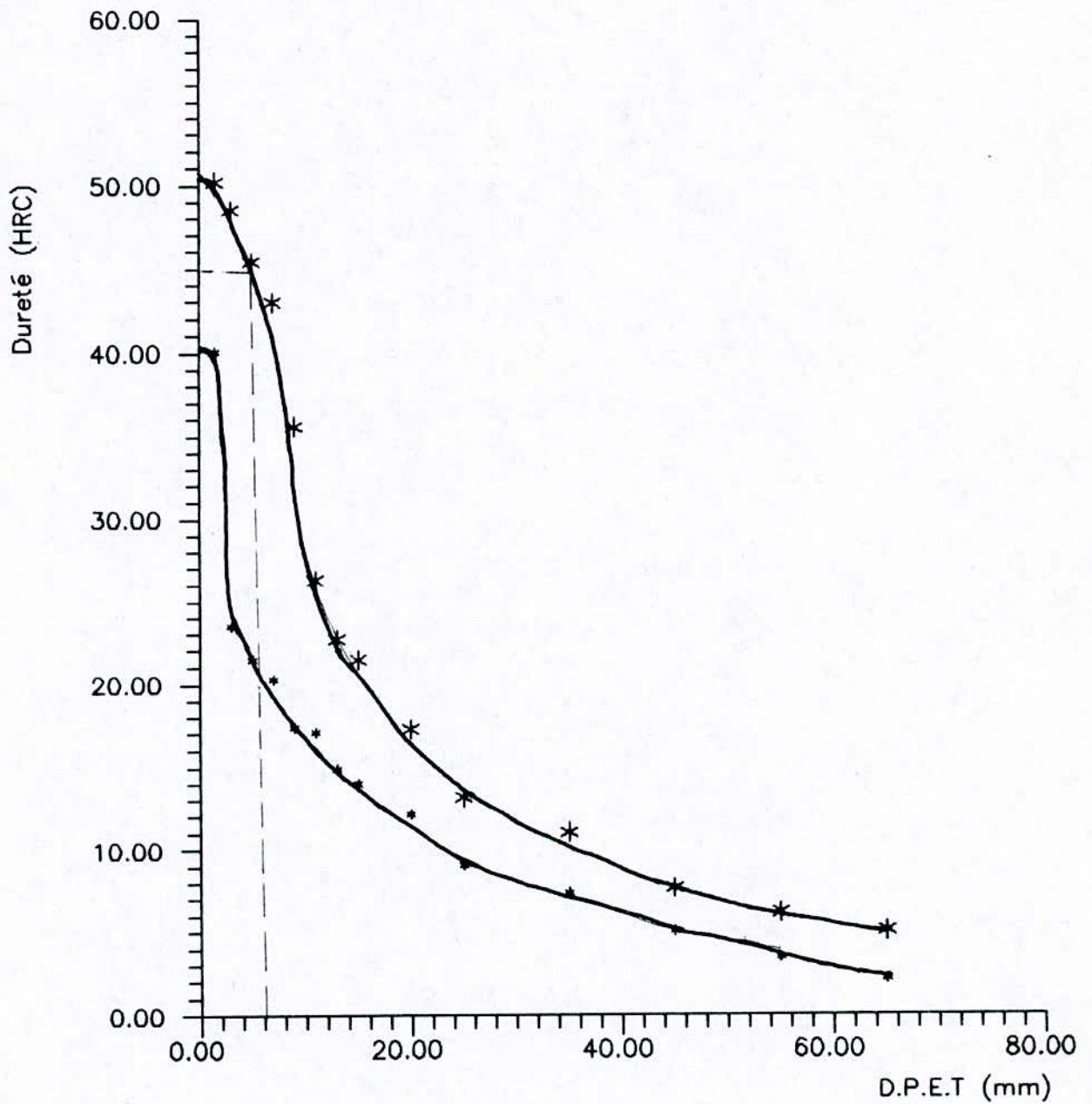


Figure 22 : Essai JOMINY pour l'acier XC 42  
 austenitisé dans le domaine  
 biphasé  $T_y = 780\text{ }^\circ\text{C}$

