

10/83

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

-oooOooo-

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

-oooOooo-

DEPARTEMENT MINES ET METALLURGIE



B. B. B.

EX

PROJET DE FIN D'ETUDES

COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES MECANQUES
ET METALURGIQUES DES ACIERS 45 M 5 et
35 CD 4.
APRES TRAITEMENTS THERMIQUES.

PROPOSE PAR / MONSIEUR AMRAOUI DIRIGE PAR / Mme BIALON
RESPONSABLE DU LABORATOIRE DE METALLURGIE A LA SONACOME - C.V.I.
ROUBA.

ETUDIE PAR / Monsieur SELATNIA TAHAR.

-coOoo- JUIN 83 -coOoo-

-oooOooo-

—/—) Mes parents;

Mes frères et soeurs;

Mes amis;

Tous ceux qui me sont chers;

JE DEDIE CE TRAVAIL.

-oooOooo-

-ooOoo- REMERCIEMENTS -ooOoo-

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

- M. SALHI, Chef du département mines et métallurgie.
- Mme. BIALON, Mon professeur et promoteur.
- M. AMRAOUI, Responsable du Laboratoire de métallurgie au C.V.I., SONACOME ROUIBA. qui a participé au choix de ce sujet et qui m'a accueilli dans son laboratoire.

Je voudrais témoigner ma sincère et profonde reconnaissance à tous les professeurs du département des mines et de la métallurgie pour **l'enseignement et pour** conseils précieux dont ils nous ont fait profiter.

Mes remerciements vont également à Messieurs ;

KOUADRIA, HENNI, BOUDERBALLAH, OUATASSI, SAADOUNI, SAIDI. ABROUS.

Ces remerciements seraient incomplets si je ne citais pas la secrétaire Melle, SIFAOUÏ Nassima qui n'a aucun moment ménagée ses efforts pour nous aider à l'élaboration de ce modeste ouvrage.

Merci aussi à tous les amis qui m'ont soutenu durant ce travail.

-oooOoo- -OOOOOOO-

-ooOoo- BIBLIOGRAPHIE -ooOoo-

- I. G. de smet. La pratique des traitements thermiques les métaux industriels (1972) DUNOD.
2. A. ROOS. Pièces de métallographie appliquée (1963) DUNOD.
3. R. BENSIMON Les aciers Tome I, II Cours professé au (C.E.S.T.I.).
4. I. LAKHTINE. Métallographie et traitements thermiques des métaux. (1978) MIR.
5. H. De Leiris. Métaux et alliages Tome II "Fers, aciers et fontes" (1971) MASSON et Cie.
6. J. Bernard, A. Michel, J. Prilibert et J. TALBOT. Métallurgie générale. (1969) MASSON et Cie.
7. Techniques de l'ingénieur. Traitements thermiques.
8. E.C. BAIN et H. W. PAXTON. Les éléments d'addition dans les aciers (1968) DUNOD.
9. Revues des traitements thermiques.
10. Cours de Messieurs B. SCHMITT, professeur de la métallurgie physique à L'E.N.P.A.
11. P. CHAMPION, L. GUILLET, PR. POUPEAU. Diagrammes des phases des matériaux cristallins.
12. I.R.S.I.D. Atlas des courbes de transformation.

-ooOoo-

TABLE DES MATIERES

Introduction.....	1
Chapitre I Bases des Traitements Thermiques des Aciers	4
I. 1. - <u>Diagramme D'équilibre</u>	5
1.1. - Description Générale	5
1.2. - Les phases du diagramme labile.....	5
1.3. - Définition Fer - Acier	5
1.4. - Le fer	5
1.4.1. - Variétés Allotropiques du Fer Pur.....	5
1.4.2. - Propriétés mécaniques	7
I.2. - <u>Les Aciers au Carbone.</u>	7
2.1. - Introduction	7
2.2. - Les aciers au carbone dans l'état normalisé.....	8
2.2.1. - Le traitement thermique de Normalisation.....	8
2.2.2. - Propriétés mécaniques des aciers normalisés	8
2.2.3. - Globularisation de la perlite et de la cémentite proeutectoïde	10
I.3. - <u>Changement de phase à l'état solide dans les Aciers au Carbone ..</u>	10
3.1. - Transformation de phase au chauffage	10
3.2. - Transformation de l'austénite en conditions isothermes	10
3.2.1. - La transformation perlitique	11
3.2.2. - La transformation martensitique	12
3.2.3. - La transformation bainitique	13
3.3. - Transformation de l'austénité en refroidissement continu	14
I.4. - <u>Les Traitements Thermiques.</u>	15
4.1. - L'austénisation	15
4.2. - Le recuit	15
4.2.1. - Recuit d'homogénéisation	15
4.2.2. - Recuit d'adoucissement	15
4.2.3. - Recuit de Normalisation	16
4.2.4. - Recuit de régénération	16
4.3. - La Trempe - - - - -	16
4.4. - Le Revenu. - - - - -	16

.../...

I.5. - <u>Les aciers Alliés</u>	17
5.1. - Insuffisances des aciers au carbone	17
5.2. - Solubilité des éléments d'alliage dans le fer	17
5.3. - Solubilité des éléments d'alliage dans l'acier	18
5.4. - Influence des éléments d'alliage dans les aciers recuits	18
5.4.1. - Répartition des éléments d'alliage dans l'acier	18
5.4.2. - Influence des éléments d'alliage sur la ferrite	18
5.4.3. - Influence des éléments d'alliage sur les carbures	18
5.4.4. - Influence sur les propriétés des aciers recuits	18
5.5. - <u>Influence des éléments d'alliage sur l'austénisation</u>	18
5.5.1. - Composition de l'austénite	18
5.5.2. - Homogénéisation de l'austénite	18
5.5.3. - Croissance et grosseur des grains d'austénite	18
5.6. - <u>Influence des éléments d'alliages sur les diagrammes T.T.T.</u>	19
5.7. - <u>Influence des éléments d'alliage sur la trempabilité</u>	19
5.8. - <u>Influence des éléments d'alliage sur le revenu</u>	19
CHAPITRE .II. MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES	20
II. 1. - <u>Les Matériaux.</u>	21
II. 2. - <u>Techniques Expérimentales</u>	24
2.1. - Les fours de traitements thermiques	24
2.2. - Essai de traction	26
2.3. - Essai de résilience	28
2.4. - Essai de dureté	29
2.5. - Microscopie optique	31
CHAPITRE .III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS- - - - -	33
III.1. - <u>Comparaison des caractéristiques mécaniques et métallurgiques.</u> <u>des aciers 45.M.5. ET 35.CD.4. après recuit de Normalisation .</u>	35
1.1. - Résultats expérimentaux	35
1.2. - Interprétation	35
III. 2 - <u>Comparaison des caractéristiques mécaniques et métallurgiques des</u> <u>aciers 45.M.5. ET 35.C.D.4. après refroidissement à l'air calme..</u>	36
2.1. - Résultats expérimentaux.....	36
2.2. - Interpretation	36

I N T R O D U C T I O N

La notion de traitement thermique recouvre un ensemble d'opérations ayant pour but des transformations structurales effectuées sur les matériaux à l'état solide, sous l'influence de cycles de températures convenablement choisis, afin de leur conférer des propriétés particulières parmi les matériaux traités thermiquement ce sont les métaux et les alliages métalliques qui sont les plus performants.

Actuellement, on commence à bien comprendre, les relations entre structures et propriétés, et, comme, on peut maîtriser les évolutions structurales par traitement thermique, il est souvent possible d'obtenir les propriétés voulues.

L'examen des diagrammes d'équilibres des métaux et alliages met en évidence l'existence de transformation à l'état solide.

Les traitements thermiques ayant pour but des modifications de structures d'une part ; et de morphologie de cette structure d'autre part, sont donc fondés respectivement sur les possibilités d'évolutions structurales des métaux et alliages et sur les mécanismes de ces évolutions.

Dans les matériaux ferreux et plus particulièrement dans les aciers ; les possibilités de transformation dans l'état solide de l'austénite sont approximativement tous, connus ceci provient du fait que :

Le diagramme d'équilibre Fe - C, rend compte des transformations lorsque le refroidissement est lent .

Les courbes dites (T.R.C.) obtenus à partir d'une étude en refroidissement continu et les, courbes (T.T.T.) en conditions isothermes, rendent compte des transformations ne s'effectuant pas dans les conditions d'équilibre.

Ce sont surtout les industries de pointe (aéronautique, nucléaire, essentiellement) et les Industrie de grandes séries (Automobile) qui ont poussé au développement des performances des alliages et à la mise au point de traitements thermiques permettant d'atteindre ces performances.

Le but de notre étude peut être résumé dans les trois points suivants :

- Mettre en évidence l'influence des différents modes de traitements thermiques sur les caractéristiques mécaniques et métallurgiques des aciers 45.M.5. et 35.CD.4.
- Comparaison des caractéristiques mécaniques et métallurgiques des aciers 45.M.5. et 35.CD.4. après ces différents modes de traitement thermique.
- Et finalement étudié la possibilité de substitution d'un acier 35.CD.4. par un acier 45.M.5 pour la fabrication de certaines pièces mécaniques.

Puisque notre travail est consacré à l'étude des traitements thermiques de l'acier.

Le premier chapitre résume les bases théoriques des traitements thermiques de l'acier ainsi que l'influence des éléments d'alliage sur l'acier au carbone.

Le second chapitre est consacré uniquement aux matériaux et les techniques expérimentales dans le troisième chapitre nous avons regroupé les résultats obtenus suivi de leur interprétation un accent particulier a été mis sur les traitements thermiques constitués d'une trempe plus revenu.

oooooooooooooooooooo
oooooooooooooooooooo
oooooooooooooooooooo
oooooooooooooooooooo
oooooooooooooo
oooooooooooo
oooooooooooo
oooooo
oooo
oo
oo

-○○○○- CHAPITRE - I - -○○○○-

- BASES DES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS -

- I -

1. DIAGRAMME - D'EQUILIBRE

=====

1.1. DESCRIPTION GENERALE.

Le diagramme d'équilibre labile où fer - Cémentite permet de décrire la structure des aciers normalisés, comme le montre la fig.(I).

On distingue sur ce diagramme restreint au domaine des aciers à l'état solide, des frontières délimitant dans le plan température-composition un certain nombre de domaines à l'intérieur desquels est stable à l'équilibre soit une seule phase, soit un mélange de deux phases.

1.2. LES PHASES DU DIAGRAMME - LABILE

+ L'austénite (γ) : Représente la phase stable à haute température et dans laquelle le carbone se trouve en solution solide. Comme elle dérive du fer gamma, sa structure est cubique à faces centrées avec les atomes de carbone en insertion dans les sites octaédriques du réseau.

+ La ferrite (α) : Apparaît au dessous de la ligne A3 au refroidissement, sa structure est celle du fer alpha cubique centré dans laquelle le carbone est très peu soluble à 723°C température du palier eutectoïde, la solubilité reste inférieure à 0,05 %.

+ La Cémentite Fe_3C : C'est un composé chimique de dureté élevée; la cémentite cristallise dans le système orthorhombique; elle présente différents modes de formation :

- La cémentite secondaire ou proeutectoïde : Elle est libérée par l'austénite pendant le refroidissement entre 1147°C et 723°C.
- La cémentite eutectoïde : Lorsque l'austénite atteint la composition eutectoïde il y a transformation de l'austénite en ferrite et cémentite eutectoïde. Ce mélange s'appelle perlite.
- La cémentite tertiaire : Elle est libérée par la ferrite pendant le refroidissement au-dessus du palier eutectoïde.
- La perlite : C'est le mélange eutectoïde constitué de 87 % de ferrite et de 13 % de cémentite correspondant à une teneur de 0,8 % de carbone. Le mélange peut-être lamellaire ou globulaire.

