

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE D'UN DIAGRAMME TTT
POUR UN
ACIER XC 80

Proposé Par :

I.BELHADEF

Etudié par :

R.DJOU DJOU
M. KALLA

Dirigé par :

I.BELHADEF

PROMOTION : JANVIER 88

المركز الوطني للتقنيات
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قال الله تعالى :
« قُلْ هَلْ يَسْتَوِي الَّذِينَ
يَعْلَمُونَ وَالَّذِينَ لَا يَعْلَمُونَ . »

وقال رسول الله صلى الله عليه وسلم :
« وَمَنْ سَلَكَ طَرِيقًا يَلْتَمِسَ فِيهِ عِلْمًا
سَهَّلَ اللَّهُ لَهُ طَرِيقًا إِلَى الْجَنَّةِ . »
(رواه مسلم .)

- سبحانك لا علم لنا إلا ما
علمتنا . إنك أنت العلم الحكيم -

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

UNIVERSITE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : GENIE-MECANIQUE

Coordinateur : BELHADJF

Auteur ingénieur : DJOUJOU et KALLA



وزارة التعليم العالي

المدرسة الوطنية المتعددة

مهندسة الهندسة الميكانيكية

موجهة : بلهادف

تلميذ مهندس : جوجو و كالة

الموضوع : دراسة مختلف بياني للتحويلات وفقا للزمن ودرجة الحرارة لفولاذ XC80
المختبر : تستعمل دراسات في تكوين مختلف بياني للتحويلات وفقا للزمن ودرجة الحرارة
للفولاذ XC80 وذلك عن طريق تحديد بدايات ونهايات التحويلات المختلفة
لمختلف درجات الحرارة بإجراء مناهضة حيث تعدد يتم اقتراح بياني
بتعدد يتم عمل تصنيفي قابل للإيجاز على مستوى مختبر الميكانيكية الحرارية

Titre : Etude d'un diagramme T.T.T d'un acier XC80

Notre étude consiste à établir le diagramme transformation-temps-température de l'acier XC80 et cela en déterminant le début et la fin de transformation à différentes températures ainsi que la proposition d'un T.P réalisable au laboratoire de traitement thermique .

Titre : Study of T.T.T diagram of steel

Our study consists in making transformation-time-temperature diagram of XC80 steel to do this , we must define the objective of different temperature transformation ; and the suggestion of an applied work in the laboratory of thermal treatment .

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — مكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

JE DEDIE CE MODESTE MEMOIRE :

A MES TRES CHERE PARENTS ,A QUI JE DOIT
TOUT ,CE FAIBLE TMOIGNAGE D'AFFECTION ET
DE PROFONDE RECONNAISSANCE .

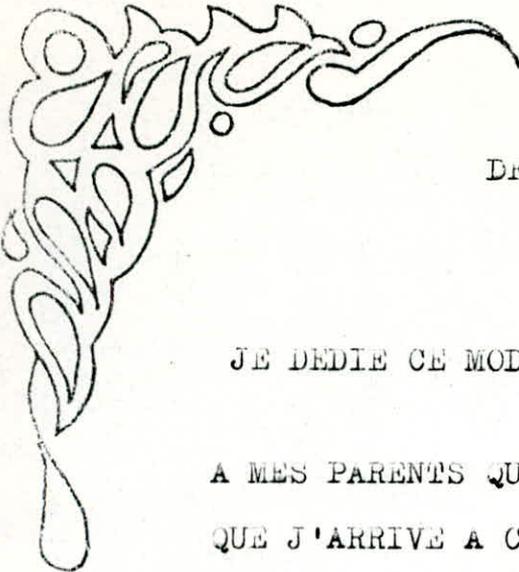
A MON FRERE ET MES SOEURS A QUI JE SOUHAITE
LA REUSSITE DANS LEUR ETUDES .

A MOKHTAR -MON ONCLE FRERE ET AMIE -

A MA GRANDE MERE ET MES ONCLES ET TANTES .

A TOUS MES AMIS

ABD EL HAMID DJOUDJOU



DEDICACES



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

JE DEDIE CE MODESTE MEMOIRE:

A MES PARENTS QUI SE SONT SACRIFIES AFIN
QUE J'ARRIVE A CE BUT

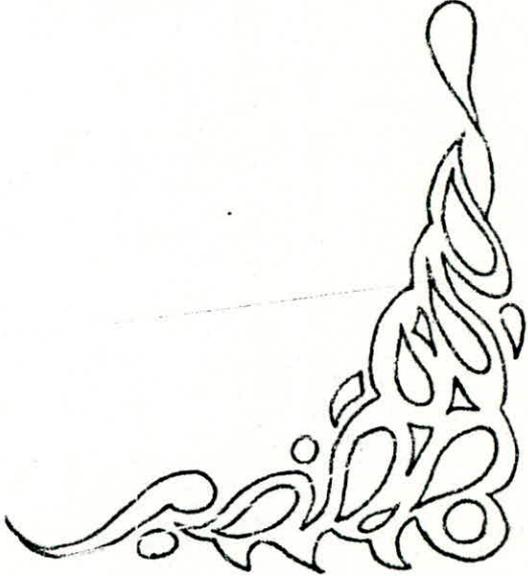
A MES FRERES

A MA SOEUR

A TOUTE MA FAMILLE

A TOUS MES AMIS

MOURAD KALLA



REMERCIEMENT

NOUS TENONS A REMERCIER MONSIEUR BELHADEF POUR
SON AIDE PRECIEUSE , AINSI QUE TOUS LES ENSEI-
GNANTS QUI ONT CONTRIBUE A NOTRE FORMATION .
QUE TOUS CEUX QUI ONT PARTICIPE DE PRES OU
DE LOIN A L'ETUDE DE CE SUJET , TROUVENT
ICI NOTRE SINCERE GRATITUDE .

TABLe DES MATIERES

INTRODUCTION	3
CHAPI GENERALITES	3
I.1 HISTORIQUE	6
I.2 BUT DE L'ETUDE D'UN DIAGRAMME T.T.T	7
I.3 PRINCIPE DE L'ETUDE D'UN DIAGRAMME T.T.T	7
I.4 COURBE T.T.T	8
CHAP 2: DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CARBONE	9
2.1 DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CARBONE	10
2.3 DESCRIPTION GENERAL	12
2.3 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGES	13
CHAP 3: TRANSFORMATION DE L'AUSTENITE EN CONDITON	
ISOTHERME	14
3.1 CINETIQUE GLOBAL ISOTHERME	15
3.2 LES DEUX CLASSE DE TRANSFORMATION DE	
L'AUSTENITE EN CONDITION ISOTHERME	16
3.2.1 TRANSFORMATION AVEC DIFFUSION	16
3.2.1.1 GERMINATION ET CROISSANCE	16
3.2.1.2	18
3.2.1.3 TRANSFORMATION PERLITIQUE	19
3.2.1.4 TRANSFORMATION BAINITIQUE	22
3.2.1.5 RESUME	24
3.2.2 TRANSFORMATION SANS DIFFUSION	25
3.2.2.1	25

3.2.2.2 TRANSFORMATION MARTENSITIQUE

CHAP4/ DIAGRAMME T.T.T	30
4.I NOTION SUR LE TRACE DES COURBES T.T.T	31
4.I.I METHODES DISCONTINUES	31
4.I.I.I MICROGRAPHIE	31
4.I.I.2 RADIOCRISTALLOGRAPHIE	33
4.I.I.3 ESSAI DE DURETE	33
4.I.2 METHODES CONTINUES	34
4.I.2.I ANALYSE THERMOMAGNETIQUE	34
4.I.2.2 DILATOMETRIE	35
4.2FACTEUR INFLUENCANT LES COURBES T.T.T	35
4.2.I INFLUENCE DE LA TENEUR EN CARBONE	35
4.2.I.I CAS DE L'ACIER EUTECTOIDE	36
4.2.I.2 CAS DE L'ACIER NON EUTECTOIDE	38
4.2.2 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGE	39
4.2.2.INNFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGES SUR LES ACIERS	39
4.2.2.2 INFLUENCES DES ELEMENTS D'ALLIAGES SUR LES COURBES T.T.T	39
4.3 INFLUENCE DES CONDITIONS D'AUSTENISATIONS	41
CHAP 5: TRAITEMENTS ISOTHERMES	43
5.I INTRODUCTION	44
5.2 TREMPE ETAGE MARTENSITIQUE	45
5.3 TREMPE ETAGE BAINITIQUE	48

5.4 RECUIT ISOTHERME	50
5.5 AUSTENITIFORMAGE	52
CHAP 6/ MATERIAU ET EXPERIMENTATION	55
6.1 MATERIAU	56
6.2 FOUR A BAIN LIQUIDE	57
6.3 BAIN DE SEL	58
6.4 DURETE	62
6.5 MICROSCOPE OPTIQUE	63
CHAP 7: RESULTATS ET INTERPRETATIONS	64
PROPOSITION DE T.P	82
CONCLUSION	89

L'UTILITE DES TRAITEMENTS THERMIQUES POUR LES MECANICIENS

La réalisation d'une pièce mécanique nécessite la mise en oeuvre des moyens de fabrication qui doivent permettre l'obtention:

- D'une forme et de dimension adaptée au problème mécanique
- De caractéristique suffisante sur le matériau utilisé afin que la pièce résiste aux sollicitations qu'impose les conditions de service.

La forme et les dimensions de la pièce peuvent être réalisées par des opérations mécaniques de mise en forme: usinage, forgeage... et les résultats de ce travail peuvent être appréciés par des mesures dimensionnelles: cotes, rugosité...

Les caractéristiques d'utilisation dépendent de la structure métallique, celle-ci est obtenue en combinant judicieusement un matériau et un traitement.

D'un point de vue métallurgique, on peut définir, pour un matériau donné, le traitement thermique comme un moyen de fabrication de "l'aspect intérieur" du cœur même de la pièce par opposition aux autres moyens de fabrication qui s'attache à son aspect purement géométrique.

~~8~~¹ Dun point de vue mecanique, on retiendra qu'au travers de cette notion de structure, le traitement thermique est un moyen de fabrication des caractéristiques mecaniques.

En tant que pourvoyeur de caractéristiques mecaniques, le traitement thermique intervient:

.Au niveau de la conception pour le choix d'une solution acier -traitement thermique permettant de donner les caractéristiques d'emploi à la piece mecanique.

.Au cour de la fabrication comme moyen pour faciliter la mise en forme de piece (traitement pour usinage, deformation à froid).

INTRODUCTION

Les propriétés d'un matériau métallique, que se soit un métal pur ou un alliage, dépendent dans une large mesure des transformations de tout ordre que celui-ci a subit antérieurement ; mais la plupart des transformations qui se produisent s'accompagnent d'une modification de la nature et éventuellement du nombre des phases en présence .

Pour comprendre l'ensemble des phénomènes il est nécessaire d'étudier la transformation de l'austénite en condition isotherme . En effet les structures de l'agrégat fer-cémentite sont variables suivant les conditions de refroidissement et la température à laquelle il a pris naissance .

Ainsi on a construit les diagrammes donnant l'évolution de la transformation en fonction du temps et de la température appelés T.T.T .

En combinant les courbes T.T.T et T.R.C (transformation en refroidissement continu) on peut choisir la nuance de l'acier et le traitement thermique approprié pour obtenir les caractéristiques mécaniques désirées . D'où l'importance de tracer ces deux courbes pour chaque nuance d'acier .

Dans ce projet on a résumé l'étude d'un diagramme T.T.T d'un acier de composition :

C : 0,8 % ; Mn : 0,7 % ; Si : 0,33 %

I.1 HISTORIQUE

Dés le début du XVIII siècle ,l'étude de la trempe, revenue,cémentation,nitruration des aciers et recuit des fontes blanches était connue grace à d'importantes recherches entreprit par REAUMUR .

Il fallait attendre jusqu'à 1930 pour que l'étude des traitements isothermes soit entreprit . C'est au cours de cette année que DAVENPORT et BAIN

commencèrent leur travaux sur l'étude de la trempe isotherme et sa pratique sur les aciers de constructions.

I.2 BUT DE L'ETUDE D'UN DIAGRAMME T.T.T

L'étude de la décomposition de l'austénite en condition isotherme avait permis une bonne compression des phénomènes de trempes et de recuit, mais ne donnait qu'une vue globale de la question, en particulier les connaissances sur la nature même des constituants étaient assez confuses en raison due de la superposition ,à la suite de refroidissement de plusieurs constituants .Les structures de l'agrégat fer-cémentite sont en effet variable suivant les conditions de refroidissement et la température à laquelle il a pris naissance . C'est les études

en "condition isotherme" qui ont permis de mieux comprendre l'ensemble des phénomènes et de connaître avec plus de précision la structure des divers constituants.

C'est en effet le seul moyen de dissocier les deux facteurs, durée et température, dont les actions respectives se superposent et se masquent au cours du refroidissement, ainsi on peut étudier séparément, l'influence des facteurs temps et température sur les transformations de l'austenite.

1.3 PRINCIPE DE L'ETUDE D'UN DIAGRAMME T.T.T

Un échantillon de faible dimension, austenisé à (A_s, T_a) est refroidit très rapidement dans un bain de trempe à température $T_i < (A_c)$. Ce refroidissement quasi-instantané ne permet pas aux transformations de se produire selon le diagramme de phase et conduit l'austenite à évoluer dans des conditions "hors d'équilibre". On étudie, lors du maintien à T_i , cette évolution qualitative et quantitative de la phase austenitique en fonction du temps.

Les techniques micrographiques, l'analyse dilatométrique, l'analyse thermique et magnétique permettent de caractériser les constituants formes

(nature, microstructure, fraction volumique) pour chaque température de maintien .

Nous obtenons ainsi les courbes de transformation en condition isotherme de l'austénite de l'acier étudié.

I.4 COURBE T.T.T

Ces courbes ainsi obtenues sont appelées T.T.T .
Ils résument l'étude de la transformation austénite vers un produit M sur un système de coordonnées où sont portés : .

En abscisse le temps à l'échelle logarithmique
En ordonnée la température

Sur le diagramme tracé nous trouvons :

A gauche de la courbe de gauche un domaine de stabilité relative de l'austénite .

A droite de la courbe de droite un produit M dépendant de la température considérée .

Entre ces deux courbes une certaine fraction de masse d'austénite qui s'est transformée en produit M .

2.I DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CARBONE

La connaissance du diagramme d'équilibre fer-carbone ou diagramme de ROZEMBOOM est indispensable à la compréhension des phénomènes intervenant dans la métallurgie du fer .

Deux diagrammes (le diagramme des états métastables, et celui des états stables) sont en générale superposés . Seul le premier est à considérer dans l'étude des aciers et de certaines fontes ; le second rend compte des phénomènes dans le domaine des fontes à graphites .

Dans le cas des diagramme métastable on considère l'équilibre fer-carbure de fer Fe_3C

Dans le cas du diagramme stable , on considère l'équilibre fer-carbure .

2.3 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGES

Les éléments d'alliages influent sur le processus de la décomposition de l'austénite ainsi que sur les lignes qui séparent les domaines de stabilité des différentes phases dans le diagramme d'équilibre.

Les éléments dits ALPHAGENES (Cr; Mo; W; V; Ti; Si; Al) élargissent le domaine de stabilité de la ferrite en élevant la température A_c et en abaissant la température A_c

Les éléments dits GAMAGENES (Ni; Mn; Co; Cu; N) élargissent le domaine de stabilité de l'austénite en abaissant les lignes de début A et de fin A de la décomposition de l'austénite .