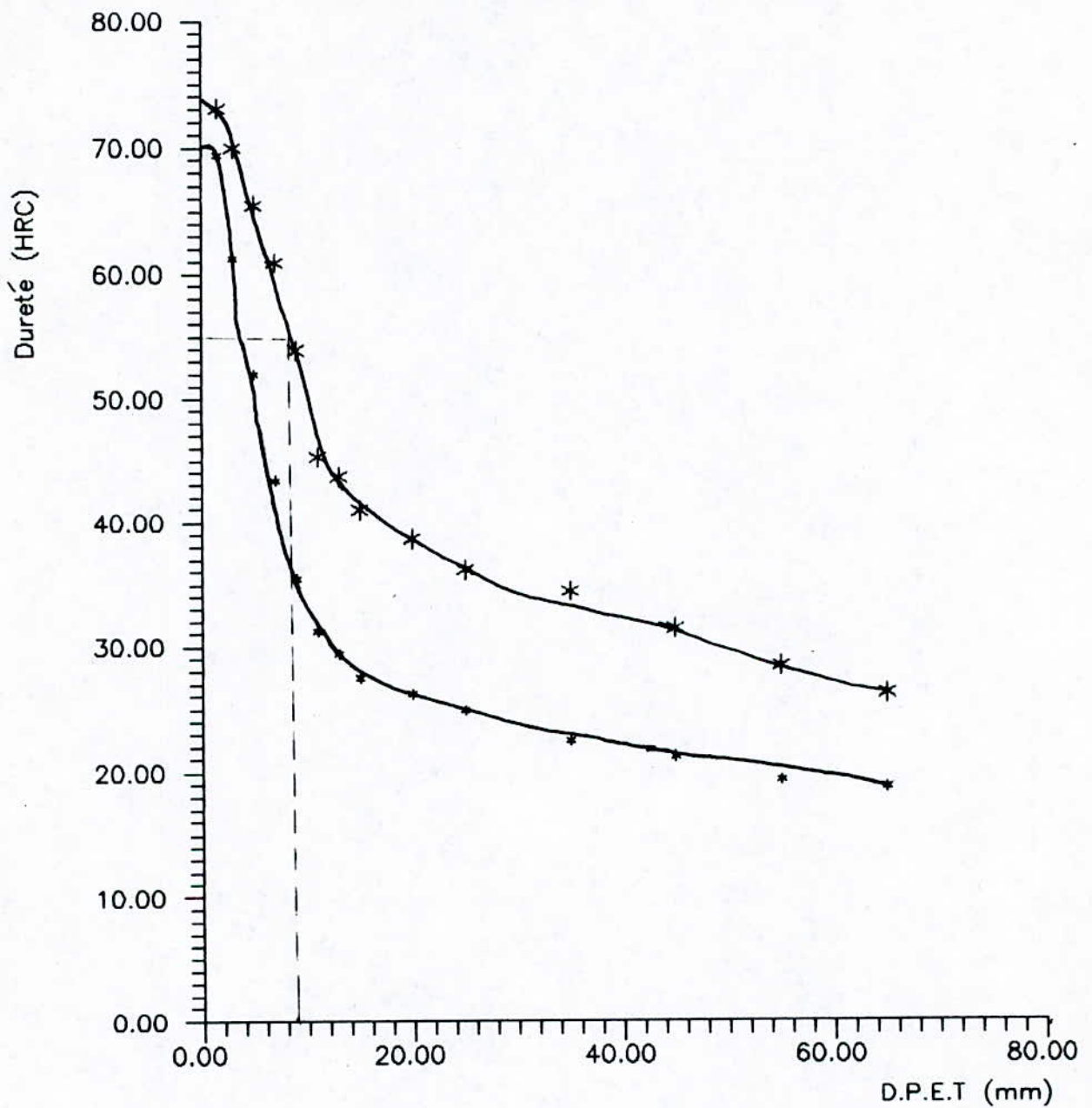


Figure 23 : Essai JOMINY pour l'acier XC 110 austénitisé dans le domaine monophasé à  $T_y = 900^\circ\text{C}$