1.3. DEFINITION FER - ACIER.

Le diagramme fer-carbone permet de donner les définitions suivantes :

LE FER / Il est défini comme un produit ne présentant pas de transformations eutectoïde donc ne contenant pas de perlite. Sa teneur en carbone est inférieure à 0,05 %.

LES ACIERS / Se nom est donné aux produits présentant la transformation eutectoïde, mais exempts de transformation eutectique. Leur teneur s'étend de 0,05 à 2 %.

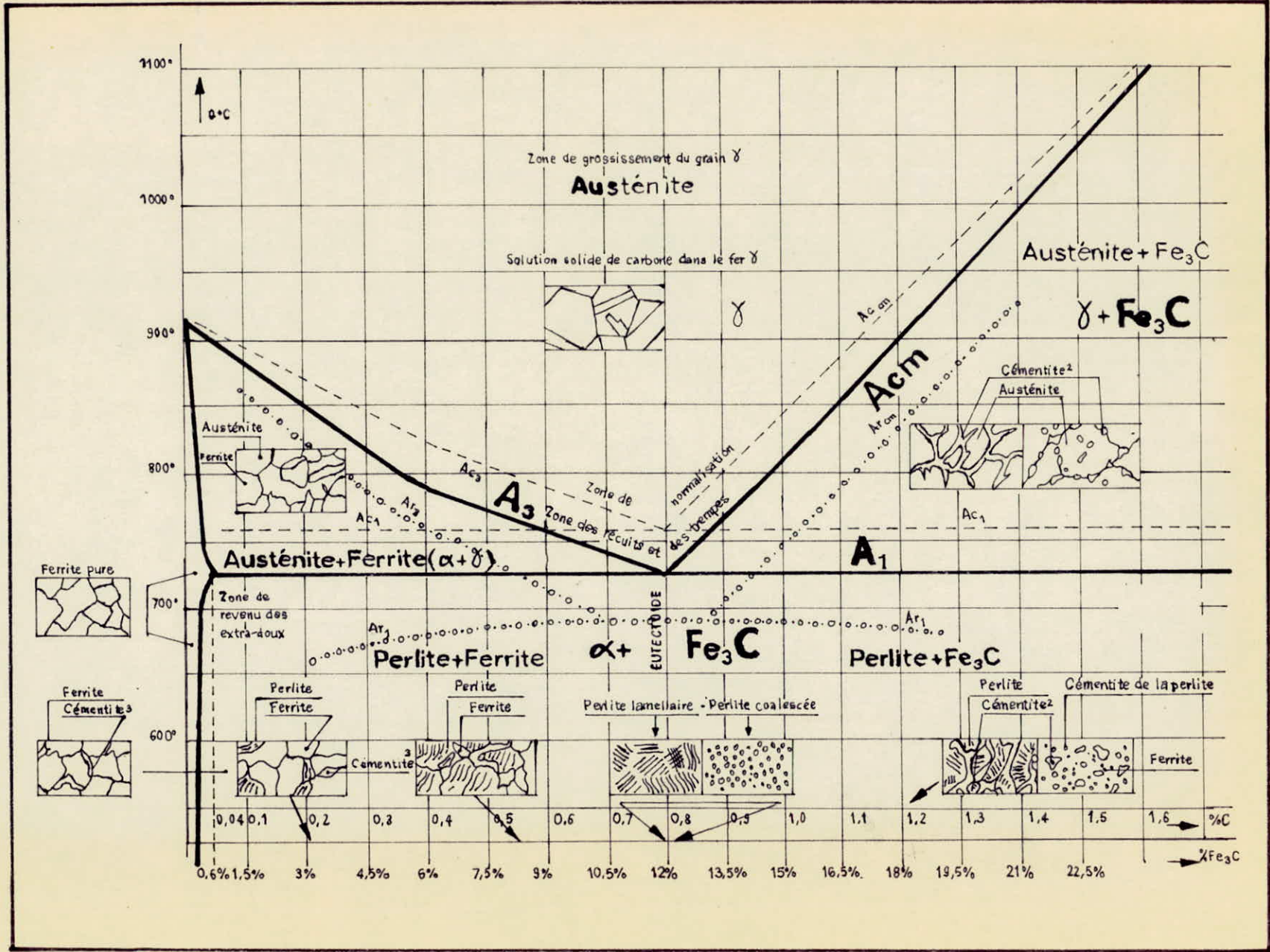
1.4. LE FER .

1.4.1. VARIETES ALLOTROPIQUES DU FER PUR.

Fer α : C'est la forme stable au-dessus de 910°C, sa structure est C.C.

.../...

ig (I) Diagramme d'équilibre fe-fe 3 C dans le domaine des aciers.



FER(γ): Cette forme stable entre 910°C et 1400°C présente la structure C.F.C.

FER(δ): Forme stable entre 1400 et 1536°C, il présente la structure C.C. En fait fer(α) et fer(δ) représentent dans des domaines différents de température la même variété allotropique du fer;

2. PROPRIETES MECANQUES

Si l'on tient compte de la taille des grains et de la quantité totale des impuretés présentes dans le fer, on peut situer les caractéristiques mécaniques dans les limites suivantes:

Resistance à la rupture : R_m 18 à 30 dan:mm².

Limite élastique : R_e 7 à 15 dan:mm²

Allongement : A% 40 à 50 %

Striction : Z % 80 à 93 %

Dureté : HB, 45 à 55

LES ACIERS AU CARBONE

2.1. INTRODUCTION : Le fer pur est un métal à peine plus dur et plus résistant que le cuivre, il a un nombre très limité d'application. C'est finalement l'impureté carbone peu coûteuse, qui influence plus que n'importe quel élément d'alliage, et dans un sens favorable les propriétés du fer. Mais cette action du carbone ne serait rien sans l'allotropie du fer, C à D la structure ferritique de basse température et la structure austénitique de haute température. l'allotropie a pour conséquence la gamme incomparable des propriétés des aciers au carbone. Elle se conserve même en présence de quantités importantes de carbone ou d'autres éléments d'alliage. Elle est la raison d'être de la plupart des traitements thermiques appliqués aux aciers. Les aciers sont donc les alliages à base de fer et de carbone qui peuvent toujours être homogénéisés par chauffage à une température, convenablement choisie, sous la forme d'austénite. Cette définition fixe la teneur maximale en carbone dans le cas où les éléments autres que le fer et le carbone sont en quantités négligeables dans l'acier. Cette teneur maximale, solubilité limitée à la température eutectique (1147°C), du carbone dans le fer est voisine de 2 %. Il est évident que pour des aciers contenant des éléments autres que le fer, et le carbone, ce qui est d'ailleurs le cas de tous les aciers industriels, cette teneur maximale est sujette à des variations.

On rencontre généralement dans les aciers :

Les éléments d'élaboration : Silicium et manganèse, leur teneur peut parfois dépasser celle du carbone.

Les éléments nuisibles : Soufre et phosphore, ils sont imparfaitement éliminés au cours de l'affinage de la fonte;

Les éléments d'addition : Ils sont ajoutés volontairement à l'acier pour lui conférer des propriétés intéressantes.

Le diagramme fer-cémentite permet de distinguer de sortes de classification des aciers;

Classification : basée sur la teneur en carbone de l'acier Aciers hypoeu-

Aciers hypoeutectoïde : $0,05 < C < 0,8 \%$
 Aciers hypereutectoïde : $0,88 < C < 2 \%$
 Aciers eutectoïde : $C = 0,8 \%$.

Classification technique : basée sur les propriétés mécaniques et sur les propriétés de trempabilité de l'acier.

Les aciers extra-doux : $C < 0,1 \%$.
 Les aciers doux : $0,1 \% < C < 0,25 \%$.
 Les aciers mi-doux : $0,25 \% < C < 0,40 \%$.
 Les aciers mi-doux : $0,40 \% < C < 0,60 \%$.
 Les aciers dure : $0,60 \% < C < 1 \%$
 Les aciers extra-durs : $1 \% < C$.

Les aciers au carbone dans l'état normalisé : La structure et les propriétés d'un acier dépendent, dans une très large mesure, des traitements thermiques qu'il a subis et notamment des conditions dans lesquelles il a été refroidi, on doit définir un état de référence qui permet de comparer entre eux des aciers de composition différentes. Cet état de référence est l'état normalisé.

Le traitement thermique de normalisation : Il comprend trois phases.

- L'austénisation : qui est le chauffage jusqu'à une température convenablement choisie du domaine .

- L'homogénéisation : Consiste en un maintien isotherme à la température d'austénisation.

- Le refroidissement : depuis la température d'homogénéisation jusqu'à la température ambiante doit être assez lent pour que la transformation perlitique de l'acier, C.à D. sa transformation avec diffusion complète du carbone, ait le temps de se produire. Si le traitement de normalisation est mené correctement, la structure de l'acier normalisé ne dépend que de la teneur en carbone de l'acier.

- L'acier eutectoïde : Présente une structure constituée de grains de perlite;

- L'acier Hypoeutectoïde : Présente une structure constituée de grains de ferrite et d'agrégats perlitiques.

- L'acier Hypereutectoïde : à une structure constituée de plages perlitiques séparés par des liserés de cémentite.

Propriétés mécaniques des aciers normalisés; (fig:2)

Il est évident que les propriétés mécaniques dépendent beaucoup des dimensions des grains.

Les constituants des aciers ont les caractéristiques suivantes/

	R kg/ MM2	A %	HB kg/ MM2
FERRITE	28	50	80
PERLITE	80	10	200
CEMENTITE	-	0	700

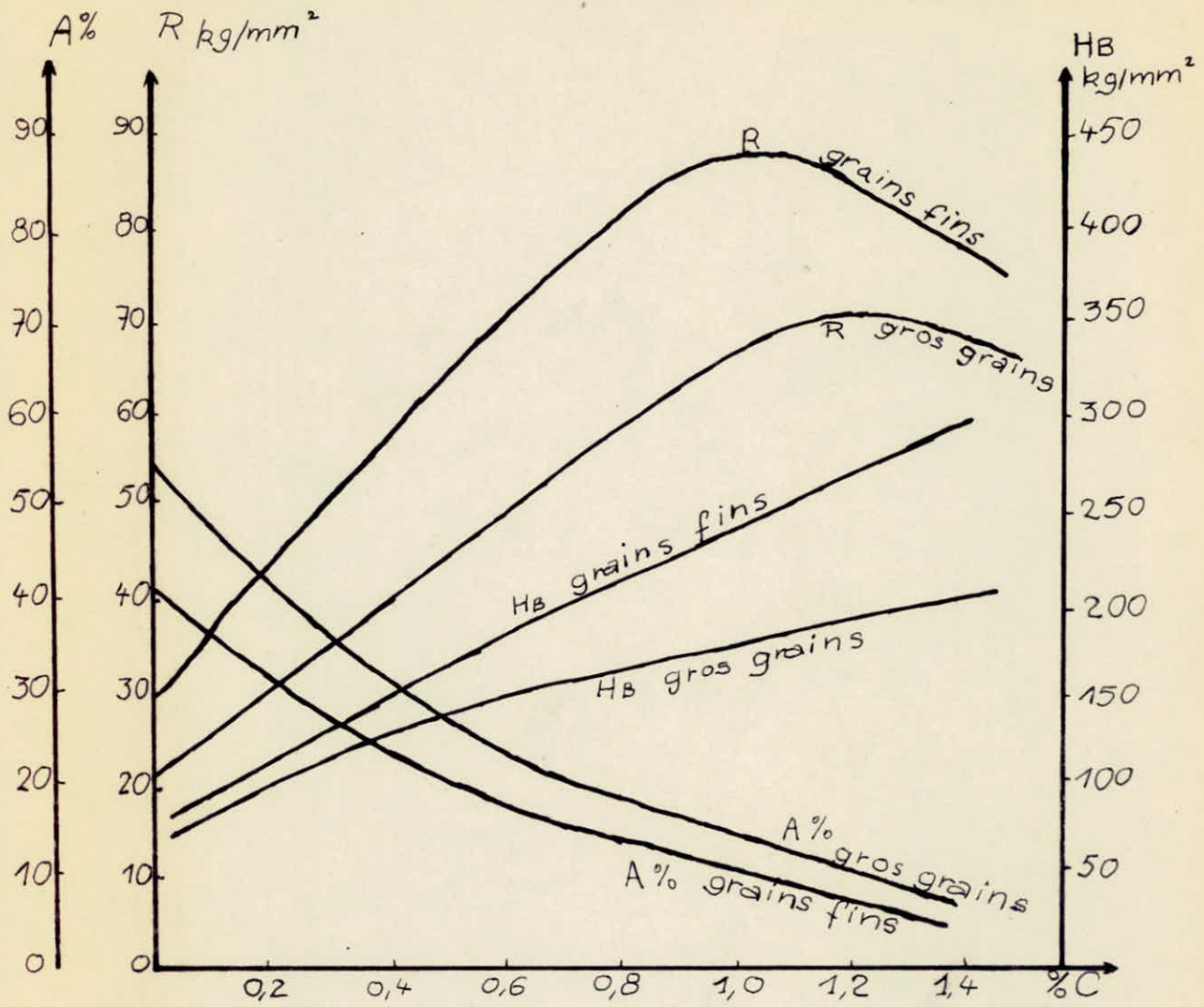


Fig 2: propriétés mécaniques des aciers normalisés.