3.1 CINÉTIQUE GLOBALE ISOTHERME

L'étude de l'évolution isotherme d'un alliage hors d'équilibre appelé à être le siège d'une transformation par germination et croissance, conduit généralement à une courbe transformation-temps de forme sigmoïde telle que la figure suivante :

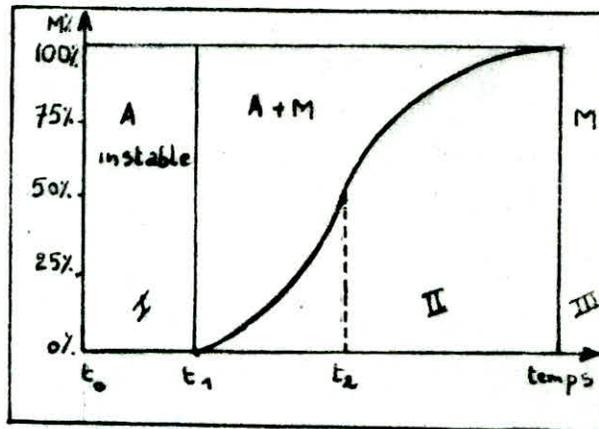


FIG. Cinétique de transformation

On peut distinguer dans cette courbe trois régions correspondant à trois stades distincts de la transformation .

A) PERIODE PREPARATOIRE OU D'INCUBATION

De l'instant t_0 à t_1 aucun indice de transformation n'est perceptible . Cette période tend à disparaître lorsqu'on opère la transformation isotherme dans des conditions où la vitesse est élevée .

b) PERIODE D'ACCELERATION OU RAPIDE

A partir de l'instant T1 la réaction s'amorce et le taux de transformation s'accélère en fonction du temps .

c) PERIODE DE DECELERATION OU RALENTIT .

Au delà de l'instant T2 ,pour lequel la courbe possède un point d'inflexion qui lui impose son allure général ,la vitesse de la réaction se ralentit .

L'achevement de la transformation peut exiger de très long délais .Au température peu élevé ,il est souvent impossible de l'austénite dans un temps résonable ,et le système rète quasi indéfiniment dans un état hors d'équilibre .

3.2 LES DEUX CLASSES DE TRANSFORMATION DE L'AUSTENITE EN CONDITION ISOTHRME

3.2.I TRANSFORMATION AVEC DIFFUSION

3.2.I.I GERMINATION ET CROISSANCE

La transformation où la diffusion intervient **est** dites aussi transformation par germination et croissance .

A) GERMINATION

La transformation s'amorce en de nombreux points appelés germes . La germination consiste à un déplacement simultané d'un petit nombre d'atome -ordre de 100 à 1000- qui grace à l'agitation thermique permet la configuration de la nouvelle phase .

Pour expliquer le mécanisme de la germination on a supposé que des atomes contenus dans un certain volume sont l'objet de fluctuation coopérative qui conduit à la formation du réseau qui définit la nouvelle phase . La phase mère a une composition chimique et une structure cristalline identique en tous ses points .

La naissance des germes de nouvelle phase implique la création d'interface, dont l'énergie est très importante par rapport à l'énergie d'activation . Les germes ne sont stables que lorsqu'ils sont atteint un volume critique suffisant pour que la diminution de l'énergie associée compense l'énergie d'interface .

En fait, la germination est hétérogène, elle se produit au voisinage des imperfections du métal tel que joint inter cristallin, dislocation isolées, défauts d'empilement car la diffusion est relativement rapide .

En effet le niveau d'énergie en jeu pour provoquer l'apparition d'une nouvelle phase est moindre et se traduit par la diminution de la taille critique des germes .

B) CROISSANCE

La croissance des germes stables se fait par transfert de haute énergie du réseau de la phase mère vers la nouvelle phase .

La croissance des germes produit plus lentement que la germination car elle nécessite une migration atomique importante . Elle fait intervenir divers facteurs dont l'influence relative n'est pas déterminé .

3.2.I.2 DOMAINE DE LA TRANSFORMATION avec diffusion .

Lorsque la température de naitient θ est comprise entre celle du point MCI ~~et~~ celle du point M_s les transformations isothermes de l'austénite conduisent à la la formation d'agrégats ferrite carbures . $A_{66} \rightarrow F+C$ mettant donc en jeu des phénomènes de diffusions qui regissent la cinétique de ce type de transformation .

Tant que θ_i est supérieur à celle du point M_s cette cinétique est gouverne par:/

la tendance γ (CFC) \rightarrow α (CC) d'autant plus

grande qu'on s'éloigne de AI .

La tendance à la formation corrélative de carbures d'autant plus difficile que θ_1 est plus basse (diminution des vitesses de diffusion du carbone et des éléments alliés) .

En fait dans cette classe de transformation avec diffusion (A---- F+C) , on a mis deux types distincts correspondant à deux mécanismes différents de formation de l'agrégat ferrite - carbure (F+C)

3.2.1.3 TRANSFORMATION PERLITIQUE

A) NATURE DE LA PERLITE

La transformation de l'austénite 0,85% donne la perlite , constituée de bandes alternées de ferrite et de cémentite .

La formation de la perlite résulte de la croissance simultanée de lamelle alternée des deux phases .

L'espacement interlamellaire est caractéristique de la température et il ^{se} croit quand la température s'abaisse .

La naissance des lamelles nécessitant la diffusion du carbone vers la cémentite , la transformation se produit seulement dans la région adjacente à l'interface mobile .

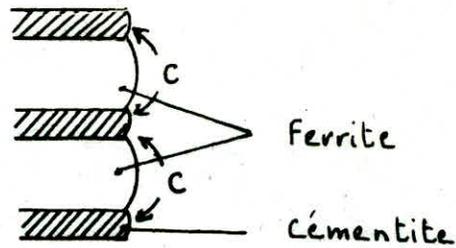


FIG: redistribution du carbone lors de la formation de la perlite

B) TRANSFORMATION PERLITIQUE Ar'

Elle intervient pour les températures élevées du domaine des transformations isothermes de l'austénite.

L'agregat (F+C) formé est du type lamellaire. La phase nucleante est le carbure.

On observe d'abord la perlite lamellaire dont la distance interlamellaire décroît avec la température de formation. En même temps ; les lamelles ont tendance à rayonner à partir d'un centre et à prendre une structure en éventail, on arrive ainsi progressivement à la "TROUSTITE" formée de nodules dont l'espace interlamellaire est inférieur au pouvoir séparateur des microscopes optiques ordinaires et qui comprennent

à la fois des lamelles rayonnantes et des lamelles parallèles aux précédentes et limitées par celle -ci cette structurement révélée par l'emploi de l'ultra - violet . Puis la structure prend l'aspect d'un agrégat de ferrite et de carbures sphéroïdaux ou aciculaires .

REMARQUE :

les structures lamellaires de la forme eutectoïde sont définie souvent comme :

perlite - sorbite - troostite
ou perlite grossiere - moyenne - fine .

B) PROPRIETES MECANQUES DE L'ACIER AU STRUCTURES
PERLITIQUES

La dureté et la résistance de ces aciers sont proportionnelles à l'épaisseur des lamelles C.à.d à l'étendue de l'interface ferrite -cementite . C'est pourquoi une dispersion accrue de la structure ferrite -cementite ,C.à.d la baisse de la température de sa décomposition augmente la dureté ,la charge de rupture ,les limites d'élasticités et de fatigue .

3.2.I.4 TRANSFORMATION BAINITIQUE

A) NATURE ET MECANISME DE LA TRANSFORMATION BAINITIQUE

Au fur et à mesure que θ s'abaisse , la diffusion éléments alliés en substitution devient plus difficile et la transformation perlitique est progressivement remplacée par une nouvelle transformation dite "bainitique " .

Dans la transformation bainitique la phase nucléante est la ferrite .

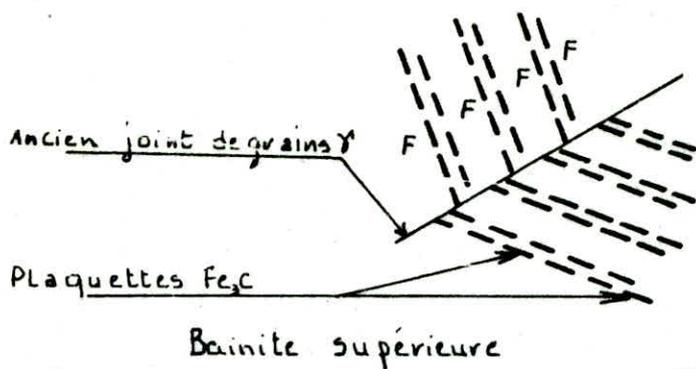
Les carbures (C) formés sont essentiellement des carbures de fer , le carbone étant le seul élément ayant un coefficient de diffusion suffisamment élevé .

L'aspect macrographique de la bainite se modifie graduellement avec la température .

On distingue deux types principaux de bainite selon que la température est supérieur ou inférieur à 350°C .

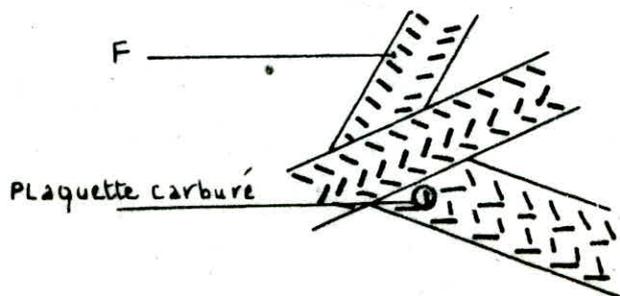
.Bainite supérieur :

Dans la zone Supérieur du domaine bainitique la ferrite formée est en "lattes " , les plaquettes de carbures de fer précipitent entre ces lattes à peu près parrallelement à elle .



BAINITE INFÉRIEUR

Dans la zone inférieure du domaine bainitique, la ferrite formée est de plus en plus aciculaire. La température étant relativement basse, la diffusion du carbone devient à son tour difficile de ce fait les aiguilles de ferrite sont sursaturées en carbone au moment de leur formation.



B) PROPRIETES MECANQUES DE UN ACIER A STRUCTURE BAINITIQUE

Les structures bainitiques sont très recherchées pour leur propriétés mécaniques .

La bainite des aciers présente en effet une résistance mécanique excellente ,alliés à une bonne ductilité . Ainsi pour la bainite supérieure : la plasticité est réduite par rapport aux aciers perlitiques ,mais la dureté et résistance ne change pas ou diminue légèrement .

Pour la bainite inférieure : la résistance ; la dureté et la plasticité sont légèrement améliorés par rapport aux aciers perlitiques

3.2.1.5 RESUME .

. Il existe donc trois (3) catégories de transformation en condition isotherme donnant trois (3) types d'agrégats F+C de microstructure différentes .

. Pour les aciers hypo-eutectoïdes on peut délimiter ainsi très approximativement les trois (3) domaines :

A ---- P 723°C à 600°C

A ---- Bsupérieur 600°C à 400°C

A ---- Binferieur à en dessous de Ms

La formation perlitique débute par germination de cristaux de cémentites ,alors que les germes de la transformation bainitique sont constitués par la ferrite .

3.2.2 TRANSFORMATION SANS DIFFUSION

3.2.2.I DOMAINE DE TRANSFORMATION SANS DIFFUSION

Lorsque la température est inférieure à celle du point Ms (caractéristique de la nuance et des conditions d'austénisations) la transformation de l'austénite prend un caractère très différent en donnant naissance à un constituant particulier "la martensite" .

3.2.2.2 TRANSFORMATION MARTENSITIQUE

A) NATURE DE LA MARTENSITE

STRUCTURE CRISTALLOGRAPHIQUE DE LA MARTENSITE

La martensite a un réseau quadratique centre que l'on peut décrire par une déformation du réseau CC de la ferrite . La déformation est exprimée par le rapport c/a des paramètres du réseau quadratique .

Dans l'austénite , le carbone est en insertion dans les lacunes octaédriques du réseau CFC et chaque atome de carbone est entouré de 6 (six) atomes de fer .

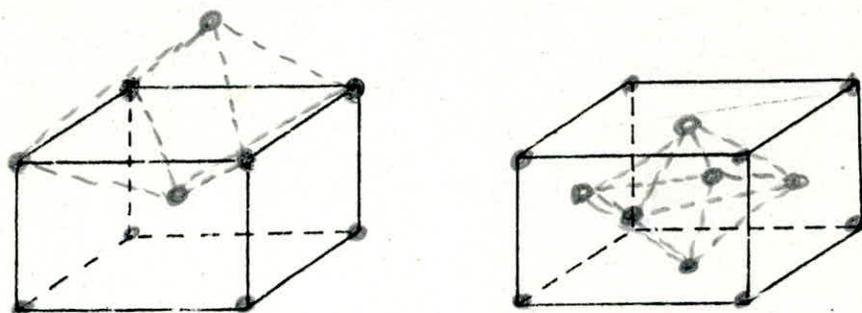
Dans la martensite , le voisinage est analogue . On peut donc décrire la transformation martensitique comme une contraction de $3,56\text{Å}$ à $2,86\text{Å}$ de la diagonale de l'octaèdre austénitique accompagnée d'une expansion de $2,66\text{Å}$ à $2,86\text{Å}$ du côté du carré normal à la diagonale précédente . Cette transformation dans laquelle il n'y'a pas d'échange de position des atomes les uns par rapport aux autres , voit les faces de l'octaèdre austénitique (plan III) devenir les faces de l'octaèdre martensitique (plan IIO) ; la conservation de ces plans constitue la relation d'orientation de la transformation martensitique

des aciers aux carbones . On l'écrit :

$$(III) // (IIO)$$

Cette description de la transformation permet de placer les sites du carbone dans la martensite

au milieu des arêtes parallèles à C et au centre des faces perpendiculaires à C . Ces positions justifient la déformation au cube dans la direction C .



STRUCTURE MICROGRAPHIQUE DE LA MARTENSITE

La martensite se présente sous forme d'aiguilles ou de lentilles dont l'orientation dans chaque grain d'austénite est imposée par l'orientation de la matrice . Dans un même grain d'austénite on observe des aiguilles de différentes orientations qui font entre elles un angle imposé par la relation d'orientation avec l'austénite .

Généralement les aiguilles apparaissent en blanc sur un fond gris clair d'austénite . Si le polissage provoque un échauffement suffisant , les carbures précipitent dans les aiguilles martensitiques et le contraste est inverse .

AUSTENITE RESIDUELLE

La transformation martensitique est un véritable cisaillement qui affecte instantanément toute une fraction d'austénite. Elle se produit avec une augmentation de volume qui est à l'origine de compressions considérables qui stabilisent l'austénite ; il faut abaisser la température pour produire la transformation martensitique d'une nouvelle fraction austénitique.

L'effet de stabilisation de l'austénite par la martensite et en conséquence la fraction austénitique résiduelle sont d'autant plus importants que la teneur en carbone est plus élevée.

CARRACTERISTIQUE DE LA TRANSFORMATION MARTENSITIQUE

En dessous de M_s la diffusion du carbone n'intervient plus et la transformation martensitique est une transformation sans diffusion.

Cette transformation a lieu seulement lorsqu'un refroidissement rapide produit la **surfusion** de l'austénite jusqu'à basse température qui rend impossible la diffusion. La transformation martensitique est caractérisée par l'absence d'influence du facteur temps sur la **proportion** d'austénite transformée, proportion qui est uniquement fonction de la température.

-INFLUENCE DE LA TENEUR EN CARBONE

La teneur en carbone se manifeste de divers façon sur la transformation martensitique :

+parametre de la martensite :

Le parametre C croit et le parametre A décroit lorsque la teneur en carbone croit. Ces variations se traduisent par une croissance linéaire du rapport C/A qui reste toujours inferieur à 11 .