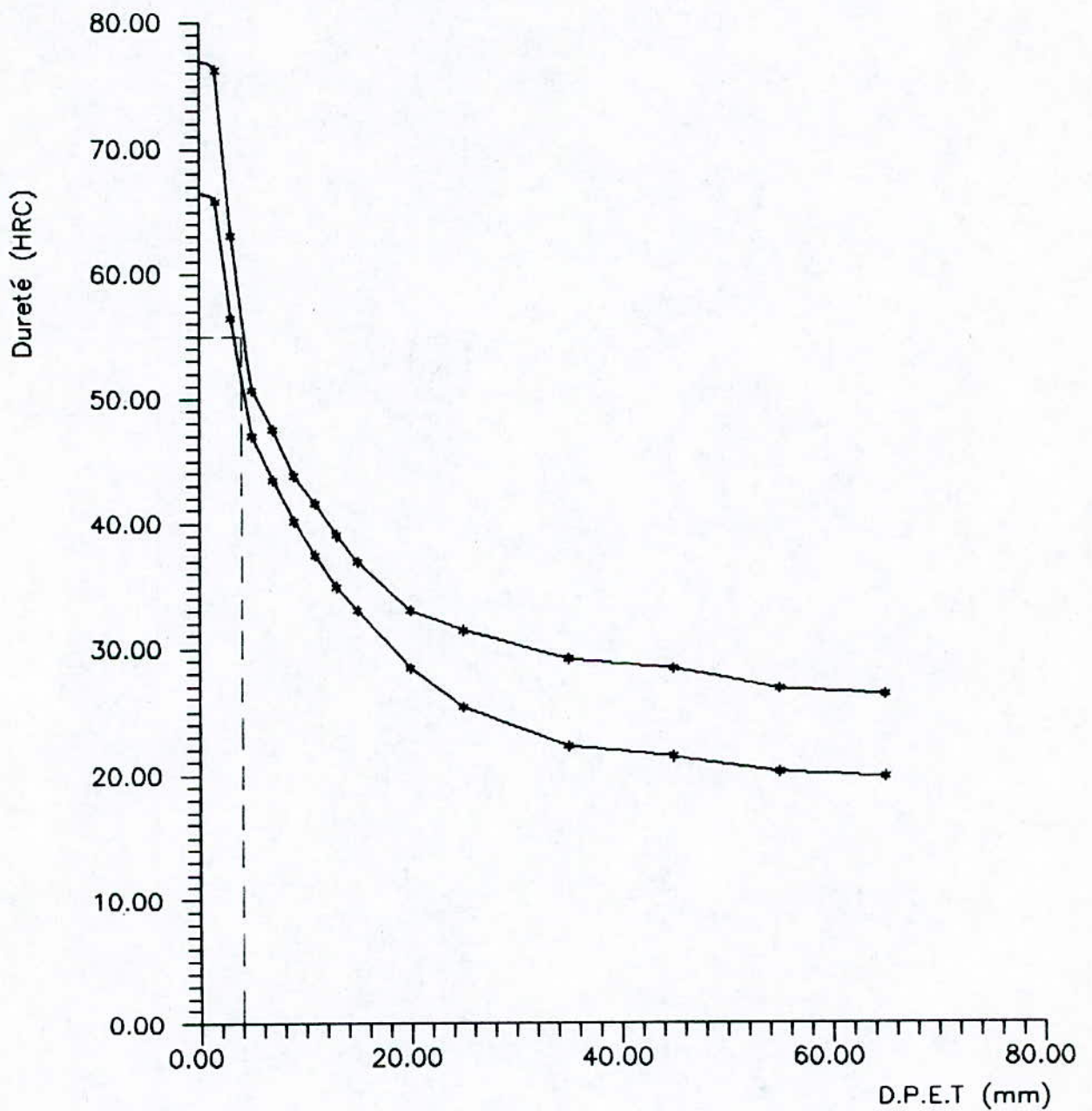


Figure 24: Essai JOMINY pour l'acier XC 110  
 austénisé dans le domaine  
 biphasé  $T_\gamma = 780 \text{ }^\circ\text{C}$

#### IV-3- INTERPRETATION :

Pour déterminer le diamètre critique par la méthode de GROSSMANN .On a pris comme critère la distance de la surface à la limite de la zone contenant 50 % de martensite .