Les propriétés mécanique des aciers normalisés varient avec la teneur en carbone, mais aussi avec la taille des grains. on peut les estimer approximativement en s'appuyant sur les caractéristiques des constituants par exemple,

$$R = \frac{28 F + 80 P}{100} \quad F + P = 100 \quad C = \frac{0,8 P}{100}$$

Donne : $R = 28 + 65 C$.

F, P, C sont les pourcentages respectifs de la ferrite, la perlite et le carbone dans l'acier considéré.

- 3. Globularisation de la perlite et de la cémentite proeutectoïde :
En chauffant la cémentite lamellaire ou proeutectoïde à une température suffisante pour que la diffusion du carbone soit possible, les particules de carbures évoluent de manière à ce que leur tension interfaciale à la surface, carbure/matrice soit minimale, ce qui correspond à un état plus stable. Elles tendent donc à prendre des formes arrondies c'est le phénomène de globularisation.
Ce traitement adoucit les aciers aussi bien par action sur la perlite que sur la cémentite proeutectoïde.
- 4. Changements de phase à l'état solide dans les aciers au carbone :
- 1. Transformation de phase au chauffage : Pour de nombreuses modalités de traitement thermique l'acier est chauffé aux températures qui correspondent à l'existence de l'austénite (l'austénisation). La formation de l'austenite au chauffage est un processus de diffusion qui se fait par germination et croissance.
- 2. Transformation de l'austénite en condition isotherme : L'étude de ces transformations a permis de mieux comprendre l'ensemble des phénomènes le résultat pratique de cette étude et de permettre la construction des diagrammes T.T.T. (température -temps- transformation). (fig:3). Ces diagrammes sont construits à partir des courbes de transformation isotherme de l'austénite, en représentant les debut et fin de transformation en fonction du temps et de la temperature. Après avoir chauffé un échantillon d'acier à une température dite d'austénisation, on l'immerge dans un bain à température constante inferieure à A1 et on étudie les pourcentages d'austénite transformée en fonction du temps. d'une façon générale la transformation ne commence qu'après un temps d'incubation plus ou moins long suivant la température et l'acier. La réaction de transformation s'accélère jusqu'a une vitesse maximum et s'atténue ensuite. La forme des diagrammes T.T.T. est fortement influencée par la teneur en carbone des aciers. Les traitements isothermes ont l'avantage de permettre l'étude séparés des trois types de transformation:
Perlitique, bainitique, et martensitique .

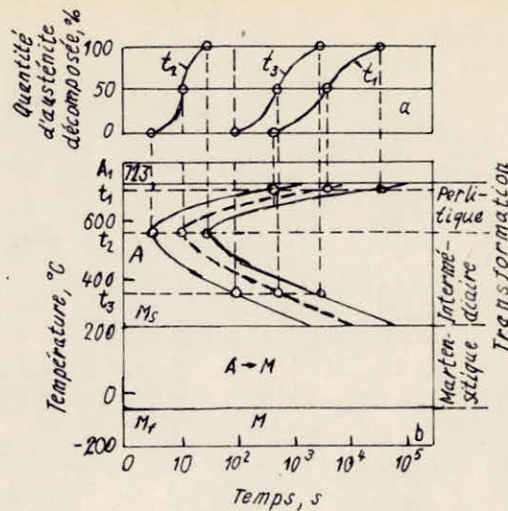


Fig:3 Diagramme T.T.T. d'un acier eutectoïde à 0,8 % C.
a: courbes cinétiques, b: courbe T.T.T.

ans les traitements isothermes (fig:3) le paramètre essentiel déterminant la nature de la transformation est la température.
aux températures élevées, la transformation est perlitique.
aux températures moyennes, la transformation est intermédiaire; ou bainitique
aux basses températures, la transformation est martensitique

1. LA transformation perlitique : l'austénite se décompose par diffusion en donnant naissance à un mélange ferrite + cémentite à structure lamellaire appelé perlite.

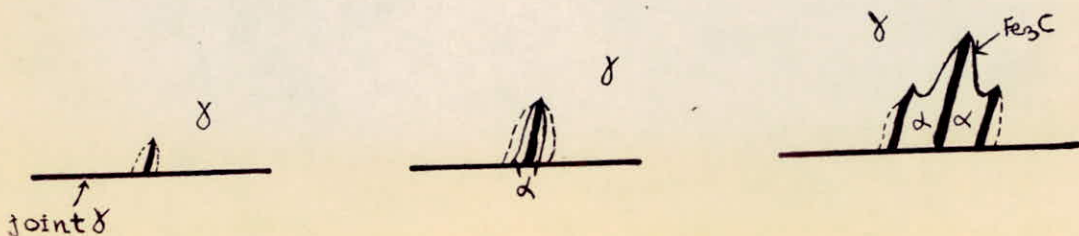
Le mécanisme de germination et croissance de la perlite se distingue par trois étapes principales :

Apparition au joints de grains de l'austénite d'un germe de cémentite dont la croissance est sensiblement normale au joint.

Germination de la phase ferritique dans la zone appauvrie en carbone autour du germe de cémentite et croissance parallèle des deux types de germes;

Apparition de nouveaux germes de cémentite dans les zones bordant les germes en croissance ; le carbone est refoulé en raison de sa faible solubilité dans la ferrite

Les colonies perlitiques se développent ainsi de proche en proche (fig:4)
(Fig:4) représentation schématisée du mécanisme de la formation de la perlite.



.../...

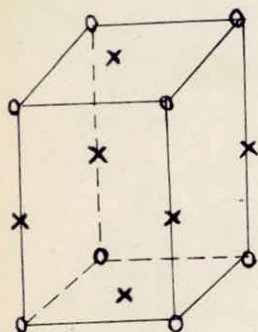
(fig:5) position des atomes de fer et des atomes de carbone dans la maille de la martensite.

Les produits de la transformations perlitiques ont une structure lamellaire plus la température de traitement isotherme est basse plus la structure ferrite-cémentite est fine. On définit ainsi les structures lamellaires de la forme eutectoïde comme perlite, sorbite et troostite, où comme perlite grossière, moyenne et fine respectivement;

- 3.2.2. La transformation martenstique : La transformation martenstique est une transformation sans diffusion et se distingue aussi bien sur le plan de la cinétique que sur celui de la structure.
- Du point de vue de la cinétique, la transformation martenstique apparaît rapidement dès que l'on dépasse par un refroidissement rapide une certaine température dite de début de transformation martenstique (M_s), mais elle ne se poursuit pas en conditions isothermes.
- Du point de vue structural, la transformation martenstique est réalisée par un basculement coopératif des atomes qui participent à la formation d'une lentille où plaquette de martensite. Dans ce mouvement le déplacement de chaque atome est inférieure à une distance interatomique. La maille de la martensite est une maille de ferrite légèrement déformée. Le réseau devient quadratique centré et les atomes de carbone y occupent quelques sites octaédriques (fig:5).
- Les dimensions de la maille dépendent essentiellement de la teneur en carbone comme le montre la (fig:6).

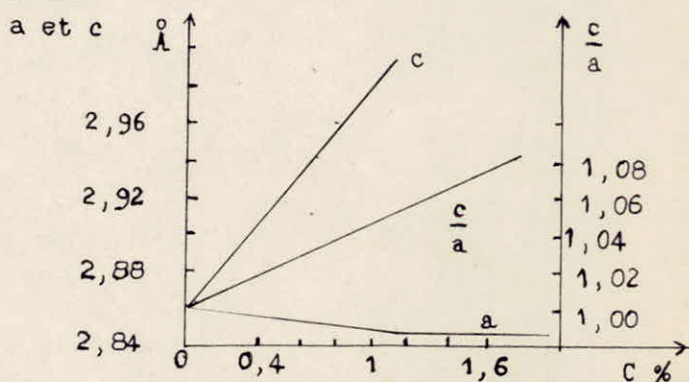
fig: 5

position des atomes de fer
positions possibles des atomes de carbone



Maille de la martensite

FIG/ 6



variations de parametre de la maille de martensite en fonction de la teneur en carbone.

Le changement de la forme du volume engendré par le cisaillement du volume initial donne naissance à des contraintes internes considérables. Ces contraintes sont accrues par la présence du carbone et confèrent à l'acier une forte dureté, mais aussi une grande fragilité.

Austénite résiduelle : La transformation martenstique s'effectue sans diffusion, on obtient ainsi une martensite qui à la même teneur en carbone que l'austénite dont elle provient. Cependant, la transformation de l'austénite n'est pas totale si on n'a pas atteint une température dite de fin de transformation martenstique (M_f), l'austénite présente à côté de la

.../...

Martensite est appelée austénite résiduelle ou austénite retenue. L'influence de la teneur en carbone de l'acier sur les points M_s et M_f est indiquée par la figure (7).

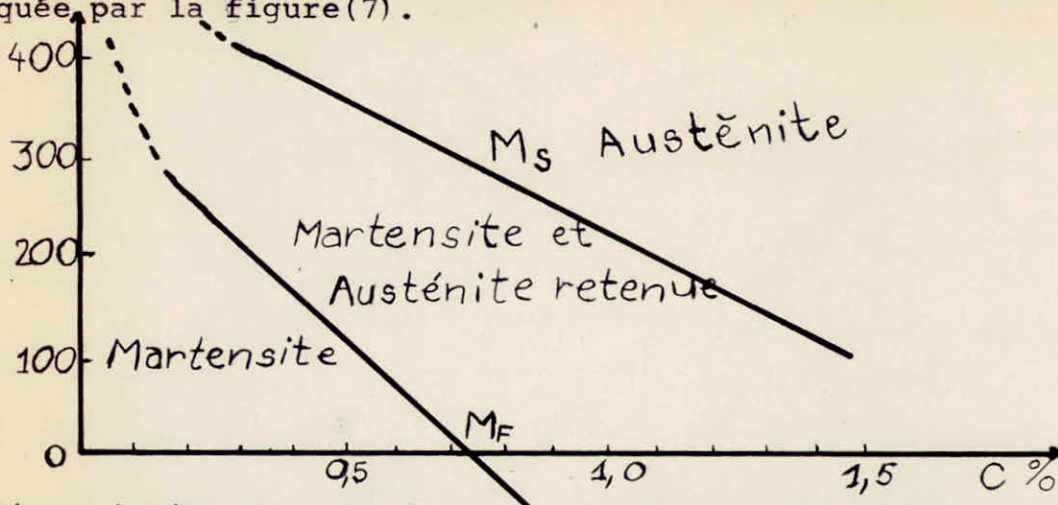


FIG (7) Variation des températures de début M_s et de fin M_f de transformation martensitique en fonction de la teneur en carbone de l'austénite initiale.