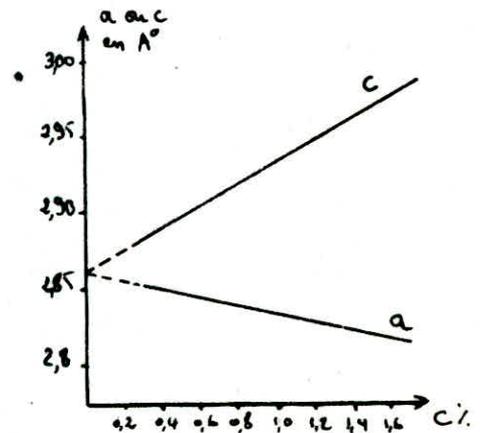


FIG: Variation des parametres a et c de la maille martensite en fonction de cart

+température Ms et Mf

Lorsqu'on refroidit l'austenite la martensite apparait a partir de Ms ,la température du début de transformation, et s'acheve à Mf ,température de fin de transformation martensitique .

Les température Ms et Mf décroissent lorsque la teneur en carbone augmente .

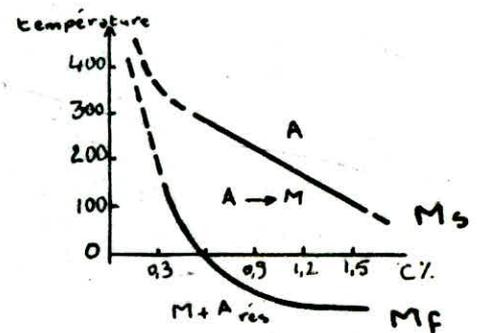


FIG: Température des points martensitiques Ms et Mf

4.1 NOTION SUR LE TRACE DES COURBE T.T.T

Lorsqu'après avoir chauffé un échantillon d'acier à une température telle qu'il soit à l'état austénitique (température d'austénisation) nous l'émergeons et le maintenons dans un bain à température constante, inférieure au point ACI (chaque échantillon est suffisamment petit pour que l'on puisse considérer son refroidissement jusqu'à 0 comme instantané) ; nous pouvons constater que l'austénite se transforme avec une certaine vitesse qui dépend de la température du bain et de la composition de l'acier, pour un acier donné, la nature du produit de la décomposition dépend elle-même de la température.

Divers méthodes ont été utilisées pour analyser ces phénomènes.

4.1.1 METHODES DISCONTINUES

4.1.1.1 MICROGRAPHIE

Pour chaque température de maintien, une série d'échantillons qui ont été maintenus dans le bain, pendant des temps croissants puis à la sortie du bain immergés dans l'eau de manière à transformer

en martensite toute l'austénite non décomposée pendant le maintien . Chaque échantillon est alors constitué par un mélange de mélange de martensite et du produit de décomposition ,ce dernier étant en proportion croissante lorsque le maintien dans le bain est plus long .

Un examen micrographique dont lequel la martensite se distingue aisément parcequ'elle est moins colorée par les réactifs ;permet à la fois de reconnaître la nature du constituant formé et l'avancement de la décomposition .

Ce procédé est particulièrement commode pour déceler le début T_i et la fin T_f de la transformation .

T_i est déterminé par l'échantillon où apparaissent les traces du constituant isotherme .

T_f est la durée minimal pour laquelle le métal final ne présente plus de martensite .

REMARQUE :

L'examen micrographique peut utilement être complété par des mesures de dureté .

On met ainsi facilement en évidence le début et la fin de la transformation ,sans pouvoir cependant suivre le cours de la décomposition de l'austénite avec assez de précision ?

4.I.I.2 RADIOCRISTALLOGRAPHIE

Toute phase cristallise à un diagramme DEBYE-SHERRER détermine (pour une valeur de R donnée) .L'examen du diagramme relatif à un certain échantillon permet donc en principe d'identifier les phases ,même si on ne peut pas interpréter le diagramme .

Dans le cas d'une substance à deux ou plusieurs phases chacune d'entre elles donne son diagramme caractéristique propre .Donc si dans un diagramme ,on trouve les raies caractéristiques d'une phase A ,on peut affirmer que le produit analysé contient la phase A .

4.I.I.3 ESSAI DE DURETE

Les essais de dureté faitent sur des échantillons traités comme pour la micrographie mettent en évidence le début et la fin de transformation ;ces points correspondant à des variations brusque de la courbe $H_v = F(t)$.

Le tracé complet des courbes nécessite d'opérer à des températures échellonnées de 50 en 50°C .

4.1.2 METHODES CONTINUES

4.1.2.1 ANALYSE THERMOMAGNETIQUE

Cette méthode consiste à déterminer la variation du magnétisme en fonction du temps pendant le maintien isotherme .

L'austénite étant amagnétique et ses produits de décomposition tous ferro-magnétique ,le magnétisme croît à mesure de cette décomposition .

La détermination de la force qu'exerce sur l'éprouvette un champ magnétique donné peut servir à évoluer la proportion de l'austénite restant à chaque instant .

On a ainsi la possibilité de tracer directement la courbe -austénite décomposé - temps - et d'analyser exactement le phénomène .

Par contre cette méthode est peu favorable à l'étude de la nature et de la structure des produits de décomposition

4.1.2.2 DILATOMETRIE

Un ~~four~~ premier four sert au chauffage de l'éprouvette jusqu'à la température d'austénisation, il est éscamoté et remplacé par un second, généralement un bain métallique, qui assure le maintien isotherme. La variation de longueur de l'éprouvette en fonction du temps est enregistrée pendant ce maintien — on admet que cette variation est proportionnelle à la quantité d'austénite transformé — ce qui permet de tracer la courbe de transformation en fonction du temps à chaque température.

Differentes précautions doivent être prises pour parer à l'inertie thermique de l'éprouvette et pour assurer une parfaite transmission des dilatations.

Malgré ces réserves cette méthode est la plus employé !

4.2 FACTEURS INFLUENÇANT LA COURBE T.T.T

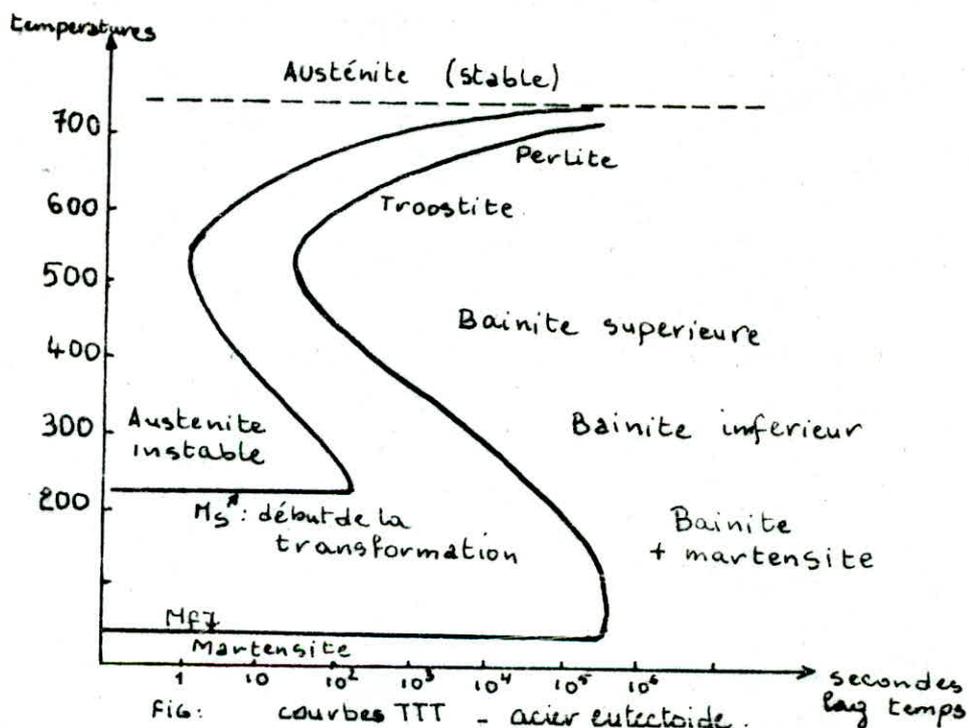
4.2.1 INFLUENCE DE LA TENEUR EN CARBONE

La composition chimique est le principal facteur influençant. C'est ainsi qu'une diminution ou une augmentation du carbone par rapport à la teneur

eutectoïde déplace les courbes vers la gauche

4.2.1.I CAS DE L'ACIER EUTECTOÏDE

Le diagramme le plus simple est relatif à l'acier au carbone eutectoïde .



La partie supérieure les lignes sont asymptote à l'horizontale A_1 , au fur et à mesure que la température s'abaisse à partir de A_1 , l'éloignement de la température d'équilibre provoque l'augmentation de la vitesse de transformation, mais la transformation se ralentit, l'influence de ces deux facteurs antagonistes est telle que la durée d'incubation de la transformation perlitique passe par un minimum (de l'ordre de la seconde vers 550°C)

..U niveau de ce minimum (appelé NEZ) ,de la courbe et à température légèrement inférieure l'austénite se transforme en troostite .

.A température légèrement inférieure en est en présence de transformation bainitique .

.La région inférieure du diagramme comporte des horizontales dont la plus élevée correspond au début de transformation A_r'''' .

.Le maintien du métal à une température inférieure à M_s n'amène pas de transformation martensitique, toutefois un séjour suffisamment prolongé peut amener une transformation BAINITIQUE de l'austénite non transformée ,c'est pourquoi les lignes de transformation du domaine bainitique devraient figurer dans le domaine martensitique .

4.2.I.2 CAS DE L'ACIER AU CARBONE NON EUTECTOÏDE

Le diagramme est plus complexe ,car la formation de perlite est précédée à haute température de la précipitation de ferrite (acier hypo-eutectoïde) ou de cémentite (acier hyper -eutectoïde)

il y'a donc une ligne oblique supplémentaire qui délimite un domaine austénite +(ferrite ou cémentite) d'autant plus vaste que la teneur du carbone s'éloigne d'avantage de 0,85% cette ligne étant

plus élevé .

b) Seul le cobalt déplace la courbe vers la gauche .

c) Les éléments N et Mn ne changent pas l'aspect général du diagramme

d) Les éléments CARBURIGENES (Cr, Mo, V, W) provoquent la formation d'une seconde zone distincte de température à transformation rapide correspondant à la transformation: austénite---bainite

e) Les domaines perlitiques sont plus ou moins nettement séparés et sont repoussés par fois très inégalement

ex: Mo repousse surtout le domaine perlitique

Cr influe sur le domaine bainitique

f) Dans le cas d'un acier à carbure fortement allié ,les deux neufs peuvent être séparés par une zone de très grande stabilité de l'austénite entre 400°C et 600°C

C'est le cas de l'acier rapide à:

18%W ; 4%Cr; 1%V pour lequel le maintien de 100h vers 500°C n'amène aucune transformation .

g) Les horizontales A1 et A3 sont élevées par les éléments ALPHAGENES et abaissées par les

4.2.2 INFLUENCE DES ELEMENT D'ALLIAGE

4.C.2.1 INFLUENCE DES ELEMENT D'ALLIAGE SUR LES ACIERS

On ajoute habituellement à l'acier des éléments d'alliages pour ralentir ou supprimer la transformation de l'austénite en perlite ou en bainite .

C'est ainsi ,par exemple ,que la martensite peut se former à l'intérieur d'une grosse pièce même si le refroidissement n'est pas très rapide . On peut également conserver l'austénite à la température d'utilisation de l'acier .

Les éléments d'addition ~~usuels~~ peuvent modifier :

.Les conditions d'équilibre

ou

.La cinétique de la transformation

Les courbes T.T.T. montrent l'importance de l'effet des éléments d'alliages

4.2.2.2 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGES SUR LES COURBES T.T.T

a) Les éléments d'additions amènent un fort déplacement des courbes vers la droite ,d'autant plus marqué que la teneur en carbone en est

éléments gammagènes .

h) La température M_s s'abaisse avec la teneur en éléments d'additions .

pour les aciers faiblement alliés elle peut être calculé par :

$$M_s(^{\circ}C) = 539 - 423(\% C) - 30(\% Mn) - 18(\% Ni) - 12(\% Cr) - 7,5(\% Mo)$$

i) La température M_f est inférieure de l'ordre de $220^{\circ}C$ à M_s .

4.2.3 INFLUENCE DES CONDITIONS D'AUSTENISATION

Les conditions d'austénisations (θ_a , t_a) peuvent influencer la composition chimique, l'homogénéité de A initial et la grosseur moyenne G_a du grain austénitique obtenue .

De manière générale l'augmentation de la grosseur du grain austénitique conduit à une augmentation des temps d'incubations .

Cet effet s'explique en rappelant que les sites de germinations préférentielles sont les joints de grains de l'austénite pour les transformations $A \rightarrow F+C$

L'augmentation de la taille du grain conduit à une diminution de leur nombre ; l'importance

des joints de grains ,donc le nombre des sites de germination ,diminu aussi .

L'effet est surtout sensible pour le domaine perlitique ,moin marqué pour le domaine bainitique .

La taille du grain a une influence négligeable sur la position du point Ms .

A titre d'exemple :

pour XC38 l'effet est le suivant

$a=850^{\circ}\text{c}$; $T_a=1\text{h}$ ---- $G_a=10$, $T_{o_p}) = 5\text{s}$ à 600°c

$a=1500^{\circ}\text{c}$; $T_a=30\text{ Min}$ ---- $G_a=1$, $T_{o_p}) = 20\text{s}$ à 600°c

TRAITEMENT ISOTHERME

5.I INTRODUCTION

Les études de transformation de l'austénite ont conduit à de nouveaux types de traitements thermiques, qui comportent au lieu d'un refroidissement continu dans la trempe classique.

La trempe isotherme qu'on appelle aussi trempe étagé ou encore trempe arrêté consiste, après avoir chauffé l'acier à une température suffisante, supérieure au point de transformation (température d'austénisation) à le refroidir dans un bain porté à une température supérieure à l'ambiante, comprise entre 200°C et 600°C et l'y maintenir pendant un certain temps, après quoi le refroidissement s'opère à l'air ou à l'eau.

Ce mode de traitement n'est pas nouveau car en le pratique depuis longtemps sous le nom de "PATENTAGE" pour le traitement thermique des fils en acier dur au carbone en vue de faciliter l'étirage et le tréfilage.

Les propriétés mécaniques conférées à l'acier par la trempe isotherme sont différentes de celle qui donne la trempe ordinaire suivie d'un revenu.

Examinons les trois types principaux de traitements thermiques

5.2 TREMPE ETAGEE MARTENSITIQUE (martempering)

La pièce préalablement chauffée à la température d'austénisation est plongée dans un bain de sel à la température légèrement supérieur à M_s pendant un certain temps .

Le refroidissement doit être suffisamment rapide pour que l'acier reste intégralement à l'état austénitique . Ce qui limite ce traitement à des pièces de faibles dimensions et à des nuances dont les temps d'incubations minimaux C.à.d les nez de la courbe sont suffisamment élevés .

Lorsque la température est devenue homogène dans toute la pièce - mais le temps ne doit pas être trop long afin d'éviter le risque d'un début de transformation bainitique - le métal est alors extrait du bain et refroidie lentement jusqu'à la température ambiante (généralement à l'air) . cependant que se forme la martensite .

L'avantage de ce procédé est d'abord de réduire les gradients de température dans le métal avant la transformation martensitique et surtout ;

la transformation martensitique s'effectue a peu près régulièrement dans la pièce ,parcequ'elle commence alors que la température est uniforme et parceque l'écart de température entre centre et périphérique de la pièce ne peut jamais être bien grand lors du refroidissement après la sortie du bain .

Les contraintes propres sont donc diminuées ainsi que les risques de déformations des pièces et de tapures de trempes en plus de la limitation des massivetés des pièces traitables ,les caractéristiques mécaniques après revenu sont légèrement inférieure à celle obtenues par trempe classiques et revenu .

Ce traitement peut attribué au métal des propriétés différentes de celle obtenue avec les traitements classiques . C.à.d les aciers martensitiques ainsi obtenue sont presque aussi durs que ceux qu'on obtient par trempe ordinaire mais moins fragiles ,plus tenaces et s'applique aussi aux pièces cémentées .