Pour l'acier XC 42, d'après la courbe de la figure 8 du paragraphe III-3-1-2, la dureté pour une structure contenant 50 % de martensite est de 45 HRC et pour l'acier XC 110, par extrapolation de ces courbes de cette figure, elle est de 55 HRC.

La température  $m_f$  pour l'acier XC 42 est égale à  $150^{\circ}$  C et pour l'acier XC 110 est de  $180^{\circ}$  C [ 6 ].

D'après les figures 13, 14, 15 et 16, on constate que :

- Le diamètre critique de l'acier XC 42 est compris entre 5 et 10 mm pour le domaine monophasé et biphasé .

- Les duretés des microstructures obtenues à partir du domaine monophasé pour l'acier XC 42 sont plus grandes que celles obtenues à partir du domaine biphasé .

- La dureté de la microstructure à 100 % martensitique pour l'acier XC 42 est égale à 60 HRC .

- La dureté de la microstructure à 50 % de martensite et 50 % de ferrite pour l'acier XC 42 est voisine à 55 HRC.

Pour l'acier XC 110, les figures 17, 18, 19 et 20 nous permettent de constater que :

- Le diamètre critique est compris entre 15 et 10 mm pour les deux cas d'austénitisation .



- Les duretés de la microstructure obtenues à partir du domaine monophasé sont légèrement inférieures à celles obtenues dans le domaine biphasé .

-Le crochet qui se trouve au milieu des courbes ne disparaît pas pour un diamètre inférieur au diamètre critique (voir Fig 16 et 20 ) pour l'acier XC 110 .

D'après les courbes JOMINY des figures 21, 22, 23 et 24, en prenant les valeurs maximale, on trouve que :

- Pour l'acier XC 42, la distance à partir de l'extrémité pour trouver 50% de martensite est voisine à 6 mm pour les deux domaines d'austénitisation .

-Pour XC 110 la distance est égale à 9 mm pour le domaine monophasé et 4 mm pour le domaine biphasé .

-la dureté de la microstructure à 100% martensite de l'acier XC 42 est égale à 60 HRC. La dureté de microstructure biphasé est 50 HRC pour cet acier .

D'après les résultats des deux méthodes, on constate que la profondeur de trempe est la même pour les deux domaines d'austénitisation dans le cas de l'acier XC 42 alors que pour le cas de l'acier XC 110, elle ne l'est pas pour l'essai JOMINY. Ceci peut être expliqué par le fait que pour les aciers hypereutectoïdes, la transformation martensitique n'est pas complète.

d'après les photos micrographiques réalisées sur les échantillons (voir annexe), on vérifie bien que les duretés des

microstructures obtenues à partir du domaine monophasé pour l'acier XC 42 sont plus grande que celles obtenues à partir du domaine biphasé .

En effet, pour les biphasés, presque la moitié de microstructure est de la ferrite, alors que dans le cas de l'acier XC 110 c'est l'inverse parce que dans les biphasés on trouve de la cémentite au lieu de la ferrite .

- La présence ou non du crochet qui se trouve au milieu des courbes (méthode GROSSMANN ) pour un diamètre inférieur au diamètre critique est dû tout simplement à ce que dans le cas de l'acier XC 42, la transformation martensitique est complète alors qu'elle ne l'est pas dans le cas de l'acier XC 110

*PARTIE 4*

## V- CONCLUSION :

L'objet du travail qui a été fait consiste à comparer la trempabilité des aciers au carbone austénitisés à partir du domaine monophasé à celle austénitisé dans le domaine biphasé . Les résultats obtenus montrent que, pour l'acier XC 42 qui représente les aciers au carbone hypoeutectoïdes, la présence de la phase ferrite ne change pas la profondeur de trempe, alors que pour les aciers hypereutectoïdes représentés par l'acier XC 110, la constance de la profondeur de trempe est confirmée par la méthode de GROSSMANN seulement .

Cependant, le résultat le plus important que l'on peut tirer de cette étude est la possibilité d'obtenir des tôles en acier au carbone avec une microstructure composée de ferrite et de martensite pour une épaisseur qui peut atteindre 6<sub>mm</sub> .

Ce travail serait bénéfiquement complété par une étude sur des aciers au carbone avec une teneur en carbone inférieur à 0.42 % .