3.2.3. La transformation bainitique : Les deux types de transformation cités auparavant sont des cas limites. La transformation par diffusion qui se produit à haute température se caractérise par une mobilité importante associée à une faible force motrice responsable de la période d'incubation précédant la transformation. La transformation sans diffusion se produit à basse température où la mobilité est négligeable mais la force motrice, considérable. La transformation bainitique prend place aux températures intermédiaires et met en jeu des phénomènes de diffusion à courte distance. En effet, la ferrite se forme par cisaillement du réseau de la martensite car la mobilité des atomes est insuffisante pour permettre la diffusion. Les atomes de carbone, beaucoup plus petits peuvent encore se rassembler par diffusion dans le réseau austénitique et former une dispersion très fine de carbures. Le schéma de la figure 8. montre que pendant la croissance des cristaux de ferrite, le carbone est refoulé au front de l'interface, puis précipite sous forme de carbures.

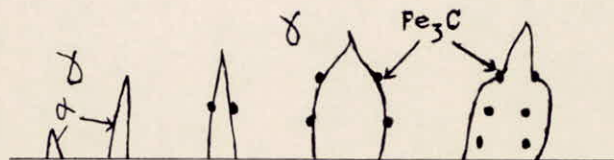
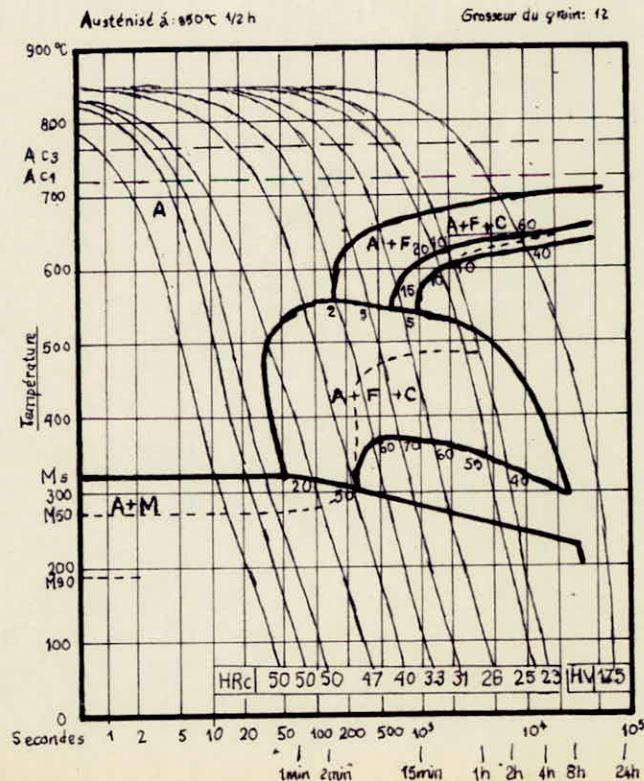


FIG (8) : représentation schématique de la formation de la bainite;

3.3 Transformation de l'austénite en refroidissement continu:

Le diagramme qui correspond à la transformation anisotherme de l'austénite s'appelle diagramme T.R.C., il est construit à partir des courbes de transformation pour les différents lois de refroidissement son intérêt pratique est de permettre la prévision des caractéristiques mécaniques et structurales d'un acier à l'issue de n'importe quel traitement de refroidissement (fig 9).

fig 9. Diagramme T.R.C. de l'acier 30 N CII.



I.4 Les traitements thermiques:

Les traitements thermiques ont une importance considérable dans l'étude des aciers. Ils présentent une grande diversité. Certains traitements sont mis en oeuvre lorsque on veut éliminer les hétérogénéités structurale et chimique dans les pièces brutes de fonderie de forge. D'autres permettent d'obtenir les structures dont les caractéristiques mécaniques répondent de la manière la plus satisfaisante à l'utilisation.

Les traitements thermiques usuels sont des combinaisons des traitements élémentaires suivantes: le recuit, la trempe et le revenu. Ces traitements comportent généralement un chauffage, un maintien isotherme à la température de traitement et un refroidissement.

4.1 L'austénisation:

L'austénisation comporte un chauffage à une température correspondant au domaine monophasé de l'austénite, et un maintien isotherme pendant un temps assez long pour permettre l'homogénéisation de l'austénite. Généralement la température d'austénisation choisie est la plus basse possible pour éviter le grossissement des grains.

4.2 Le Recuit:

Selon que les pièces sont portées à une température supérieure ou inférieure à la température AC1, on distingue plusieurs types de recuit.

4.2.1 Recuit D'homogénéisation.

Le but de ce recuit est d'éliminer la ségrégation chimique et structurale des grosses pièces forgées des pièces coulées. Sa température élevée dans le domaine austénitique a pour objectif de faciliter les diffusions.

4.2.2. Recuit D'adoucissement.

Généralement ce traitement thermique.

Est effectué par oscillation autour de la température eutectoïde (ACI). Son but est de donner à l'acier la structure correspondant à la dureté minimale afin de permettre une grande facilité de déformation ou d'usinage. On recherche la structure correspondant à la globularisation des carbures.

4.2.3. Recuit de Normalisation : Il vise à produire la structure perlitique régulière qui correspond aux propriétés mécaniques optimales. La température de chauffage pourra, suivant les cas, être peu supérieure à ACI ou AC3 ou ACm. Elle ne devra pas être trop élevée, de façon à éviter le phénomène de grossissement de grains.

4.2.4. Recuit de régénération : C'est un chauffage peu au-dessus de la limite supérieure de transformation, mais sans maintien prolongé, suivi d'un refroidissement à vitesse convenable, en vue d'affiner ou de régulariser le grain de l'acier.

4.3. La trempe : On appelle trempe la transformation de l'austénite à une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse critique de trempe VC, (vitesse minimale de refroidissement pour la formation de la martensite). Si après chauffage d'un cylindre d'acier dans le domaine austénitique, nous le plongeons dans un bain de trempe, nous constatons que la vitesse de refroidissement décroît de la périphérie au centre. Le cylindre ne sera trempé que dans la zone où la vitesse de refroidissement est supérieure à la vitesse critique de trempe VC, suivant les valeurs relative de ces deux vitesses la pénétration de trempe sera plus ou moins grande. La vitesse de refroidissement pourra être modifiée en changeant le bain de trempe. Les bains les plus employés dans l'ordre décroissant des pouvoirs refroidisseurs sont : l'eau, les solutions aqueuses, l'huile et l'air. La capacité de trempe d'un acier se définira par l'épaisseur de la couche trempée. On la mesure par l'essai Jominy consistant à refroidir l'extrémité d'une éprouvette cylindrique, normalement austénitisée, par un violent jet d'eau et à mesurer les duretés le long d'une génératrice de l'éprouvette. Les aciers au carbone ne peuvent être trempés sur de fortes épaisseurs. La pénétration de trempe n'est que de 3 à 4 mm.

4. Le revenu : La martensite dure et fragile ne peut être utilisée telle quelle l'austénite retenue est généralement en fraction trop faible pour modifier de façon importante les propriétés mécaniques de l'acier trempé. C'est pourquoi la trempe est généralement suivie d'un traitement thermique appelé revenu.

Le revenu de l'acier : Il correspond généralement à la transformation de la martensite et de l'austénite résiduelle au chauffage à une température inférieure à A1. L'état martensitique est un état instable qui ne se maintient qu'en raison de l'inertie des transformations. Si on chauffe la martensite, on peut provoquer sa transformation en des structures de plus en plus voisines de celle de la perlite. Cette transformation se fait en plusieurs stades :

Entre 100 et 250 °C : La teneur en carbone de la martensite diminue par séparation d'une phase carbure. Cette transformation s'effectue d'autant plus vite que la température est plus élevée. Le carbure précipité n'est

pas Fe_3C mais le carbure ϵ de formule Fe_2C et de structure hexagonale. Le constituant ainsi obtenu s'appelle martensite de revenu.

Entre 250° et 400° : Le réseau de la martensite se modifie et tend à se rapprocher du réseau de fer α . Les carbures produits au cours de ce stade de transformation sont de la cémentite ils sont dispersés au début de leur formation, sous forme de plaquettes extrêmement minces qui coalescent ensuite pour donner une structure globulaire. Le constituant ainsi obtenu s'appelle troostite de revenu.

Entre 400° et 650° : La coalescence des carbures provoque le grossissement de la cémentite globulaire. Le constituant ainsi obtenu, qui se présente comme une perlite globulaire très fine s'appelle sorbite de revenu.

Au delà de 650° C : Les carbures continuent à grossir et on obtient une perlite granulaire.

Entre 200° et 300°C : L'austénite résiduelle est le siège d'une transformation bainitique, comme elle le ferait par un maintien isotherme après refroidissement à la même température.

Remarque : Les structures obtenues par réchauffage de la martensite sont différentes des structures obtenues par refroidissement de l'austénite, en ce qu'elles sont des structures globulaires et non pas lamellaires.

Ces différentes transformations atténuent les propriétés mécaniques et diminuent notablement la fragilité.

5. LES ACIERS ALLIÉS /

1. Insuffisances des aciers au carbone : En principe, en choisissant correctement la nuance de l'acier au carbone et le traitement thermique, il est possible d'obtenir à peu près toutes les combinaisons de propriétés mécaniques. Cependant il n'en demeure pas moins que les aciers alliés ont connu très rapidement un important développement qui s'explique précisément par les insuffisances des aciers au carbone.

Dans l'état trempé : On peut déplorer la difficulté du traitement des pièces importantes. Les variations de vitesse de refroidissement d'un point à un autre entraînent des variations importantes sur la dureté et sur la ductilité. La vitesse critique de trempe élevée limite la pénétration de trempe à quelques millimètres. Cette pénétration est encore plus faible lorsque les grains austénitiques sont petits. Enfin les risques de tapures constituent un handicap à l'utilisation des aciers au carbone.

Dans l'état trempé et revenu : On peut reprocher aux aciers au carbone un adoucissement trop rapide au cours de la montée en température.

Les aciers alliés : seront utilisés de préférence aux aciers au carbone dans les applications faisant appel aux propriétés suivantes :

Résistance à l'usure : La présence de carbures alliés, même dans la martensite renforce la résistance à l'usure même à dureté égale.

Résistance aux attaques chimiques :

Résistance mécanique aux températures élevées : L'acier au carbone flue à 400 °C.

Résilience à basse température : L'acier au carbone est fragile à basse température .

5 2.

Solubilité des éléments d'alliage dans le fer : Les éléments introduits dans le fer sont caractérisés par leur action sur les points de transformation du fer et leur solubilité dans le fer.

Les éléments gammagènes : sont ceux qui augmentent l'écart de température entre les pts. de transformation A3 et A4. Ces éléments agrandissent le domaine de stabilité de la structure γ , exemples : Ni, Mn, Co, C, Cu.

Les éléments alphagènes : sont ceux qui rapprochent les températures des points A3 et A4, diminuant le domaine de stabilité de la structure γ exemples : Cr, Si, Mo, S

Éléments provoquant un durcissement structural : Ce sont les éléments dont la limite de solubilité dans le fer décroît lorsque la température baisse. Ces éléments entraînent un durcissement par précipitation dans l'acier trempé. Les plus importants sont : AZOTE, CARBONE, TITANE et TUNGSTÈNE.

3. Solubilité des éléments d'alliage dans l'acier :

Éléments carburiqènes : On appelle éléments carburiqènes, les éléments qui forment dans les alliages Fe-C des carbures stables, dont les principaux par ordre de stabilité croissante : Mn, Cr, W, Mo, V, Ti, Zr, Ta et Nb.

4. Influence des éléments d'alliage dans les aciers Recuits :

4.1. Répartition des éléments d'alliage dans l'acier : On définit un coefficient de partage des éléments représentant le rapport des concentrations d'un élément dans la phase carbure et dans la phase ferrite.