Ce traitement s'emploie entre autre ,pour :
les engrenages ; les roulements à billes ;
et les outils à coupe continue (tournage)

5.3 TREMPE ETAGÉE BAINITIQUE (AUSTEMPERING)

La trempe étagée bainitique s'opère comme la méthode précédente mais à température comprise entre 450 à Ms et l'acier est ici maintenu dans le bain pendant plusieurs heures ; l'austénite se décompose en bainite soit totalement ou partiellement . Dans ce dernier cas on interrompt la trempe bainitique et un refroidissement ultérieur à l'air transforme l'austénite en réstante en martensite . la constitution résultante est un mélange (bainite + martensite) .

Dans le premier cas la transformation bainitique ait lieu totalement .

Suivant l'ordre de la température, on obtiendra deux types de la bainite . La bainite supérieur ou la bainite inférieur .(voir la courbe T.T.T)

Pour ce traitement on cherche à obtenir une structure aussi proche que possible de la martensite, mais exempte de ces inconveniant .

Les contraintes propres sont plus faibles que dans le procédé précédent , les duretés moins élevées qu'avec la trempe martensitique , mais elle procure aux pièces de meilleurs qualités de résilience ; de ductilité ; de flexibilité ; de

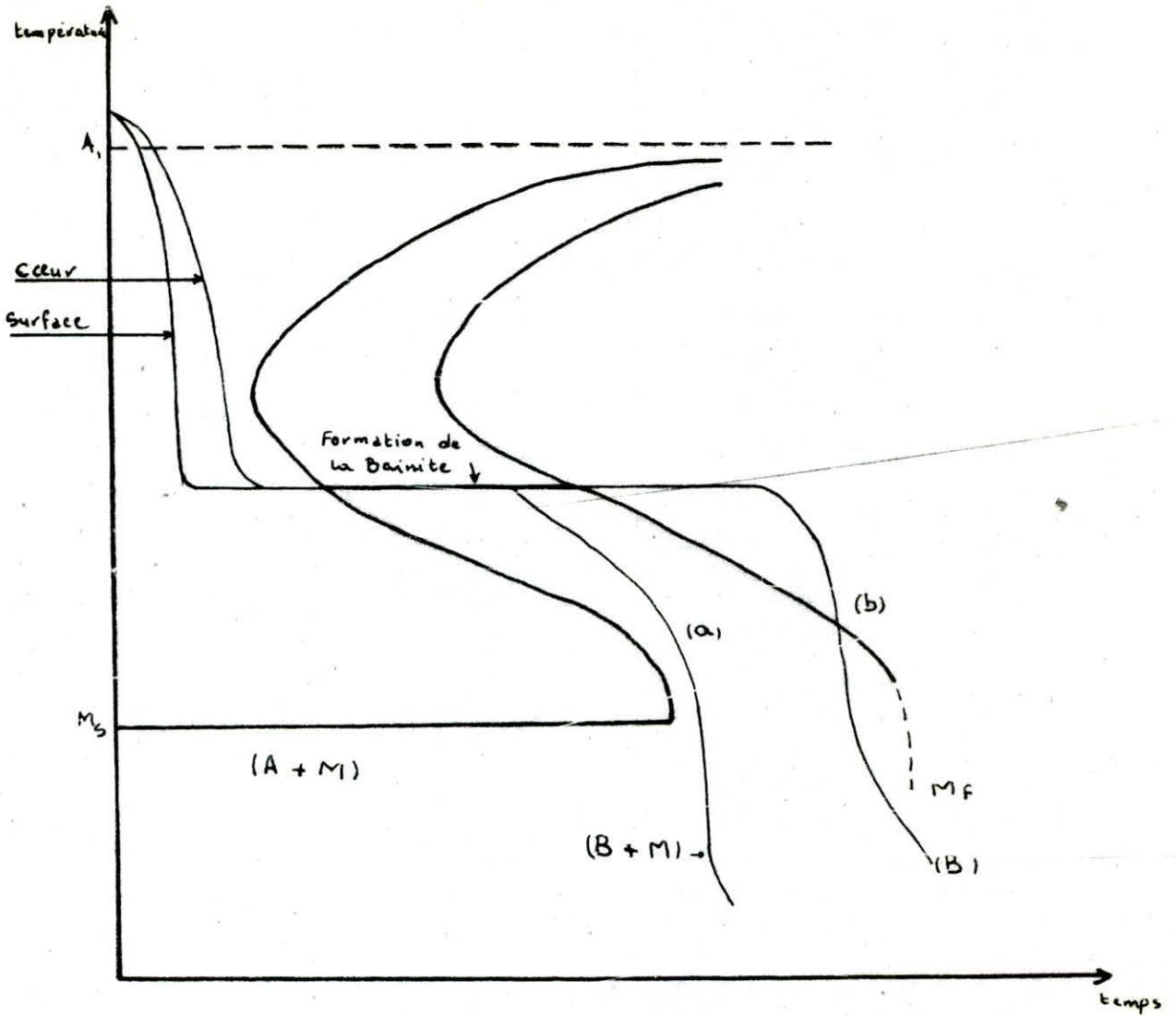


Fig:
 trempe étagée bainitique (a) - Mixte
 (b) - totale

résistance à l'usure et l'allongement ainsi que moins de déformations .

5.4. RECUIT ISOTHERME

Dans ce cas l'acier est chauffé jusqu'à l'état d'austénisation et refroidit relativement vite est porté et maintenue à une température voisine de $A_c - 25$)

La durée de maintien isotherme d'une demi-heure environ telle que la transformation isotherme donne une constitution formée de perlite ; puis il est suivi d'un refroidissement quelconque car aucune transformation ne s'effectuera ensuite ; la courbe M_f ayant été franchie une fois . Cela étant , il n'est pas nécessaire de refroidir brusquement l'acier à la température de transformation choisie , mais il faut éviter un refroidissement pas trop lent jusqu'à cette température , car la séparation de ferrite pro-eutectoïde additionnelle aux températures supérieures à la température de recuit peut provoquer l'apparition d'une structure rubannée et nuire à l'usinabilité . Cela se produit surtout pour les aciers à faible teneur en carbone . Le recuit isotherme peut être de durée plus courte que le recuit classique .

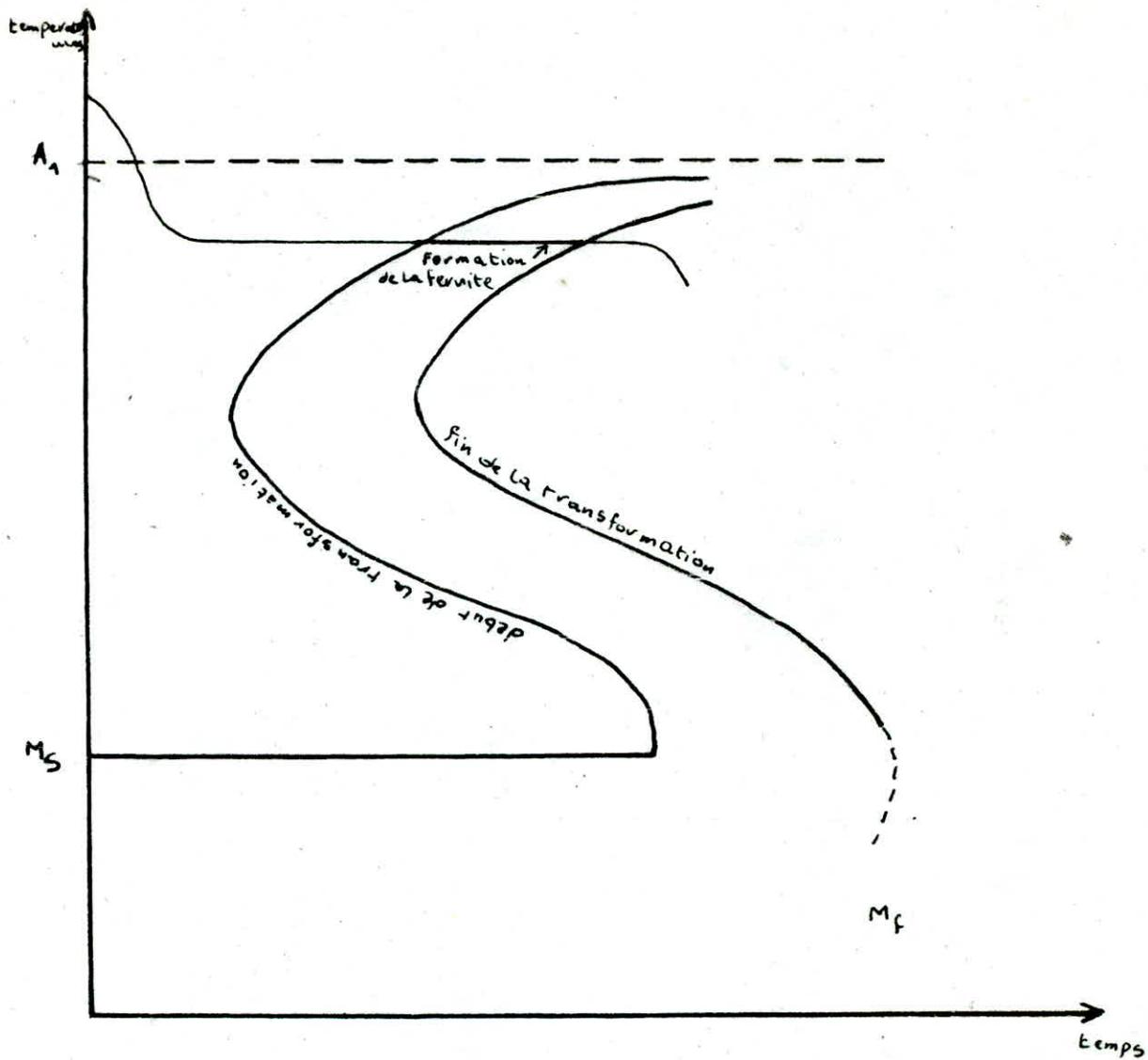


Fig:

- Recuit isotherme

Il est particulièrement intéressant pour les aciers autotrempeant qui nécessitent des vitesses de refroidissement extrêmement lents dans un recuit classique .

Le recuit isotherme est appliquée généralement dans le but d'adoucir suffisamment l'acier pour les opérations d'usinage et de formage à froid .

.Il permet d'obtenir une structure plus uniforme qu'avec un recuit classique et bien définie .

.Il est à noter que le choix de la température d'austénisation relativement basse (proche de AC3) favorise la formation de la perlite globulaire (structure à réaliser pour le tournage ; tandis qu'une température relativement élevée favorise l'obtention de la perlite lamellaire (structure habituellement choisie pour le fraisage ou le perçage , le brochage)

5.5 AUSTENITIFORMAGE

L'austenitiformage est une nouvelle méthode de traitement thermique de l'acier qui permet d'élever nettement les propriétés mécaniques par rapport à celle obtenue par trempe et revenu usuels ; et consiste en une déformation intense (forgeage , laminage) en phase austénitique .

On distingue deux modalités de ce traitement

L'austénitiformage à haute température ,l'acier est déformé à une température au dessus du point A (structure austénitique) le degré de déformation est de 20 à 30% . La déformation est suivie immédiatement d'une trempe pour frener le processus de recristallisation.

L'austénitiformage a basse température ,la déformation s'effectue dans le domaine d'austénite surfusionnée relativement stable (400°C à 600°C) la température de déformation doit être inférieure à la température de recristallisation et supérieure à la température Ms .Le degré de déformation 75 à 95% ,la trempe s'effectue directement après la déformation .

Il faut noter que l'austénitiformage nécessite des courbes T.T.T (cas des aciers alliés) où le domaine de transformation en perlite et en bainite sont séparés par une zone de très grande stabilité de l'austénite permettant la réalisation de la déformation

L'austénitiformage augmente considérablement la densité des dislocations dues à cet important

écrouissage conduisant ensuite à une structure
martensitique beaucoup plus fine .

L'austénitiformage tout en améliorant la résist-
ance augmente également la plasticité .

6.1 LE MATERIAU

L'influence des éléments d'alliages sur de l'acier sur le diagramme T.T.T n'est pas toujours prévisible . Souvent, pour une nuance donnée , de faible variation de composition modifie de façon notable l'allure des courbes de transformation . De même les traitements d'austénisation ou les traitements mécaniques préalables ont une incidence sur le diagramme .

Les échantillons étudiés ont été pris d'un ressort à boudin et se présentent sous forme de disques d'environ 3 mm d'épaisseur .

Après analyse de l'acier , nous avons trouvé que sa composition chimique est:

C : 0,80 %

Mn : 0,70 %

Si : 0,33 %

FOUR A BAIN LIQUIDE :

Les fours à bain liquides sont très utilisés dans la pratique moderne des traitements thermiques .

Ils sont constitués par un creuset en fonte ou en acier inoxydable soudé et embouti ,ou en graphite .
Le creuset peut être chauffé au coke ,au mazoute ,ou à l'électricité .

Les bains employés sont ,suivant les températures désirées .

Dans notre expérience on a utilisé un four à bain liquide de marque MEKBER de caractéristiques suivantes :

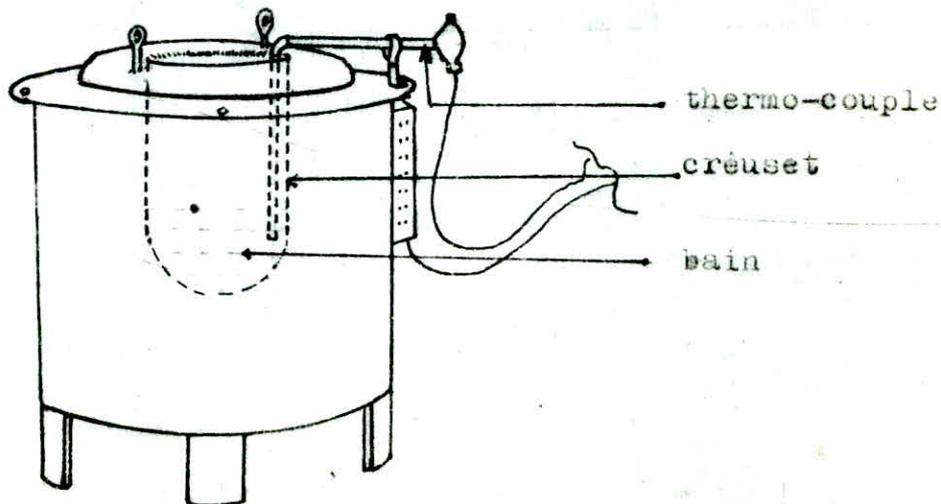
N° de phase : 3 ;

volts : 380 V

ampères : 15 A

puissance : 10 KW

température à ne pas dépasser : 600°C



BAIN DE SEL

On trouve sur le marché toutes les gammes de sels désirables ,notons simplement les qualités qu'ils doivent présenter :

- a) être entièrement soluble et lavable par simple passage dans l'eau chaude .
- b) être mélangeable sans danger et sans donner des produits d'additions ou de réaction lors du passage des pièces dans les différent bains (cas des aciers rapides ,passage dans cinq bains successifs)

.Les bains peuvent être neutres ou actifs vis-à-vis des pièces traités et servir de milieu de chauffage **ou** au contraire de refroidissement .

.Les bains peuvent être constitués par un ou plusieurs sels .

.La composition est choisie pour permettre de réaliser un bain fondu suffisamment fluide à la température visée afin que les échanges thermiques soient efficaces .

.Grace à l'utilisation de plusieurs sels ou de mélanges de sels ,il est possible de couvrir par cette technique un grand interval de température .

REMARQUE CONCERNANT LES SELS NEUTRES/

Lorsqu'ils sont neufs ou maintenu propre ,les bains neutres n'ont aucune affinité chimique avec l'acier

les pièces traités gardent sortent de ces bains sans oxydation ;ni piquures ,ni décarburation .