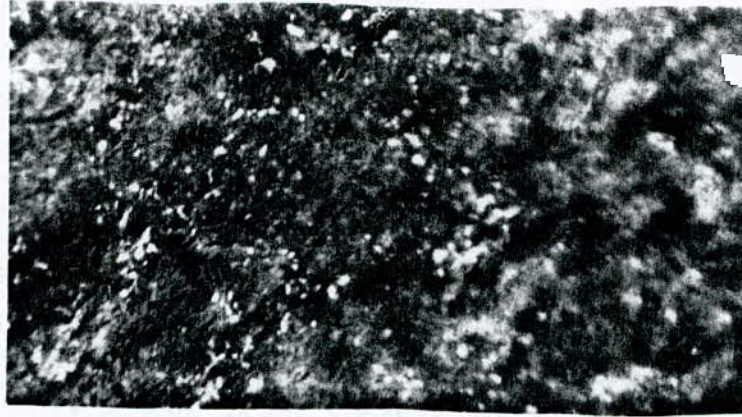


VI :

## ANNEXE

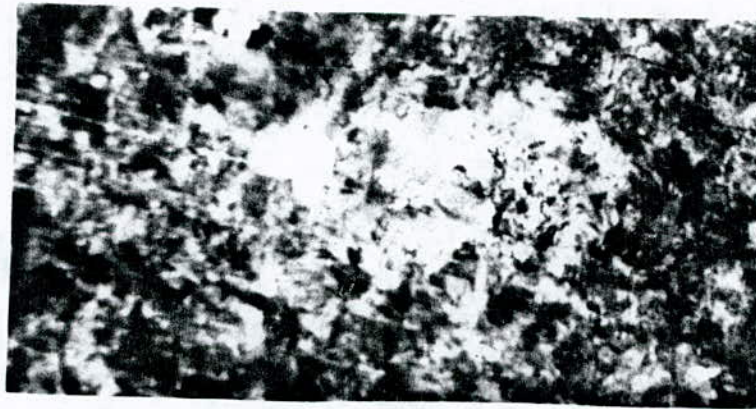
### Microstructure

Les photos de microstructure ont été prises sur trois points différents pour chaque diamètre de l'échantillon en l'occurrence l'extrémité, le centre et le milieu de la distance entre l'extrémité et le centre .