Donc suivant les valeurs de ce coefficient on distingue :

Les éléments non carburiqènes : (Si, Al, Ni, Cu, Co).
qui ont un coefficient de partage très petit.

Les éléments faiblement carburiqènes : (Mn, Cr, W et Mo).
qui ont un coefficient de partage toujours plus grand que l'unité.

Les éléments fortement carburiqènes : (V, Ti, Zr, Ta, Nb).
qui ont un coefficient de partage très grand.

4.2. Influence des éléments d'alliage sur la ferrite : Les éléments d'alliage dissous dans la ferrite en quantité dépendant de leur coefficient de partage, entraînent un durcissement de la ferrite.

4.3. Influence des éléments d'alliage sur les carbures : Les éléments d'alliage formant des carbures stables accroissent la résistance à l'usure car les carbures formés sont durs et fragiles.

4.4. Influence sur les propriétés des aciers recuits ou normalisés : La dureté et la résistance croissent, la ténacité et la ductilité décroissent.

5. Influence des éléments d'alliage sur l'austénisation :

5.1. Composition de l'austénite : La concentration en carbone de l'eutectoïde est abaissée par tous les éléments d'alliage et surtout par ceux qui sont fortement carburiqènes. Enfin l'élévation par les éléments alphagènes et l'abaissement par les gammagènes de la température eutectoïde est un facteur important pour la conduite des traitements thermiques.

5.2. Homogénéisation de l'austénite : Elle est plus difficile à réaliser qu'avec les aciers au carbone car elle implique la diffusion lente d'atomes beaucoup plus gros que le carbone. Il faut maintenir les aciers alliés suffisamment longtemps à la plus haute température possible.

5.3. Croissance et grosseur des grains d'austénite : La présence des carbures ou des inclusions insolubles est un obstacle au grossissement du grain.

Dans la mesure où, au cours du traitement d'homogénéisation on évitera la dissolution, complète des carbures on aura facilement un grain fin

5.6. Influence des éléments d'alliage sur les diagrammes TTT : Une augmentation de la grosseur des grains, en général, a pour effet de déplacer les courbes vers la droite le rôle des éléments d'alliage est très complexe. Ils peuvent stabiliser l'austénite (Ni), ou diminuer la vitesse de diffusion (Cr), ce qui se traduit par le même effet d'un point de vue pratique, il est intéressant de déplacer vers la droite les courbes de transformation car cela rend possible des trempes par simple refroidissement à l'air. Bien sûr, les éléments d'alliage abaissent M_s , la formule de Nehrenberg rend compte de ce fait :
 $M_s (^{\circ}C) = 500 - 300 C - 33 Mn - 22 Cr - 17 Ni - 11 Si - 11 Mo$.

5.7. Influence des éléments d'alliage sur la trempabilité : La pénétration de trempé est une conséquence de la position des courbes de transformation dans le diagramme TTT généralement tous les éléments d'alliage favorisent la trempabilité, C.à.D pour une même vitesse de refroidissement la profondeur de la couche trempée est plus importante.

5.8. Influence des éléments d'alliage sur le revenu : D'une manière générale, les éléments d'alliage freinent l'effet adoucissant du revenu, les aciers faiblement alliés donne des courbes de revenu analogues à celle des aciers au carbone. Les aciers fortement alliés présentent le phénomène de durcissement secondaire (fig:10). Les éléments carburigènes entraînent durcissement secondaire.

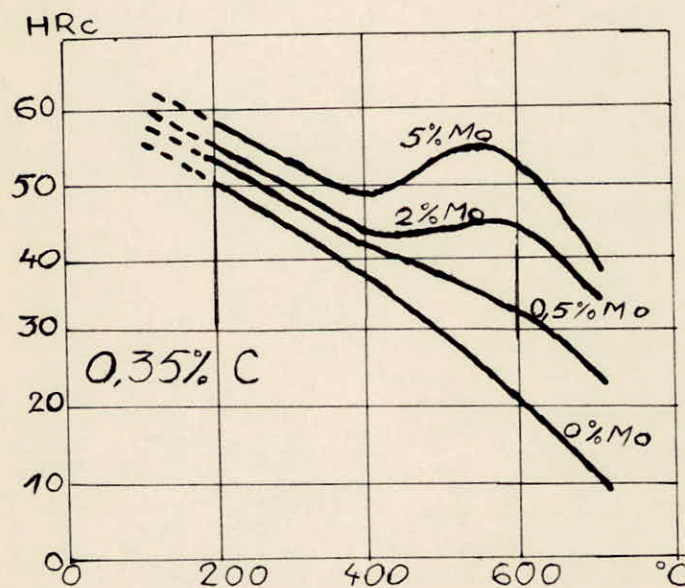


FIG / 10 / Courbes de revenu d'aciers au Molybdène à 0,35 % de carbone.

- CHAPITRE - II -

MATERIAUX ET TECHNIQUES

EXPERIMENTALES

II - 1 - LES MATERIAUX -

La désignation des aciers a été standardisée par la norme (NFAO2 - OO5) - Décembre 1973.

Désignation Conventionnelle des aciers -

Aciers non alliés : Ce sont les aciers dont aucun élément d'alliage ne dépasse en général la proportion de 0,5 % en masse. Ces aciers sont désignés par le symbole XC suivi d'un nombre égal à 100 fois la teneur moyenne centésimale en carbone.

Exemple : XC 38 : teneur moyenne en carbone 0,38%.

Aciers faiblement alliés : Ce sont les aciers dont aucun élément d'alliage ne dépasse la proportion de 5 % en masse.

Leur désignation comprend généralement :

- La teneur moyenne en carbone en pourcentage multiplié par 100,
- Une suite de lettres qui rappelle le où les éléments d'addition principaux . Ces symboles sont rangés dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- Un où deux nombres (rarement trois) qui rappellent les teneurs moyennes des éléments les plus importants par leur action. Ces nombres sont égaux aux teneurs en %. correspondantes multipliés par les coefficients 4 où 10 suivant l'élément . Ils sont rangés dans le même ordre que les symboles du groupe précédent.

Exemples : 45 M5 = C : 0,45 % ; Mn : 1,25 %

35 CD4 = C : 0,35 % ; Cr : 1 %

Mo en petite quantité.

- Aciers fortement alliés : Ce sont les aciers dont un élément d'addition au moins dépasse 5 % en masse leur désignation abrégée comprend :

- La lettre initiale Z
- La teneur moyenne en carbone en pourcentage multipliée par 100;
- le où les symboles des éléments d'alliage présents classés dans l'ordre décroissant des teneurs.
- où des groupes de nombres de deux chiffres qui sont égaux aux teneurs moyennes % en ces éléments ; classés dans l'ordre des symboles en lettres précédents (en général un où deux groupe exceptionnellement trois

Exemple : Z6 CN 18.09 = C : 0,06 % ; Cr : 18 % ; Ni : 9 %

Dans notre étude, les matériaux utilisés sont l'acier 45 M5 et l'acier 35 CD dont les compositions chimiques exactes sont :

Acier 45 M5 :

C : 0,46 % ; Mn : 1,40 % ; Si : 0,23 % ; S : 0,025 %

P : 0,015 % ; Ni : 0,02 % ; Cr : 0,15 % ; Cu : 0,19 %

Mo : 0,07 %

Acier 35 CD 4 :

C : 0,36 % ; Mn : 0,70 % ; Si : 0,30 % ; S : 0,010 %

P : 0,019 % ; Ni : 0,17 % ; Cr : 1,00 % ; Mo : 0,18 %

Ces aciers proviennent de l'étranger, ils sont achetés au niveau de la S.N.S par la SONACOME CVI ROUBA.

Ces aciers appartiennent à la classe des aciers de construction pour traitements thermiques ; c.à.d qu'ils sont utilisés à l'état trempé et revenu.

Ils sont surtout utilisés en construction automobile (Vilbrequins, engrenages; pignons; arbres d'essieu; boulons, vis, écrous).

A la réception les matériaux avaient les caractéristiques suivantes :

Acier 45 M 5 :

- Il avait la forme d'étriers en U filés à leur extrémité.
- Cet acier avait subi un laminage à chaud qui lui a donné sa forme actuelle de barres rondes de diamètres D = 15 mm. (fig.11).
- Les étriers ont été mis sous forme d'un U par un cintrage à chaud.

Acier 35 CD 4 :

-
- Cet acier avait subi un laminage à chaud qui lui avait donné sa forme actuelle de barres rondes de diamètres $D = 25 \text{ mm}$. (fig.12).

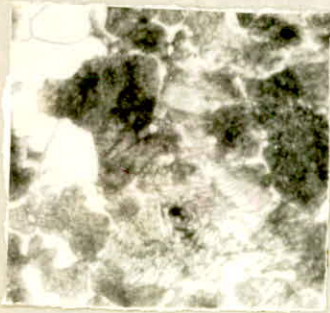


Fig.11. Acier 45 M 5
Après Recuit N
Attaque Nital X 500

Structure : Ferrite + Pearlite

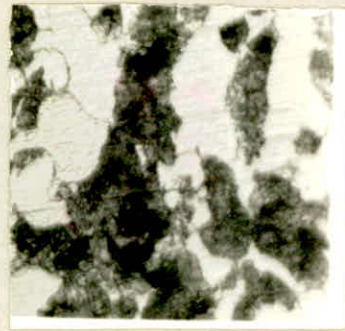


Fig.12 : Acier 35 CD 4
Après Recuit N
Attaque au Nital X500

Structure : Ferrite + Pearlite

L'Observation des aciers après Recuit de Normalisation révèle la présence d'une structure en bandes intercalées de ferrite et de perlite caractéristique de leur mise en forme par laminage.

Les zones de concentrations différentes se sont allongées dans le sens du laminage de sorte que le gradient de concentration augmente dans le sens transversal.

II.2. - TECHNIQUES EXPERIMENTALES -

Dans toute étude, des traitements thermiques, il est nécessaire de connaître les méthodes expérimentales scientifiques employés par l'étude où le contrôle des pièces traitées. Parmi, ces méthodes ce sont celles donnant les caractéristiques mécaniques, qui ont un intérêt capital.

2.1 - Les fours de traitements thermiques -

Les fours utilisés sont ceux du Laboratoire de contrôle à la SONA-COME CVI ROUIBA, on distingue :

Le four de trempe : c'est un four électrique de laboratoire de marque "HIRSOVICS". Il était utilisé pour les traitements de Recuit N et de trempe.

Le four de revenu : c'est un four à convection de marque "HIRSOVICS".

Les traitements thermiques effectués sont :

Recuit N (de Normalisation)

- Acier 45 M 5

Température d'austénisation $T = 870^{\circ}\text{C}$.

Temps de maintien $t = 15 \text{ mn}$.

- Acier 35 CD 4

Température d'austénisation $T = 890^{\circ}\text{C}$.

Temps de maintien $t = 25 \text{ mn}$.

- Le refroidissement est lent dans le four.

.../...

Trempe :

- Acier 45 M 5

Température de trempe : = 850 °C.

Temps de maintien = 15 mn.

- Acier 35 CD 4

Température de trempe = 870°C.

Temps de **maintien** = 25 mn.

- Le **refroidissement** a été effectué :
à l'eau, à l'huile, à l'air.

Le Revenu

Le revenu n'est effectué que pour le trempe à l'huile. Les différentes **tempé-**
ratures de revenu sont :

t°C = 100, 200, 300, 400, 500, 600 °c.

Le temps de maintien = 1 h 30 mn.

Le refroidissement est lent dans le four.

Remarque.

Les conditions de traitements thermiques sont choisis de telle manière
qu'on puisse atteindre les objectifs suivants :

- Avoir le plein effet de ces traitements.
- Obtenir les caractéristiques **mécaniques optimales**.

Recuit N et trempe. Pour ces traitements, la basse température d'austé-

nisation et le temps de maintien réduit ont pour but l'affinage du grain de
façon à avoir une grande résilience.