Toutefois ,après une période ,plus au moin longue de travail ,tous les bains neutres deviennent ~~alcalin~~ alcalins ,ce qui produit une décarburation de l'acier .

Les causes qui produisent ce changement de nature des bains sont généralement une combinaison des facteurs suivant :

a) surchauffe locales dues à une-chauffage défectueu .

b) utilisation du bain à une température supérieur à la température recommandé .

c) contamination du bain avec des substances alcalins (ordinairement dans le bains par les pièces)

d) contamination par le soufre contenu dans la plupart des huils de coupe et entraînées dans le bain par des pièces mal nettoyées .

Les effets de l'alcalinât ee ainsi formée et du soufre introduit dans le bains peuvent être corrigés et élimines par un éssai périodique du

bain suivi d'addition de réctifieur appropriés .

Le L'action de ces réctifieurs est la suivante:

- a) Ils procurent un control chimique positif de la neutralité du bain par la neutralisation de l'alcalinité .
- b) Ils séparent du bain les oxydes métalliques qui précipitent .

COMPOSITION DES SELS UTILISES POUR LE TRAITEMENT THERMIQUE

POURCENTAGE EN MASSE

Nacl	Kcl	Bacl	Cacl	NaNO	NaN0	KNO		
					40-50	50-60	140	170-650
				40-50		50-60	230	260-650
				96-100			370	400-650
15-25		25-35	45-55				480	510-760
45-55	45-55						680	730-900
15-25	20-30	50-60					600	680-930
20-30		70-80					700	760-930
10-20		80-90					680	820-1100
	89-100						980	1040-1350
4-6	92-96						880	950-1260

5. MICROSCOPE OPTIQUE

Les échantillons traités sont observés au microscope optique . Pour cela une préparation préalable est nécessaire . Cette préparation comprend l'enrobage ; le polissage ; l'attaque chimique .

+ Enrobage :

Il est réalisé à froid par une résine polymérisable

+ Polissage :

Le polissage mécanique est réalisé sur une série échelonnée de papiers abrasifs .

+ Attaque :

Le réactif d'attaque utilisé est le nital dont la propriété est :

.d'apparaître la perlite sous forme de lamelles alternées .

.de noircir la troostite .

.d'apparaître la martensite sous forme d'aiguilles

DURETE

Par définition ,la dureté est la résistance mécanique qu'un corps oppose à la pénétration par un autre corps plus dur .

On détermine la dureté à l'aide d'appareils dont les différents types sont caractérisés par la forme du pénétrateur .

Dans nos expériences on a utilisé un appareil de marque M.A.B qui donne la dureté ROCKWELL

On a utilisé un pénétrateur conique constitué par un diamant avec un sommet de $120^{\circ} + 0,5^{\circ}$ et arrondi au sommet $R=0,2\text{mm}$

La charge d'essai est 100Kg

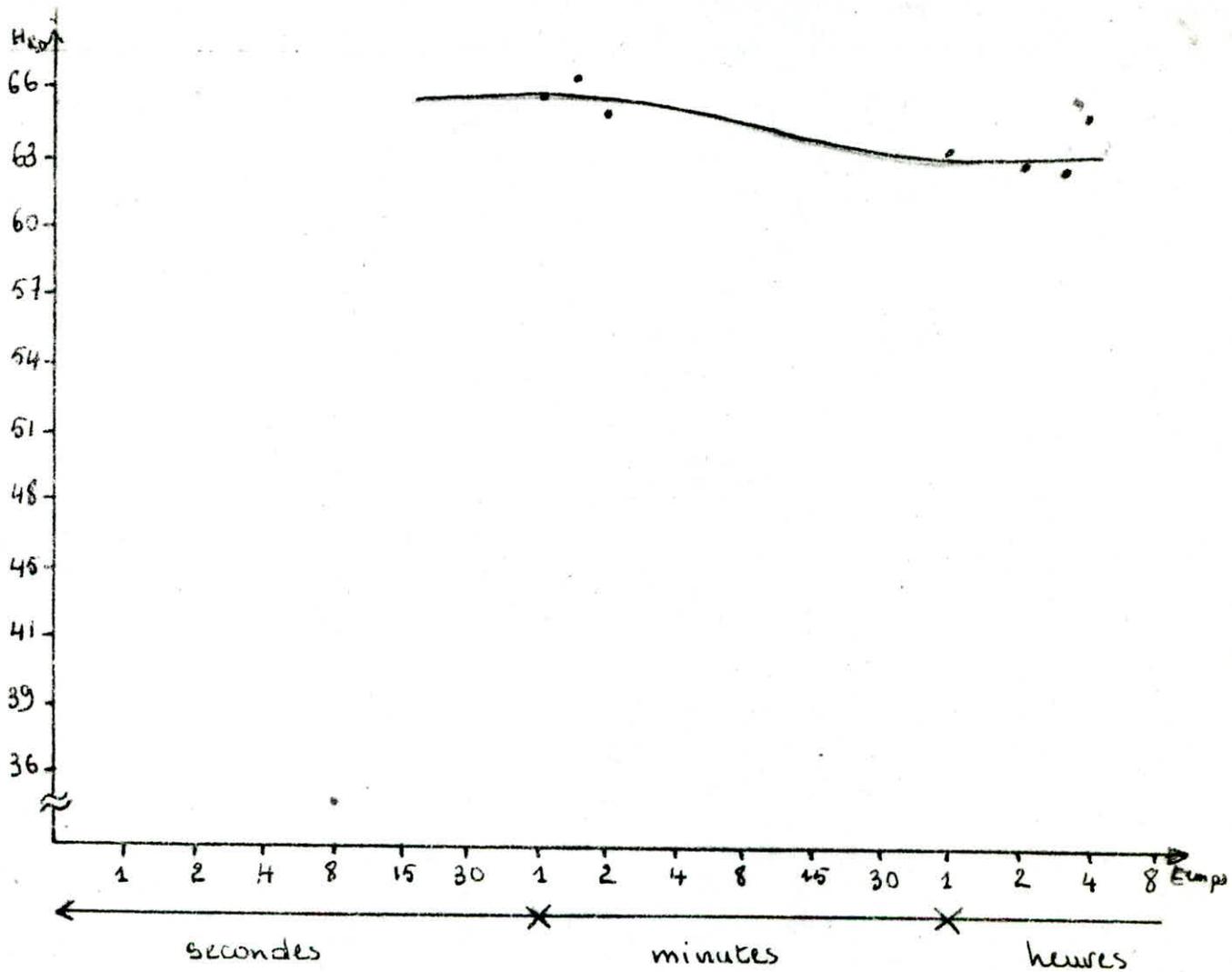
Les résultats des essais ont été dressés sur un tableau (moyenne de quatre essais pour chaque échantillon)

Dans ce qui suit nous présentons les résultats trouvés lors de nos expériences ainsi que leur interprétations .

Nous faisons remarquer que les duretés dressées sur les tableaux sont la moyenne de 4 essais et cela pour chaque échantillon.

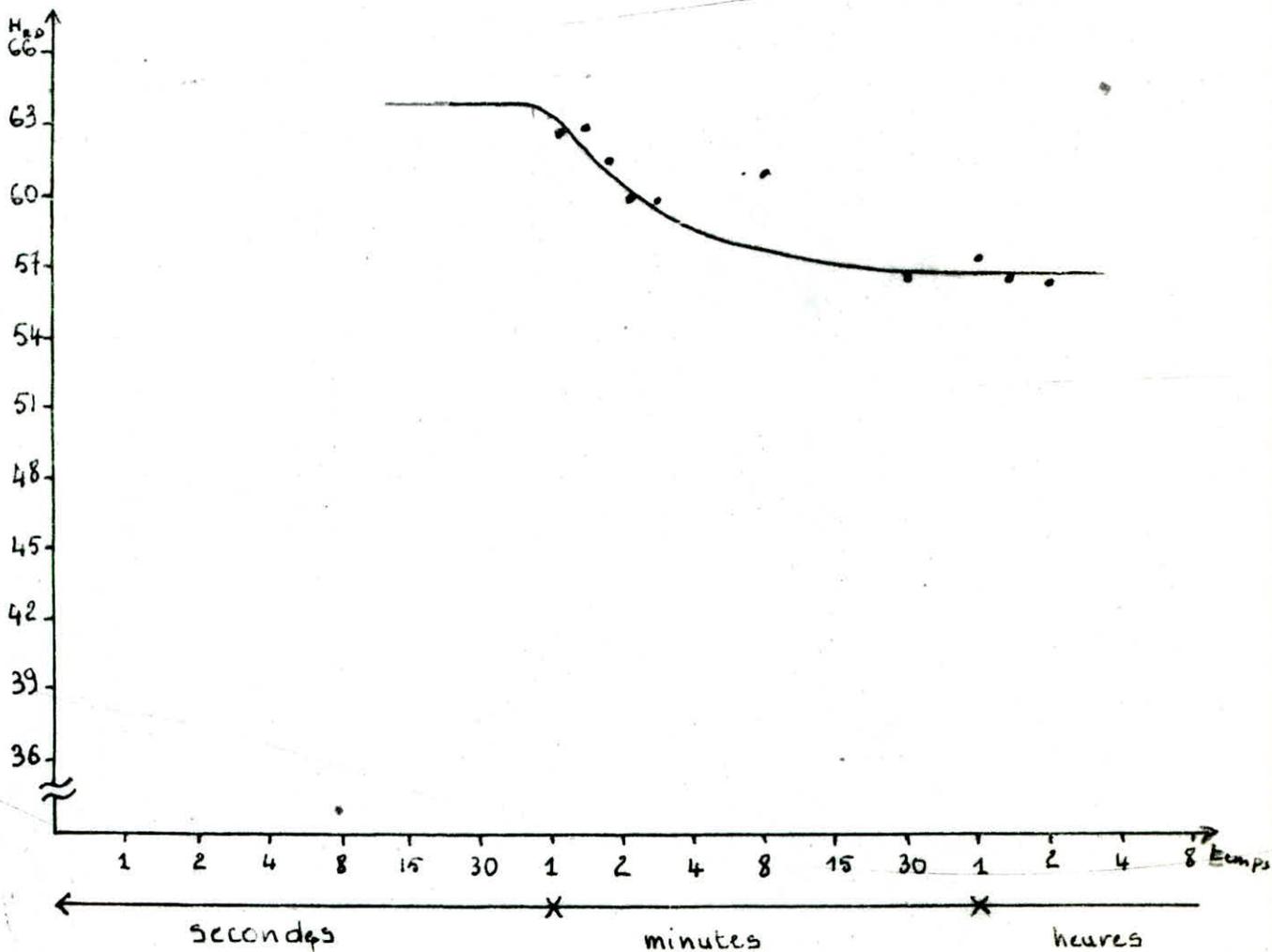
Signalons aussi qu'après avoir tracer les courbes dureté = $f(\text{temps})$ il était possible de trouver le début et la fin de transformation de l'austénite pour chaque température considérée et en conséquence de tracer la courbe T.T.T

HRD	66	67	65	64	63	62,5	65
t (s)	60	90	120	3600	7200	10800	14400



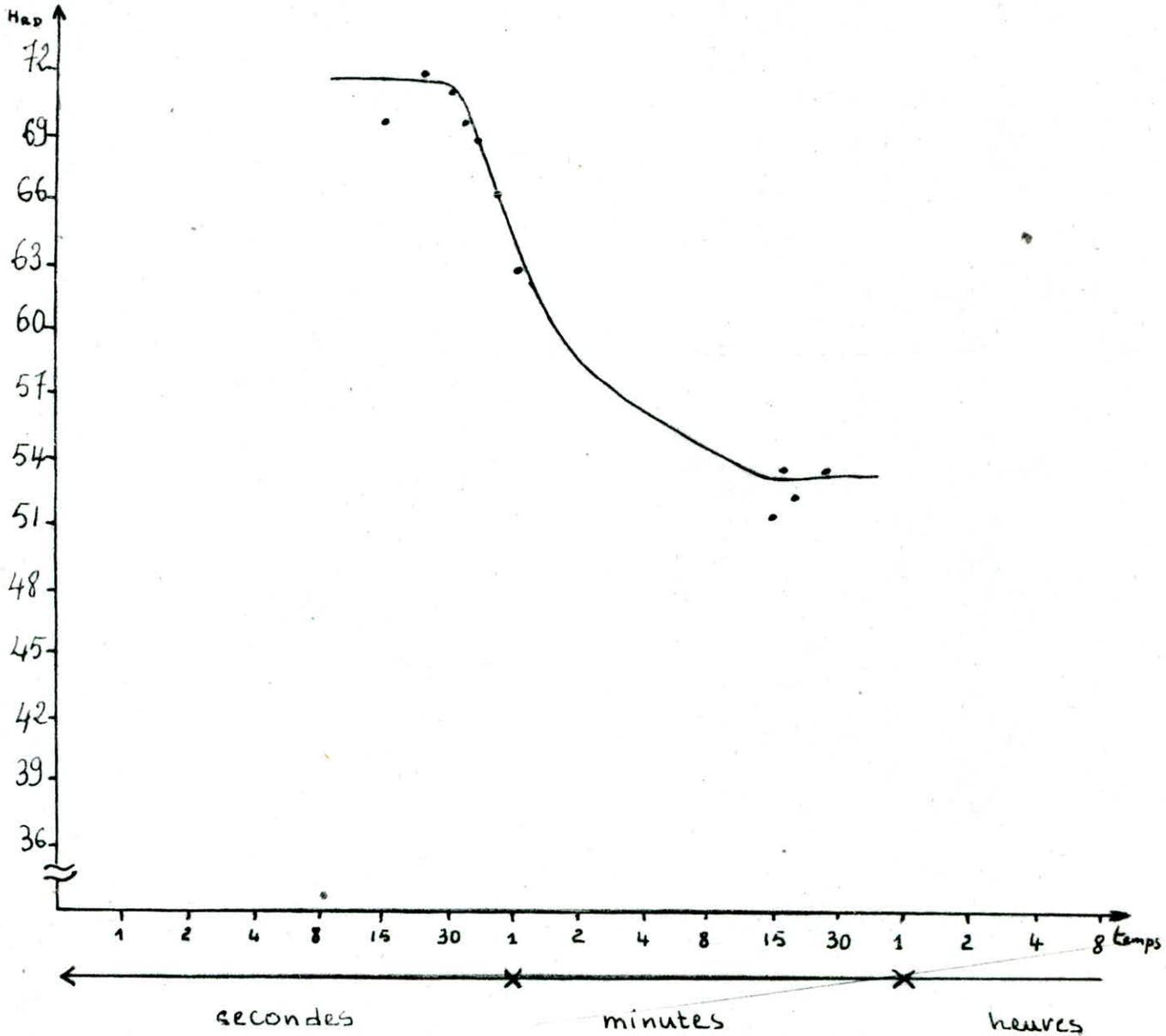
variation de dureté en fonction du temps
à la température 220°C

H _{RD}	62.5	63	61.5	59.5	59.5	61	57	57.5	56.5	56.5
t (s)	70	90	110	140	170	480	1800	3600	4800	6000