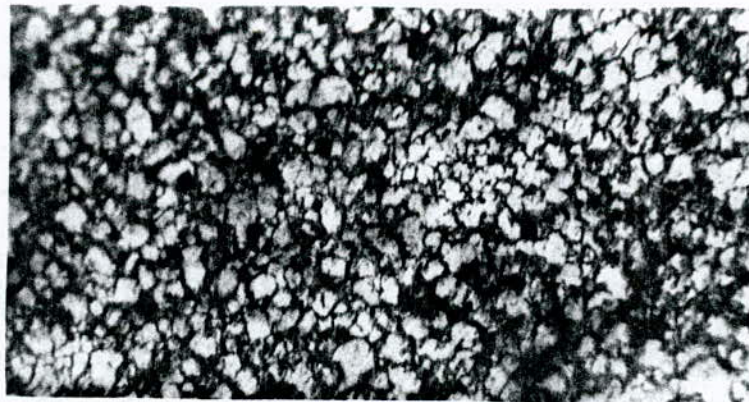
x 200

extremite



x 200

intermediaire

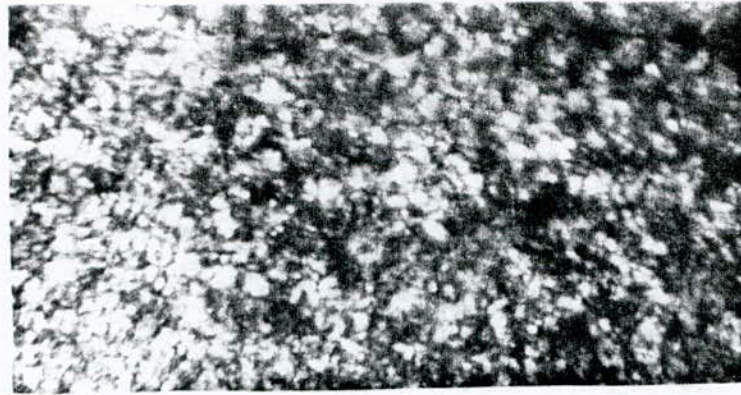


x 200

Centre

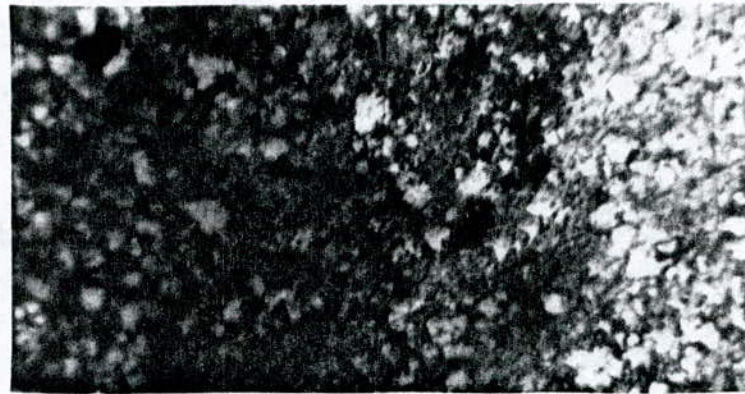
Acier XC 42 austénisé dans le domaine  
monophasé.  $\varnothing = 25$