Recuit N. Dans ce traitement, le refroidissement lent dans le four a pour

but l'obtention d'une microstructure ferrito-perlitique correspondant au
diagramme d'équilibre.

Revenu.

- Le temps de maintien assez-long a pour but l'obtention du plein effet de ce traitement.
- Le refroidissement lent au four dans ce cas a pour but d'éviter la formation de nouvelles contraintes et d'éviter d'engendrer des déformations.

La trempe à l'huile a été retenu pour faire le revenu pour les raisons suivantes :

- La trempe à l'eau donne naissance à des tapures.
- La trempe à l'air donne des duretés faibles.

Acier 45 M5 ; HB = 241 (HRC = 24)

Acier 35 CD4 ; HB = 269 (HRC = 28)

Pièces traitées : Les pièces ont subies les traitements successifs suivants :

Recuit N; la trempe et le revenu. Le Recuit N est justifié par des raisons de comparaison, car il permet d'avoir dans les deux aciers la même structure de départ c.à.d. La structure ferrito-perlitique.

2.2. Essai de traction.

L'essai de traction a été effectué avec une machine d'essais universelles, type U5 Vh DR, marque SKF - MAB. C'est une machine hydraulique pour essais de traction, compression, flexion.....ect..

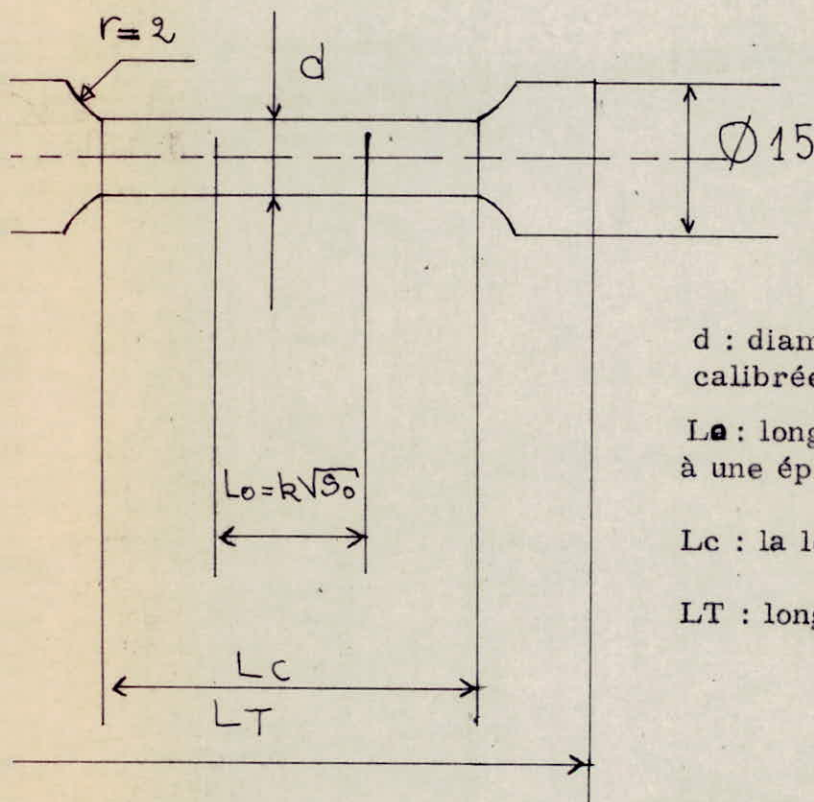
La mesure des efforts est assurée par un dynamomètre à ressort de haute précision. La machine comprend trois sensibilités : 40; 200 ; 400 KN.

Principe de l'essai de traction.

L'essai a pour but de déterminer, sur une éprouvette certaines caractéristiques mécaniques du matériau, en le soumettant à un effort lent et continu dirigé suivant l'axe longitudinal, le plus souvent jusqu'à rupture.

.../...

Dimensions des éprouvettes :



d : diamètre de la partie calibrée.

L_o : longueur entre repère correspondant à une éprouvette proportionnelle ($k = 5,65$)

L_c : la longueur calibrée

L_t : longueur totale.

La norme NF AO 3 - 151 donne les dimensions de l'éprouvette de traction normalisée (voir tableau).

Dimensions	d (mm)	L_o (mm)	S_o (mm)	L_c (mm)	L_t (mm)
éprouvette normalisée	$10 \pm 0,075$	$50 \pm 0,5$	78,5	70	130
éprouvettes utilisées	$10 \pm 0,075$	$50 \pm 0,5$	78,5	90	130

Les éprouvettes utilisées sont de formes cylindriques; pour des raisons d'incommodité avec les mores de la machine de traction, on était obligé de prendre une longueur L_c non normalisé. L'essai de traction a été effectué avec une vitesse de $0,5 \text{ da N/mm}^2 \text{ s}$. Conformément à la Norme NF A 03 - 151 qui exige $v \leq 3 \text{ da N/mm}^2 \text{ s}$;

Les caractéristiques mesurées sont :

1°) La résistance à la traction.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ en daN/mm}^2$$

F_m : étant la charge à la rupture.

S_0 : la section initiale de l'éprouvette.

2°) L'allongement après ruptures.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \text{ en } \%$$

L_u : étant la longueur entre repère après rupture.

Chaque valeur prise correspond à la moyenne de trois mesures.

La lecture des valeurs de F_m est faite sur cadran gradué.

2.3. Essai de résilience.

L'appareil utilisé est le mouton-pendule charpy pour essai de choc, avec une énergie disponible de 30 kgm de marque TRAYVOU.

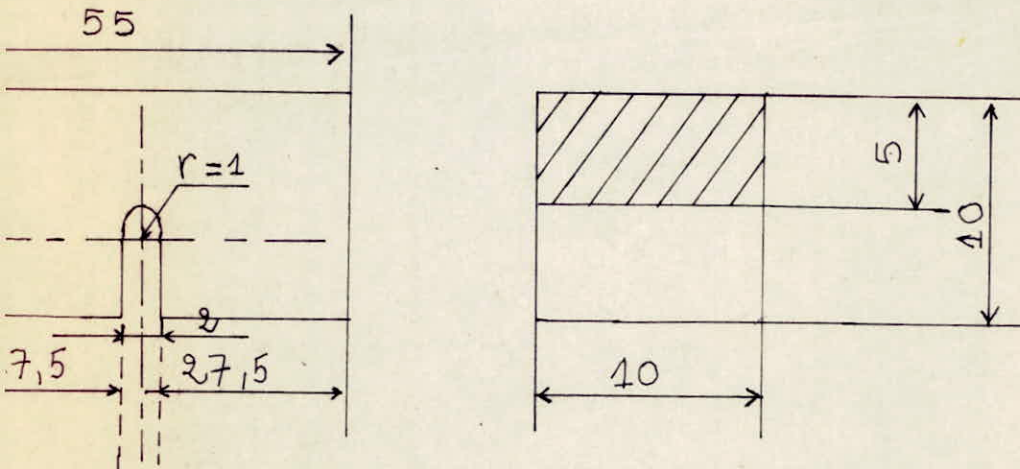
Principe de l'essai de résilience.

L'essai de résilience consiste à rompre en flexion par choc une éprouvette prismatique entaillée et à mesurer le travail (WR) absorbé par la rupture.

.../...

Eprouvette.

On a utilisé l'éprouvette K.C.U normalisé; Norme
NF AO3 - 156



Le plus souvent on mesure un coefficient (K) appelé résilience, définie comme étant l'énergie de rupture rapportée à l'unité de section.

$$K = \frac{WR}{S} \text{ en (daj/Cm}^2\text{)}.$$

En mesurant les angles de remonter du pendule; On arrive à obtenir les valeurs de WR et K à l'aide de tableau de correspondance.

2.4. Essai de durezza.

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

Essai de durezza Brinell.

L'appareil utilisé est de marque SKF - MAB, il permet de travailler en marche "manuelle" où automatique".

.../...

Les essais peuvent-être effectués sous les charges réglables suivantes :
187,5; 250; 500; 750; 1000 et 3000 Kg

Principe de l'essai de dureté Brinell.

Consiste à imprimer dans la pièce une bille en acier de diamètre D sous une charge (F) et à mesurer le diamètre d de l'empreinte après suppression de (F).

Le nombre de Brinell.

Il est défini par le quotient de la charge (F) exprimée en da N par l'aire en mm² de l'empreinte considérée comme une calotte sphérique d'où
 $HB = \frac{F}{S}$ où $HB = \frac{2F}{D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$

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

On a effectué l'essai Brinell normal suivant la norme NF A03 - 152 C.à.d avec

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

La mesure des diamètres d'empreinte a été effectuée à l'aide d'un petit microscope de poche, la valeur des duretés HB a été obtenue à l'aide d'un tableau de correspondance.

On a utilisé l'appareil de dureté Brinell pour la mesure des duretés correspondant à HR C < 50.

Essai de dureté ROCKWELL.

L'appareil utilisé est de marque stokvis. Il permet l'application des charges suivantes :

15; 30; 45; 60; 100; 150; 187,5 Kg.

.../...

Principe de l'essai de dureté ROCKWELL.

Cet essai consiste à imprimer dans la pièce étudiée un pénétrateur de type normalisé, à mesurer l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration et en déduire le nombre HR.

Dans notre étude, le pénétrateur est un cône droit en diamant d'angle au sommet 120° .

L'exécution a été effectuée de la façon suivante :

- Application d'une précharge $p = 10 \text{ daN}$
- Application d'une surcharge $P = 140 \text{ daN}$
- Suppression de la surcharge $P = 140 \text{ daN}$
- On lit directement sur un comparateur le nombre HRC.

On a utilisé l'appareil de dureté ROCKWELL pour la mesure des duretés correspondant à $\text{HRC} \geq 50$.

2.5. Microscopie Optique.

Les échantillons d'aciers traités sont observés dans un microscope optique de type axiomat IAC (ZEISS). C'est un microscope inversé à lumière réfléchie muni d'une chambre photographique.

Mais avant l'observation, une préparation préalable est nécessaire. La préparation comprend l'enrobage; le polissage et l'attaque chimique.

Enrobage : L'enrobage a été réalisé à froid à l'aide d'une résine de

type technovit 4004.

Polissage : Le polissage mécanique est effectué sur une série

échelonnée de papiers abrasifs.

.../...

Les numéros de papier utilisés sont : 80, 180, 1000.

A chaque fois que l'on change de papier, on tourne l'échantillon à 90° par rapport à la position précédente.

Le finissage est réalisée à la pâte diamantée.

Attaque : Le réactif d'attaque adopté est le nital dont la composition chimique est la suivante :

- Acide nitrique HN 03 4 ml
- Ethanol C2 H 50 H 96 ml

Le nital révèle la perlite qui apparaît sous forme de lamelles alternées, la ferrite apparaît claire mais les joints des grains s'observent facilement lorsque la durée de l'attaque est suffisante.

La structure en aiguilles de la martensite est révélé très rapidement par ce réactif.

. CHAPITRE III .

- RESULTATS ET INTERPRETATIONS

INTRODUCTION . /

Généralement les cahiers des charges des grandes entreprises métallurgiques basent les conditions de réception et d'emploi sur les résultats de mesure des propriétés essentielles suivantes :

Résistance à la rupture	R _m
Limite élastique	R _e
Allongement relatif	A %
Résilience	K
Dureté	H

Si la pièce doit être soumise à des efforts statiques, il faut en déterminer : la résistance à la traction, la limite élastique, l'allongement relatif.

Si elle doit subir des efforts dynamiques, il faut connaître en plus sa résilience.

Si elle doit présenter une certaine résistance à l'usure, on doit connaître sa dureté. Généralement, l'essai à la traction, l'essai de dureté et l'essai de résilience suffisent pour déterminer les aptitudes mécaniques d'un acier.

Dans notre étude, on n'a pas pu mesurer la limite élastique R_e, car sa détermination précise est très difficile.