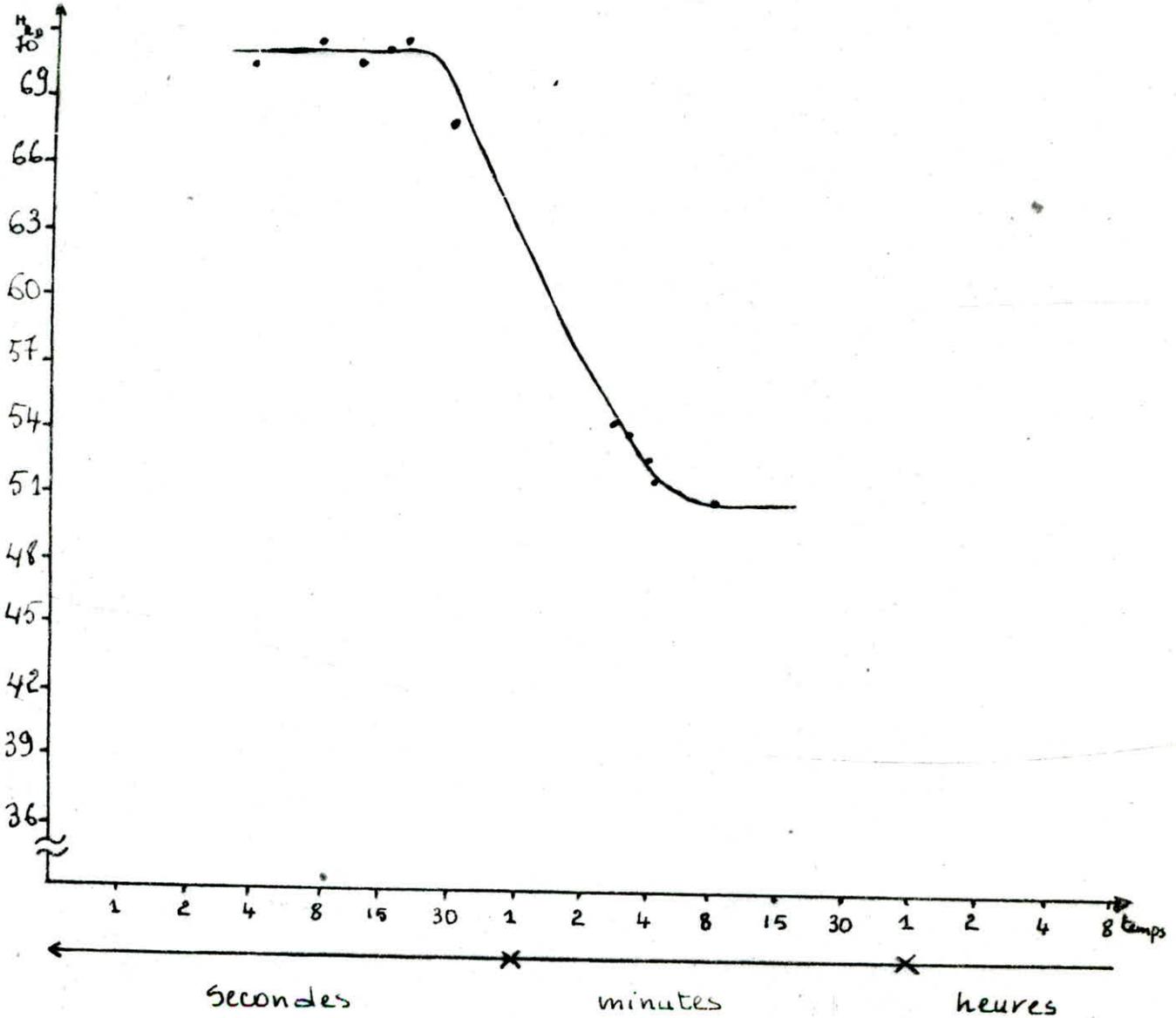
Variation de dureté en fonction du temps
à la température 250°C

H _{rd}	70	72,5	71,5	70	69	66,5	63	52	53,5	52,5	54
t(t)	15	20	30	35	40	50	60	900	1020	1200	1500



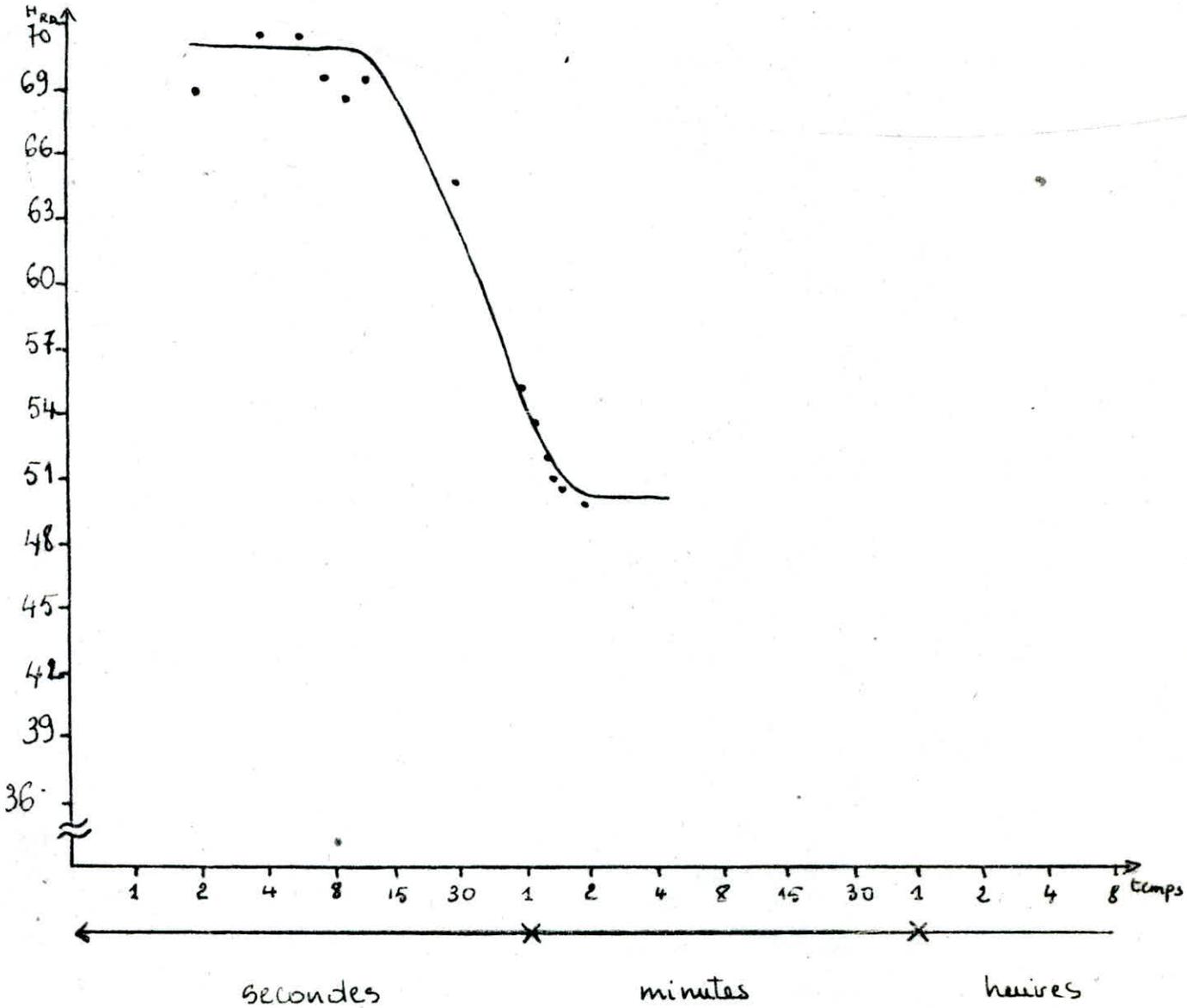
variation de dureté en fonction du temps
à la température 300°C

HRC	70,5	72	70,5	71	72	68	55	54	53	52	51
t (s)	4	8	12	15	20	30	180	210	240	270	480



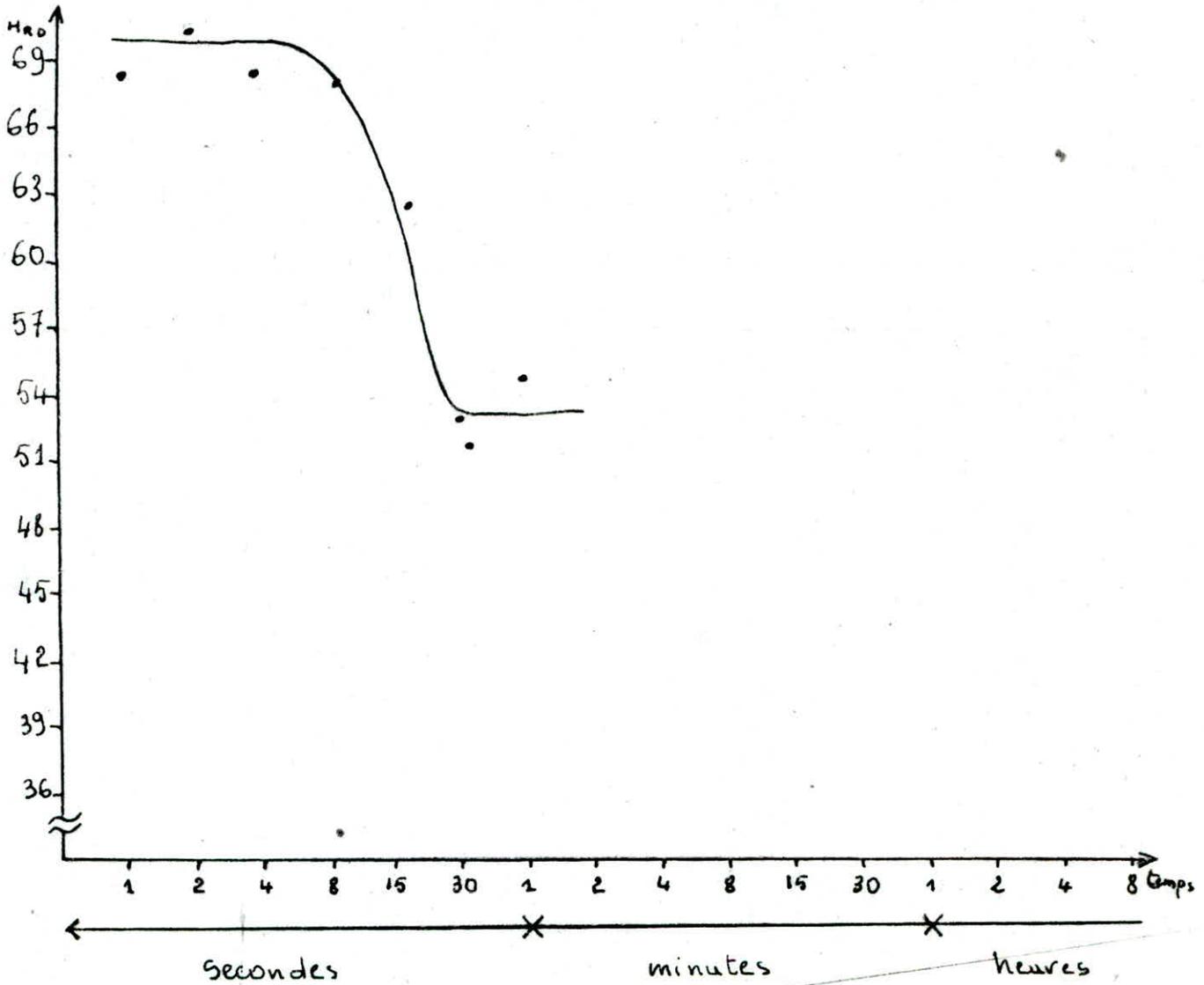
Variation de dureté en fonction du temps
à la température 350°C

HRC	69	71,5	71,5	69,5	68,5	69,5	64,5	55	53	52	51	49,5	49,5
t(s)	2,5	4,5	6	8	10	12	30	60	70	80	90	100	115



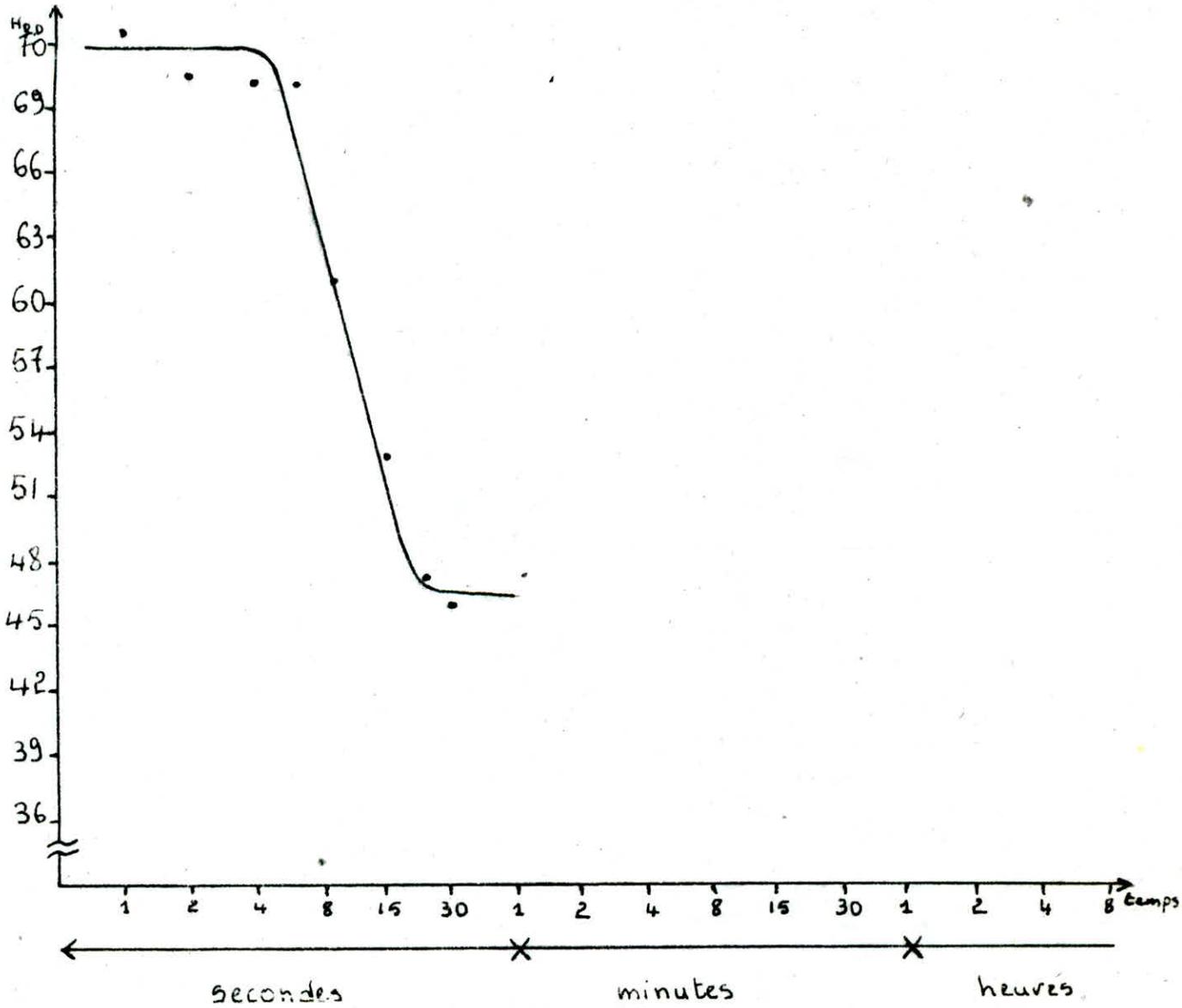
Variation de dureté en fonction du temps
à la température 400°C