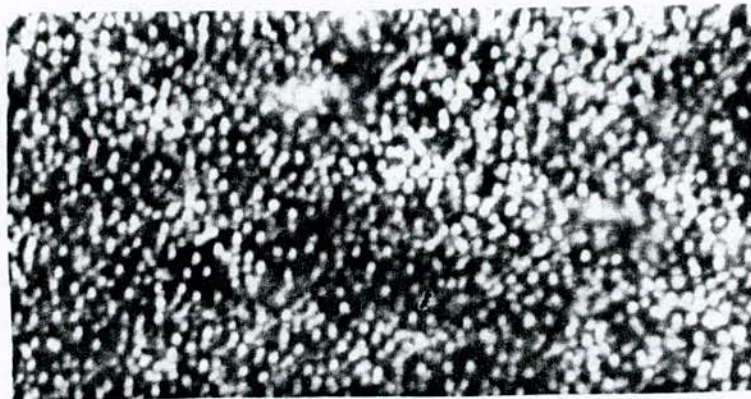
x 200

extremite



x 200

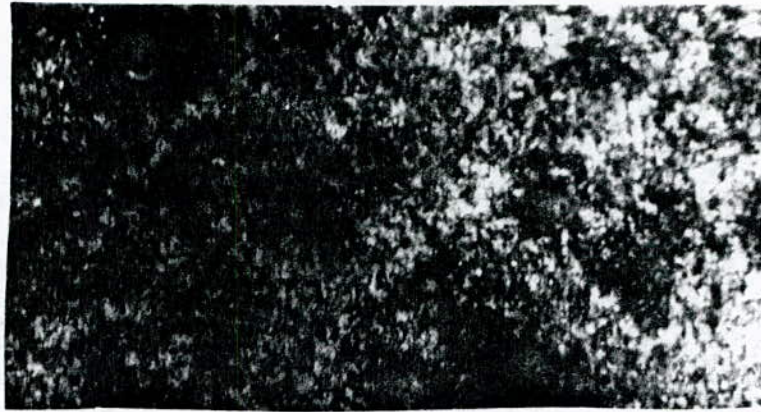
intermediaire



x 200

centre

Acier XC42 austénisé dans le domaine  
biphase .  $\varnothing = 25$



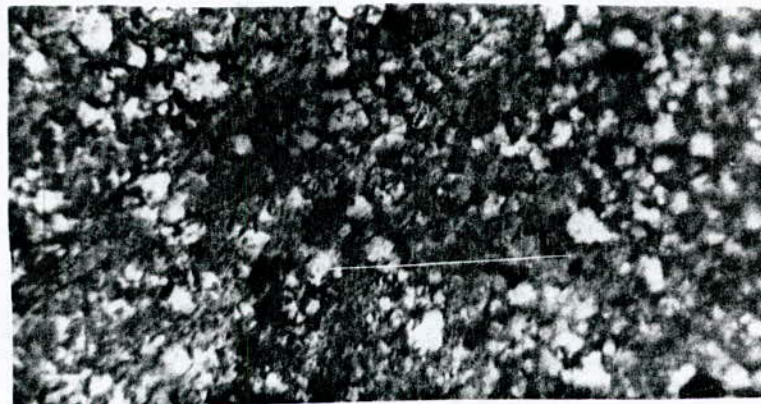
x 200

extremite



x 200

intermediaire



x 200

centre

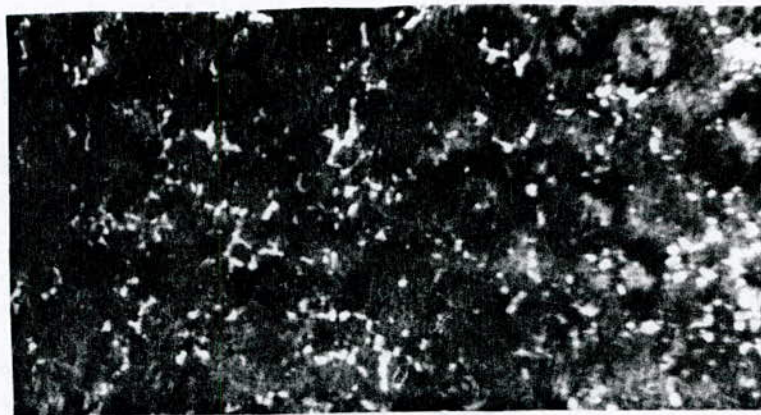
Acier XC 110 austenisé dans le domaine  
monophasé.  $\varnothing = 25$





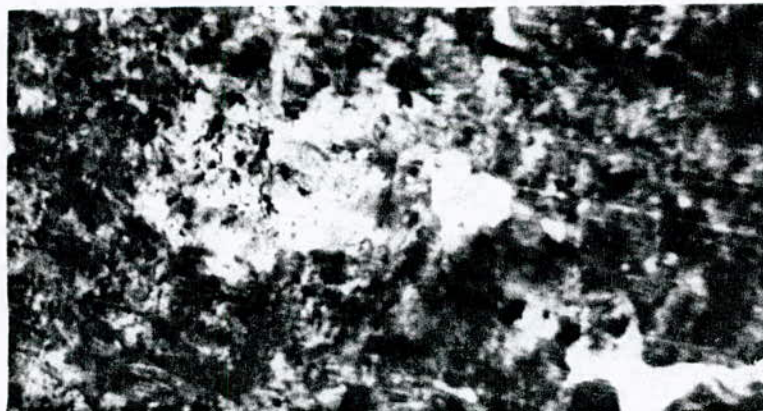
x 200

extremite



x 200

intermediaire



x 200

centre

Acier XC 110 austénisé dans le domaine  
biphase .  $\varnothing = 25$

VII :

BIBLIOGRAPHIE

- [ 1 ]- Précis de métallurgie  
5<sup>ème</sup> édition NATAN  
J . BARRALIS
- [ 2 ]- Métallographie et traitement  
thermique .4<sup>ème</sup> édition, MIR  
Mouscou  
LAKHTINE
- [ 3 ]- Des Matériaux  
2<sup>ème</sup> édition, revu  
J .M .DARLOT  
J .P .BAILON  
J .MASSONAVE
- [ 4 ]- Principe de base des traitement  
thermiques, thermomécanique et  
thermochimiques des aciers  
1992 PYC .édition  
A .CONSTANT  
G .HENRY  
J .C .CHARBONIER
- [ 5 ]- Heat treatment and processing  
principle  
A.I.M ,International Materiel  
Parck  
G .KRAUSS
- [ 6 ]- Physical Metallurgy Principles  
2<sup>ème</sup> édition PWS . KENT  
R E REED - HILL

[ 7 ]- Technique de l'ingénieur

LUCIEN .SOUSTRE

m 1150

[ 8 ]- Manuel pratique des traitements

thermiques de l'acier

C .CHAUSSIN

2<sup>ème</sup> édition DUNOD

[ 9 ]- Métallurgie Appliquée

JACQUE .ENRIE

classique HACHETTE