III. 1. COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES MECANQUES ET METALLURGIQUES
DES ACIERS 45 M5 ET 35 CD4 APRES RECUIT DE NORMALISATION.

1.1. Résultats expérimentaux :

: Nature et	:	HB	:	HRC	:
: état de l'acier	:		:		:
: 45 M5 Recuit N	:	187	:	< 18	:
: T = 870°C	:		:		:
: 35 CD4	:	170	:	< 18	:
: Recuit N	:		:		:
: T = 890°C	:		:		:
:	:		:		:

1.2. Interprétation :

Pour les deux aciers, on observe une structure ferrito perlitique (voir fig. 11 et fig. 12) (chapitre II). Cette structure justifie les valeurs très faibles de dureté obtenu.

La perlite est un constituant plus dur que la ferrite.

L'acier 45 M5 est plus chargé en carbone que le 35 CD4 donc d'après le diagramme Fe - Fe 3C on peut affirmer que la proportion de perlite est plus grande dans l'acier 45 M5.

Cette dernière constatation permet de justifier la relation entre les duretés c à d. La dureté HB (45 M5) est plus grande que HB (35 CD4).

C O N C L U S I O N /

Après traitement de Recuit de Normalisation, on obtient un état des aciers qui est très doux, cet état permet une grande facilité de déformation.

III. 2. COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES MECANQUES ET

METALLURGIQUES DES ACTERS 45 M5 ET 35 CD4

APRES REFOIDISSEMENT A L'AIR CALME.

2.1. Résultats expérimentaux :

: Nature et état	:	:	:
: de l'acier	:	HB	HRC
: 45 M5 refroidi à	:	:	:
: l'air calme	:	241	24
: T = 850°C	:	:	:
: 35 CD4 refroidi à	:	:	:
: l'air calme	:	269	28
: T = 870°C	:	:	:

2.2. Interprétation :

On observe des valeurs de dureté assez faible, ce qui est en accord avec les microstructures obtenus. (fig.17) et (fig. 18).

L'acier 45 M5 présente une microstructure de ferrite + perlite fine.

L'acier 35 CD4 présente une microstructure de bainite supérieure, cette dernière apparaît sous forme de paille coupée, dans laquelle les particules de carbures forment non pas des lamelles comme dans la perlite, mais des particules étroites isolées.

C'est cette petite différence qui explique le faible écart entre les duretés.

C O N C L U S I O N /

Le refroidissement à l'air des aciers 45 M5 et 35 CD4 donne des duretés assez faibles qui permettent une grande facilité d'usinage.

III. 3. COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES MECANQUES ET
METALLURGIQUES DES ACTERS 45 M5 ET 35 CD4
APRES TREMPES

Le volume unitaire de la martensite est plus grand que celui de l'austénite dont elle provient, cette augmentation de volume unitaire lors de la formation de la martensite est l'une des raisons principales qui conditionnent les fortes contraintes internes produites par la trempe, qui déforment les pièces et même sont à l'origine des tapures.

Ces contraintes sont accrues par la présence d'atomes interstitiels de carbone dans le réseau de la phase α .

Ces contraintes confèrent à l'acier une forte dureté et une grande fragilité.

3.1. Résultats expérimentaux :

: Nature et	:	:	:	: Nature et	:	:	:
: état de l'acier	:	HB	: HRC	: état de l'acier	:	HB	: HRC
:	:	:	:	:	:	:	:
: 45 M5	:	:	:	: 35 CD4	:	:	:
: trempe à l'eau	:	600	: 59	: trempe à l'eau	:	512	: 52
: T = 850°C	:	:	:	: T = 870°C	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:
: 45 M5	:	:	:	: 35 CD4	:	:	:
: trempe à l'huile	:	566	: 57	: Trempe à l'huile	:	477	: 49
: T = 850°C	:	:	:	: T = 870°C	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:

3.2. Interprétation :

Les valeurs élevées de la dureté sont en accord avec la structure martensitique observée (fig. 19, fig 20, fig. 21, fig.22).

Les duretés obtenus par trempe à l'eau sont plus grande que celles obtenus par trempe à l'huile ; cette différence provient du fait que la trempe à l'eau plus énergique donne naissance à une structure martensitique plus fine donc plus dur.

La dureté de la martensite augmente avec l'accroissement de sa teneur en carbone. Cette constatation permet d'expliquer pourquoi l'acier 45 M5 est toujours plus dur que le 35 CD4 à l'état trempé.

Les aciers 45 M5 et 35 CD4 ont une teneur assez élevée en carbone, les éléments d'alliage Mn et Cr présents augmentent la trempabilité, la trempe à l'eau constitue un mode de refroidissement très énergique.

Ce sont tous ces facteurs qui ont favorisés l'apparition des tapures au cours de la trempe à l'eau des aciers 45 M5 et 35 CD4.

La trempe à l'huile correspond à une vitesse de refroidissement modérée, cette vitesse assez lente est défavorable à la formation des tapures.

C O N C L U S I O N /

Les tapures sont un défaut incorrigible, donc il faut éviter des trempes à l'eau pour les aciers 45 M5 et 35 CD4.

Une trempe à l'huile serait la plus convenable, après trempe l'acier est extrêmement dur et fragile, il ne pourrait en aucun cas servir aux emplois auxquels il était destiné ; il faut pour supprimer ces inconvénients, lui faire subir un nouveau traitement appelé le revenu.

III. 4. COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES MECANQUES ET METALLURGIQUES DES ACIERS 45 M5 ET 35 CD4 APRES TREMPÉ ET REVENU.

La trempe a été effectué à l'huile.

Les différentes températures de revenu sont .:
100, 200, 300, 400, 500, 600 C°.

On appelle revenu le chauffage de l'acier trempé à une température inférieure à A1, le maintien à cette température et le refroidissement ultérieur. Le revenu est une opération finale de traitement thermique.

Son but est l'obtention des propriétés mécaniques requises.

De plus, il supprime complètement ou partiellement les contraintes internes dues à la trempe.

4. 1 - Résultats expérimentaux.

Nature et état de l'acier	HB	HRC	Rm ($\frac{\text{dan}}{\text{mm}^2}$)	A%	K ($\frac{\text{da}}{\text{cm}^2}$)
45M5 revenu à 100° C	543	55	172	1	1,80
45M5 revenu à 200° C	495	51	156	2	6,28
45M5 revenu à 300° C	444	47	135	4	1,28
45M5 revenu à 400° C	375	40	116	7	2,36
45M5 revenu à 500° C	332	36	97	11	4,92
45M5 revenu à 600° C	293	31	87	16	7,16

Nature et état de l'acier	HB	HRC	Rm (dan) mm ²	A%	K ^(da i) cm ²
35CD4 revenu à 100°C	460	48	136	2	3,58
35CD4 revenu à 200°C	430	45	133	3	3,92
35CD4 revenu à 300°C	402	43	124	5	4,58
35CD4 revenu à 400°C	387	41	117	6	7,16
35CD4 revenu à 500°C	340	37	100	10	8,78
35CD4 revenu à 600°C	302	33	91	13	10,48

Ces différents résultats sont résumés par les courbes de la fig. 13, fig. 14, fig. 15, et fig. 16.

4. 2. - Interprétation.

L'examen des différentes courbes de revenu permet d'affirmer que les propriétés mécaniques d'un acier obtenues par revenu dépendent essentiellement de la température à laquelle a lieu ce traitement.

On l'explique par les différents phénomènes qui accompagnent la décomposition de la martensite au cours du revenu (voir paragraphe . 4. 4. revenu - chapitre I).

Le revenu à basse température : Dans ce traitement, la température s'étend jusqu'au environ de 200°C. Ce revenu diminue les contraintes internes, transforme la martensite de trempe en martensite de revenu (voir fig. 23, 24, 25, 26) . Ce revenu permet de conserver une dureté et une résistance sensiblement élevées, la ductilité et la résilience sont quelque peu améliorées.

Le revenu à températures intermédiaires.

La température de ce traitement varie entre 200° et 400°C environ. La structure, assurée par ce traitement est la troostite de revenu. (voir fig. 27, 28, 29, 30.)

La dureté et la résistance restent élevées.

La ductilité et la résilience sont améliorées. cependant aux environ de 300°C on observe une dégradation brusque de la résilience pour l'acier 45 M5. Ce phénomène est appelé fragilité de revenu. La cause de la fragilité de revenu est très mal connue, mais elle semble coïncider avec le début de la précipitation de Fe₃C. Certains chercheurs, suppose que la formation de cémentite s'accompagne de l'apparition de long des anciens joints austéritiques d'un liseré de ferrite formant ligne de moindre résistance, expérimentalement, on a observé qu'une faible addition en MO inhibe le phénomène de fragilité au revenu. C'est ce qui justifie l'allure normale de la courbe de résilience obtenue pour l'acier 35 CD 4.

au microscope pour les lames revenu 300°C

Le revenu à haute température :

La température de ce traitement varie entre 400°C et 600°C environ. Ce traitement donne à l'acier la structure de sorbite de revenu (voir : fig. 31, 32, 33, 34.) ce traitement altère.

Sensiblement la dureté et la charge à la rupture tout en améliorant l'allongement et la résilience car il supprime presque complètement les contraintes résiduelles produites par trempe.

Conclusion : Pour éviter le phénomène de fragilité de revenu, il est conseillé de ne pas effectué le revenu aux températures intermédiaires pour l'acier 45 M5.

- La comparaison des caractéristiques mécaniques des aciers 45 M5 et 35 CD4 à l'état trempé et revenu est exprimé clairement par les différentes courbes de revenu (voir fig. 13, 14, 15, 16)
- Le tracé préalable des différentes courbes de revenu permet de résoudre plusieurs problème d'ordre technologique.

4. 3. Application.

Un exemple de problème d'ordre technologique est celui que m'a proposé la Sonacome . C. V. I Rouiba.

Il consiste à remplacer la nuance d'acier 35 CD4 par la nuance 45 M5 pour la fabrications de certaines pièces mécaniques.

Les caractéristiques mécaniques exigées sont les suivantes //:

Dureté : 295 - 352 HB
Rm : 100 - 120 daN
A% : $\geq 9\%$

.../...

La solution du problème consiste à déterminer le mode de traitement thermique que doit subir la nuance d'acier 45 M5 pour avoir les caractéristiques mécaniques requises

Pour cela, il suffit de déterminer la température de revenu adéquate désignons par $t^{\circ}\text{C}$ cette température, l'examen des courbes de revenu permet d'écrire les relations mathématiques suivantes =

$$295 \leq \text{dureté} \leq 352 \text{ HB} \Leftrightarrow$$

$$31 \leq \text{dureté} \leq 38 \text{ HRC} \Leftrightarrow$$

$$445 \leq t^{\circ}\text{C} \leq 605^{\circ}\text{C}$$

$$100 \leq R_m \leq 120 \text{ (daN/mm}^2\text{)} \Leftrightarrow$$

$$375^{\circ}\text{C} \leq t^{\circ}\text{C} \leq 480^{\circ}\text{C}$$

$$A\% \geq 9\% \Leftrightarrow$$

$$t^{\circ}\text{C} \geq 455^{\circ}\text{C}$$

La combinaison de toute ces conditions mathématique donne la valeur de $t^{\circ}\text{C}$ recherchée. On obtient : $t^{\circ}\text{C} = 455 - 480^{\circ}\text{C}$.

Après ce calcul on peut affirmer que :

un acier 45 M5 ayant subi les traitements suivants.

- Un recuit de normalisation à $T^{\circ}\text{C} = 870^{\circ}\text{C}$
- Une trempe à l'huile à $T^{\circ}\text{C} = 850^{\circ}\text{C}$
- Un revenu à $T^{\circ}\text{C}$ comprise entre 455 et 480°C donne les caractéristiques mécaniques suivantes :

Dureté : 295 - 352 HB.