HRD	69	70.5	69	68	62	53	52	55
Temps	1	2	4	6	15	20	30	60



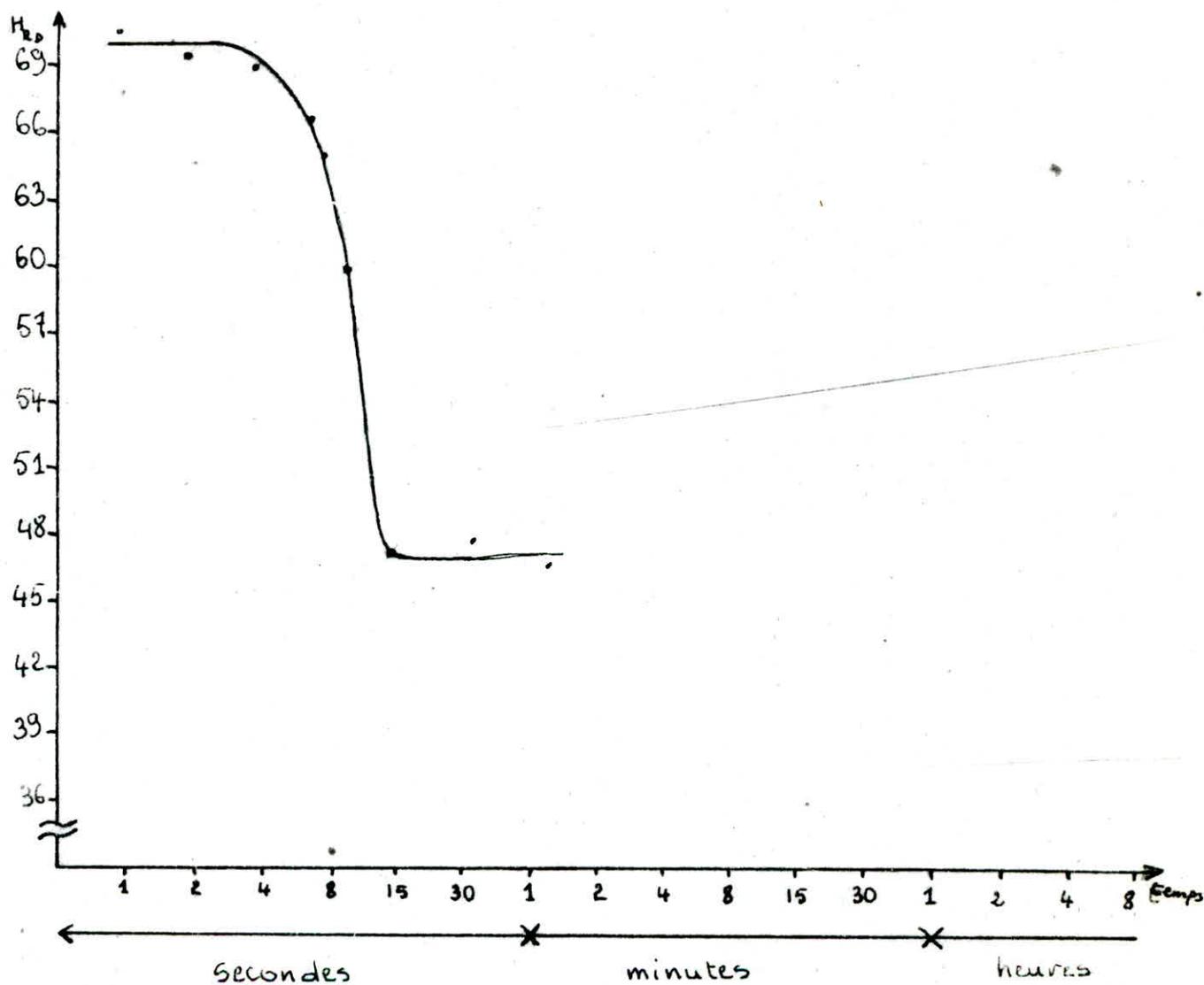
Variation de dureté en fonction du temps
à la température 450°C

H _{ed}	72.5	70.5	70	70	61	53	47	46	48
t(s)	1	2	4	6	10	15	20	30	60



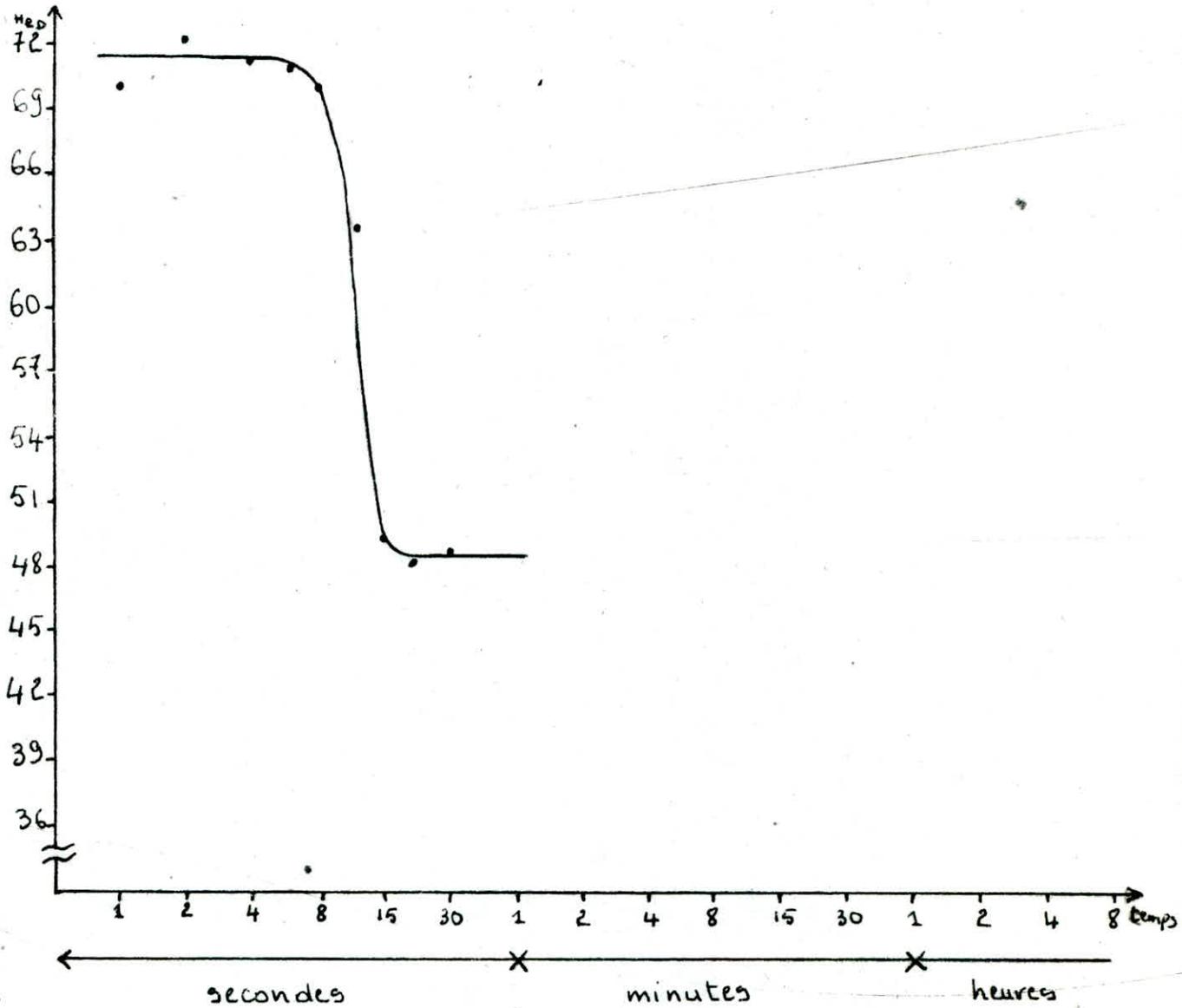
Variation de dureté en fonction du temps
à la température 500°C

H _{RD}	71	70	69	67	65	60	47,5	48	47
t(s)	1 s	2	4	7	8	10	15	30	60



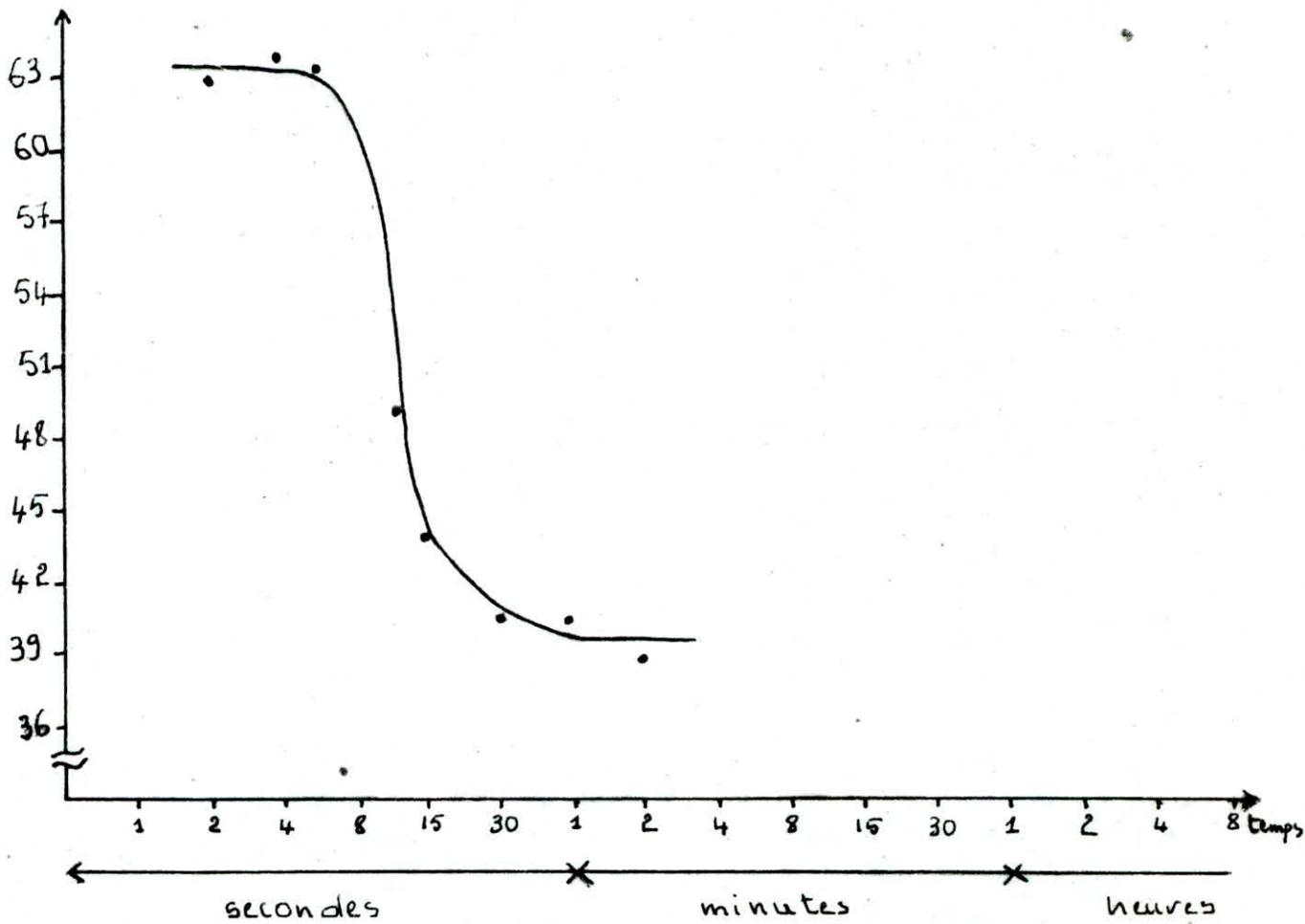
variation de dureté en fonction du temps
à la température 550 °C

Hrd	70	72	71	71	70	63,5	49	48	48,5
t(s)	1	2	4	6	8	12	15	22	30

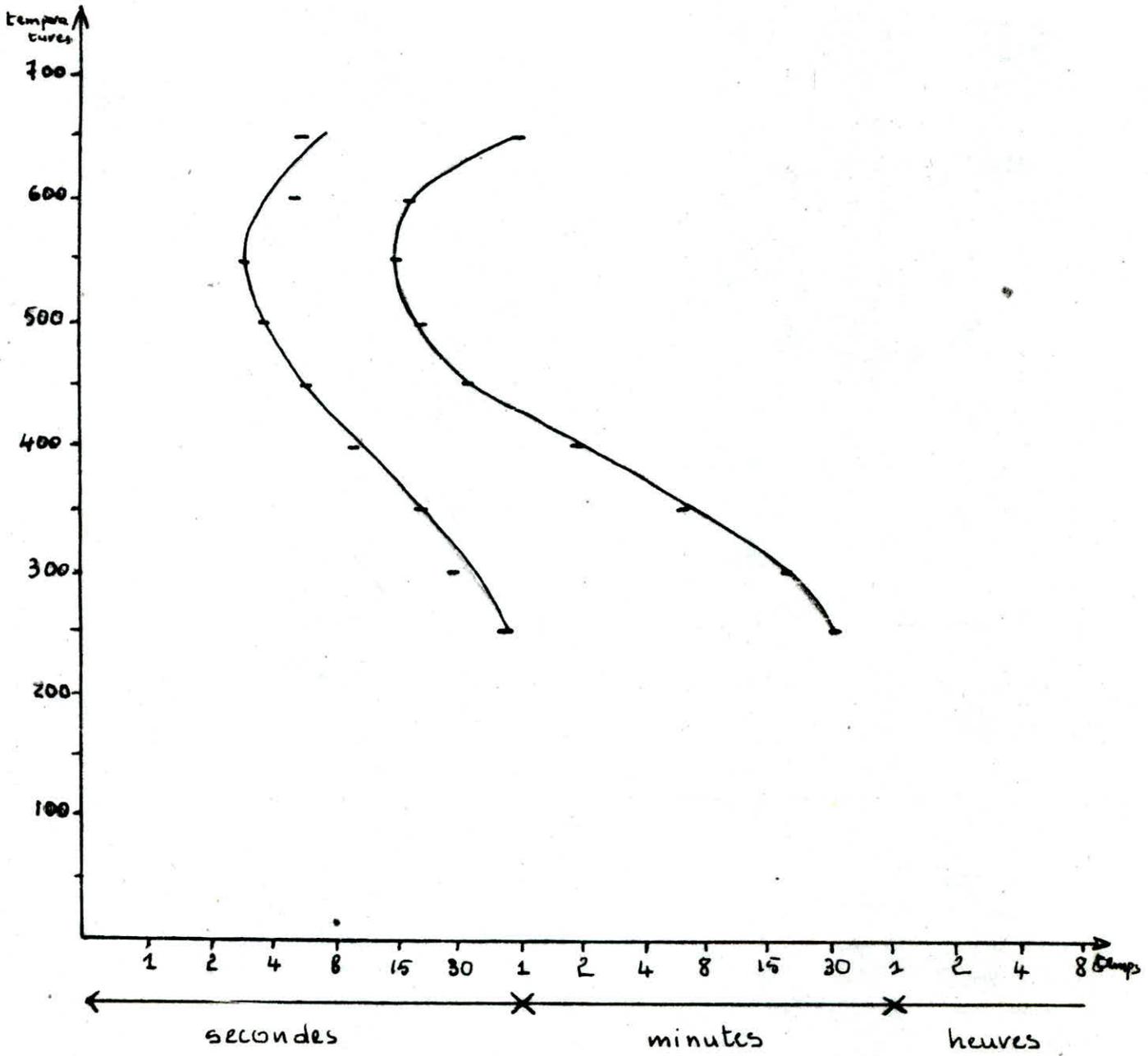


Variation de dureté en fonction du temps
à la température 600 °C

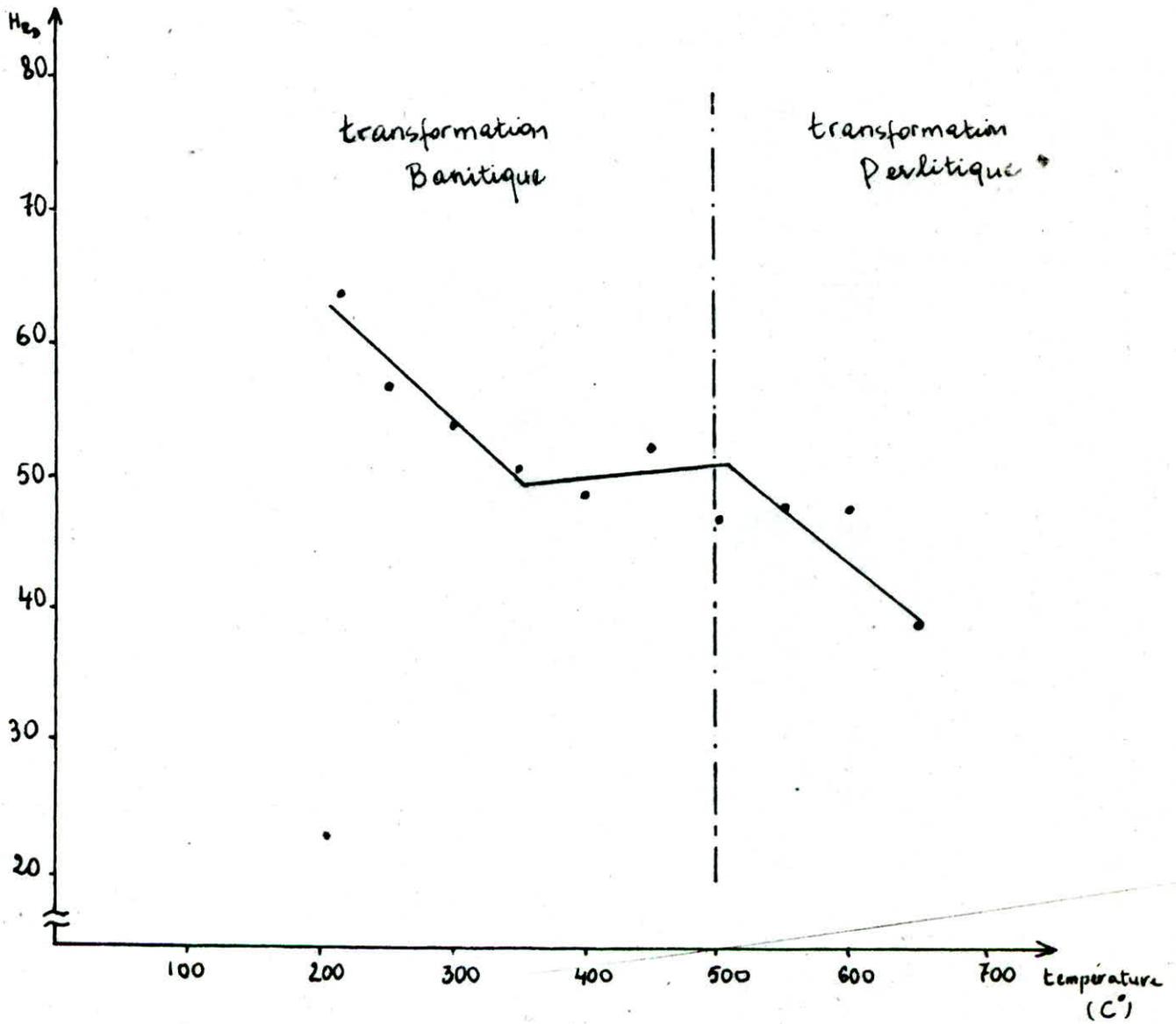
HRD	63	64	63.5	49	44	40,5	40,5	39
t (s)	2	4	6	12	15	30	60	120



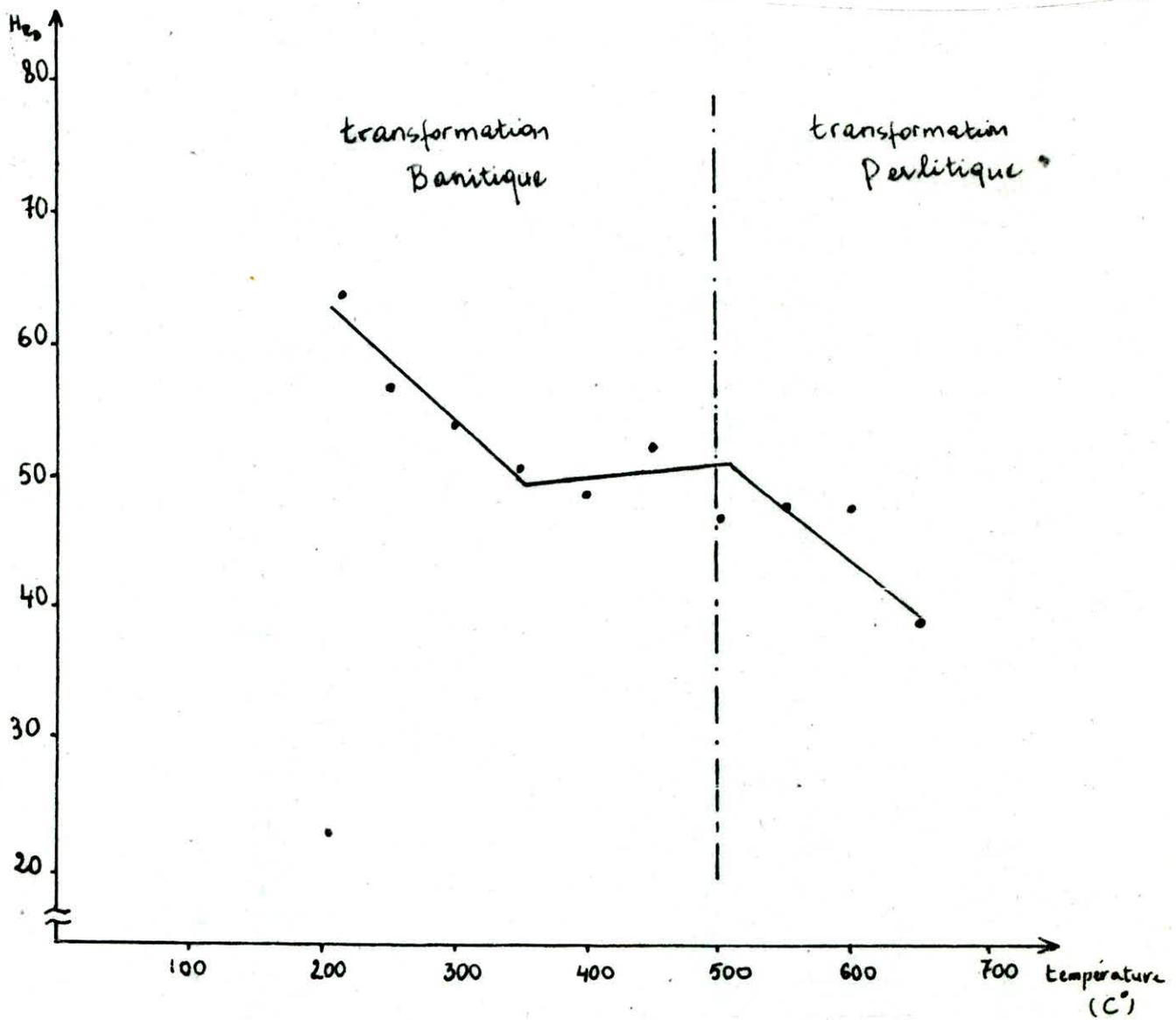
Variation de dureté en fonction du temps
à la température 650°C



Courbe TTT



Rapport entre la dureté et la température de la transformation de l'austénite.



Rapport entre la dureté et la température de la transformation de l'austénite.

INTERPRETATION DE LA COURBE T.T.T OBTENU

L'examen de ce diagramme montre que la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ se développe dans des conditions différentes selon la température de maintien .

6 Dans un domaine de température compris entre la limite de stabilité de la ferrite et une température voisine de 220°C et repéré M_s , la transformation se déroule bien en fonction du temps; par contre, dans le domaine inférieur à cette température M_s , le temps ne paraît plus intervenir et la transformation évolue alors en fonction de l'abaissement de la température .

Signalons toutefois que, au cours d'un maintien isotherme à une température inférieur à M_s , on peut assister au développement d'une transformation isotherme partielle formation de bainite

- Dans le domaine de température compris entre la limite de stabilité de la ferrite et la température M_s , le processus de transformation est différent selon que l'on se déplace aux températures les plus hautes ou les plus basses de l'intervalle considéré .

.Le domaine perlitique est compris entre les

température 723°C et 500°C

Remarquons que :

entre 723°C et 600°C on a la perlite grossière

entre 600°C et 500°C on a la perlite fine

Le domaine bainitique est compris entre les température
500°C et 220°C

entre 500°C et 350°C on a la bainite supérieur

entre 350°C et 220°C on a la bainite inférieur

Le nez est nettement visible à environ 550°C
correspondant à la valeur minimale du temps
d'incubation qui est de 3s

Le domaine

Le point Ms , limite supérieur du domaine marten-
sitique est à 220°C environ

remarque: d'après la relation

$$M_s = 233$$

TEMPERATURE 650°C

Le temps d'incubation est de 6s pour la formation
de la perlite.

La transformation de l'austenite est terminée
après environ t_{min}

Après refroidissement ,l'acier est constitué de perlite ;c'est le récuil isotherme . La dureté est alors de 39 HRD environ

TEMPERATURE 500°C

Le temps d'incubation est 4s pour la formation de la perlite .

La transformation est terminée au environ de 22sc la dureté est alors 46,5 HRD

TEMPERATURE 400°C

A 11s il y'a apparition de la bainite.

Après 2min ,transformation complète de l'austénite en bainite . C'est la trempe bainitique
Après refroidissement ,l'acier est constitué de perlite ;c'est le récuil isotherme . La dureté

TEMPERATURE 300°C

A 30s début de transformation de la bainite

A 21 min 7s tous l'austénite est transformé en bainite. La dureté de l'acier est alors 53 HRD

La transformation est terminée au environ de 22sc la dureté est alors 46,5 HRD

TEMPERATURE 400°C

A 11s il y'a apparition de la bainite.

Après 2min ,transformation complète de l'austénite

en bainite . C'est la trempe bainitique

Après refroidissement ,l'acier est constitué de

PROPOSITION D'UN TRAVAIL PRATIQUE

I. BUT ET PRINCIPE DE LA MANIPULATION

L'essai consiste a chauffer de petites échantillons d'acier jusqu'à des températures qui correspondent à l'existence d'une austénite stable (au dessus du point critique) puis en les refroidissant très vite à une température inférieure à A1 et en la maintenant à cette température jusqu'à la décomposition de l'austénite afin de déterminer le début et la fin de la transformation; ainsi que la nature du produit obtenu

A chaque température de maintient l'échantillon subit une des transformation suivante :

- ;La transformation perlitique entre 700°C et 500°C
- .la transformation bainitique entre 500°C et 300°C
- .La transformation martensitique en dessous de 300°C

N.B : ces trois domaines peuvent changer d'intervalle de température suivant les nuances d'aciers.

A retenir que :

+LA perlite est formée de lamelles alternées de ferrite, et de cémentite . Sa formation se fait par

diffusion du carbone ; si la vitesse de refroidissement augmente ,la formation de perlite peut être modifiée (lamelle plus serrées)

+La bainite se présente en deux types principaux bainite supérieur qui apparaisse dans laa zone supérieur du domaine bainitique ; la ferrite se forme en "lattes" ,les plaquettes de carbure de fer précipitant entre ces lattes à peu près parallèlement à elles .

.La bainite inférieur qui apparaisse dans la zone inférieur du domaine bainitique ;la ferrite formée est de plus en plus aciculaire ,les carbures de fer précipitent à l'intérieur des aiguilles de ferrite sous forme de plaquettes très fines .

+La martensite est une solution sursaturée en e atomes de carbone bloqués dans le réseau du fer~~x~~

2.DESCRPTION DU MATERIEL UTILISE

-Un four électrique de température réglable de 0°c à 1200°c .

-Un four à bain de sel de température réglable de 0°c à 600°c .

Un appareil de mesure de dureté ROCKWELL

Des échantillons en aciers

3. MANIPULATION

- Allumer le four électrique
- Régler le à la température 900°c
- Allumer le four à bain de sel
- Regler le à la température 350°c
- Mettre l'extracteur d'air en marche
- Preparer plusieurs échantillons de deux (2)mm d'épaisseur
- Faire leur polissage
- Maintener les avec du fil de fer
- Mettre les échantillons à l'intérieur du four (avec un temps de maintien de 20Min)
- Placer rapidement les échantillons austénisés à l'intérieur du bain de sel
- Faire sortir du bain les échantillons un à un (noter pour chaque échantillon son temps de maintien)
- Tremper les échantillons sortis du bain à l'eau
- Faire à nouveau leur polissage
- Mesurer la dureté de chacun d'eux
- Opérer de la même manière pour une température du bain égal à 550°c et 650°c

4.RESULTATS

-Présenter les résultats sous la forme suivante:

N° de l'échantillon					
temps de maintient					
dureté					

- Tracer le graphe $d=f(\tau)$ pour chaque température
- Tracer la courbe T.T.T (le temps en logarithme)
- Interpreter vos courbes .
- Conclusion .

PROPOSITION D'UN TRAVAIL PRATIQUE N°2

I. BUT DE LA MANIPULATION

LE but de T.P est de voir l'amélioration des caractéristiques mécaniques lors des trois différentes trempes suivantes: trempe classique ; trempe suivie d'un revenu ; trempe martensitique .

2. DESCRIPTION DU MATERIELS UTILISES

Le même que celui utilisé pour le T.P N°1

3. MANIPULATION

A) trempe martensitique

même procédé que le T.P N°1 mais en prenant la température du bain égale à 250°C

B) trempe classique

après avoir austénisé les échantillons , faire une trempe à l'eau .

C) trempe + revenu de détente

les échantillons trempés sont remis à l'intérieur du four à la température comprise entre 180° et 250°C avec un temps de maintien entre 1h et 2h30min

D) trempe + revenu de structure

les échantillons autrempés sont remis au four à

la température comprise entre 500°C et Ac avec un temps de maintien entre 1h et 2h

4. RESULTATS

présenter les résultats sous la forme suivante

traitement	T.M	T.C	T+Rd	T+Rs
dureté				

Interpréter vos résultats

conclusion

CONCLUSION

Le diagramme T.T.T est d'une importance considérable pour l'explication des phénomènes de traitements thermiques et la détermination de leur conditions en vue d'obtention d'une structure recherchée .

La courbe que nous avons obtenue pour notre acier est décalée vers la droite par rapport aux diagramme de l'I.R.S.I.D pour un acier XC80 ; cette différence est probablement due à l'influence du manganèse et du silicium .

Notre travail permet de contribuer à la mise en place de manipulations dans notre laboratoire de traitement thermique et la mise en marche d'un certain équipement. Enfin , nous souhaitons que l'étude soit reprise pour le tracé du diagramme T.R.C et l'application de ces deux diagrammes à différentes nuances d'acier

BIBLIOGRAPHIE

- 1) LAKHTINE -- METALLOGRAPHIE ET TRAITEMENTS THERMIQUE
- 2) ROOS - PRECIS DE METALLURGIE APPLIQUEE
- 3) CHAUSSIN - METALLURGIE
- 4) COLOMBIER - METALLURGIE DU FER
- 5) BENARD -- METALLURGIE GENERAL
- 6) CHALMERS -- METALLURGIE PHYSIQUE
- 7) DE-SMET -- PRATIQUE DES TRAITEMENTS THERMIQUES
- 8) PARLO -- PRECIS DE METALLURGIE
- 9) CAZAUD - METALLURGIE , MISE EN FORME
- 10) QUILLET - ENCYCLOPEDIE INDUSTRIELLE
- 11) TECHNIQUE DE L'INGENIEUR (M4)
- 12) LONGEOT - FABRICATION INDUSTRIELLE
- 13) REVUES DE TRAITEMENT THERMIQUE
- 14) BAIN -- LES ELEMENTS D'ADDITIONS