R_m : 100 - 120 daN

$A\%$: $\geq 9\%$

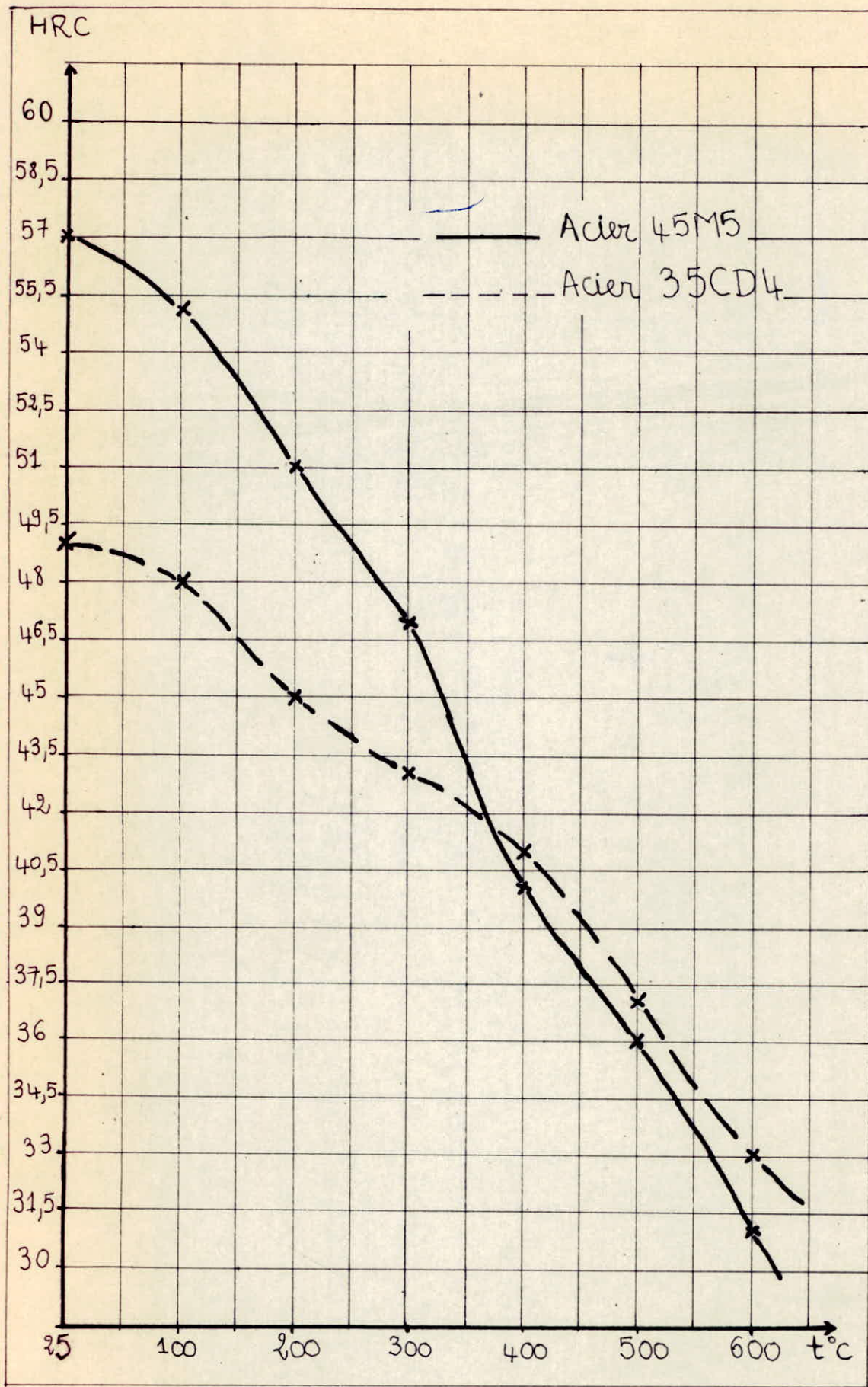


Fig. 13 : Evolution de la dureté des aciers 45 M5 et 35 CD4 en fonction de la température de revenu.

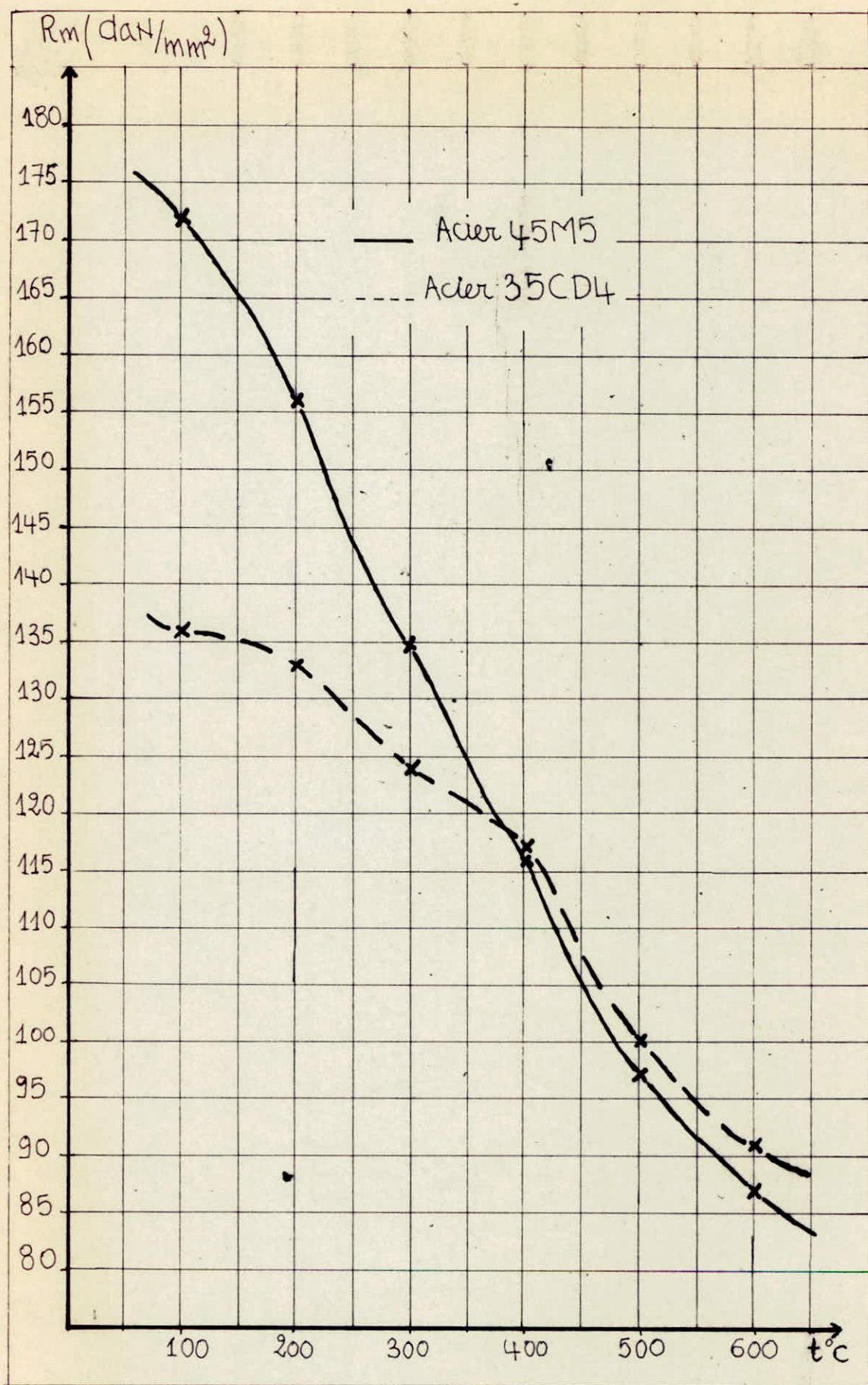


Fig. 14 : Evolution de la résistance à la traction des aciers 45 M5 et 35 CD4 en fonction de la température de revenu.

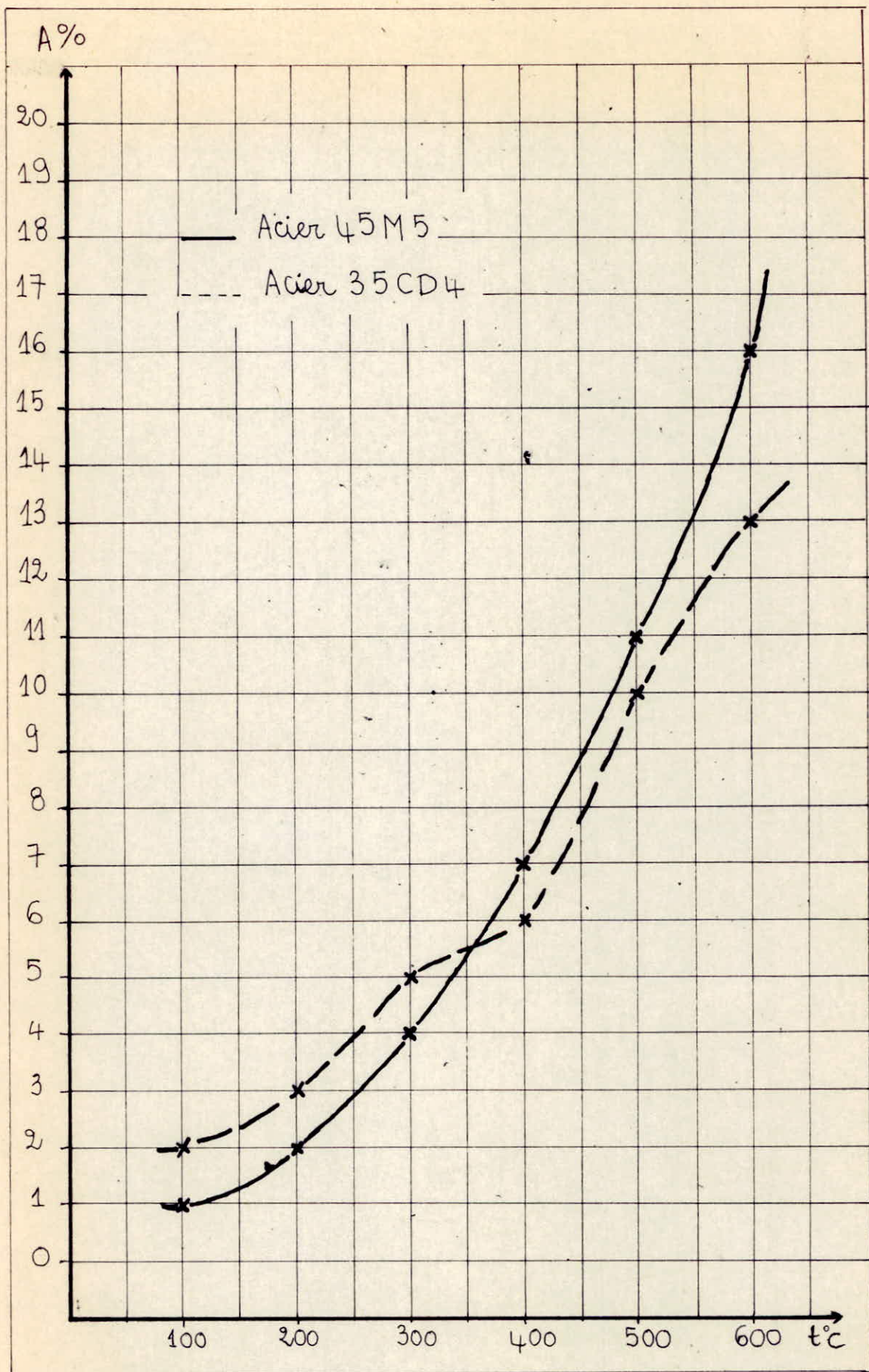


Fig. 15 : Evolution de l'allongement en % des aciers 45 M5 et 35 CD4 en fonction de la température de revenu.

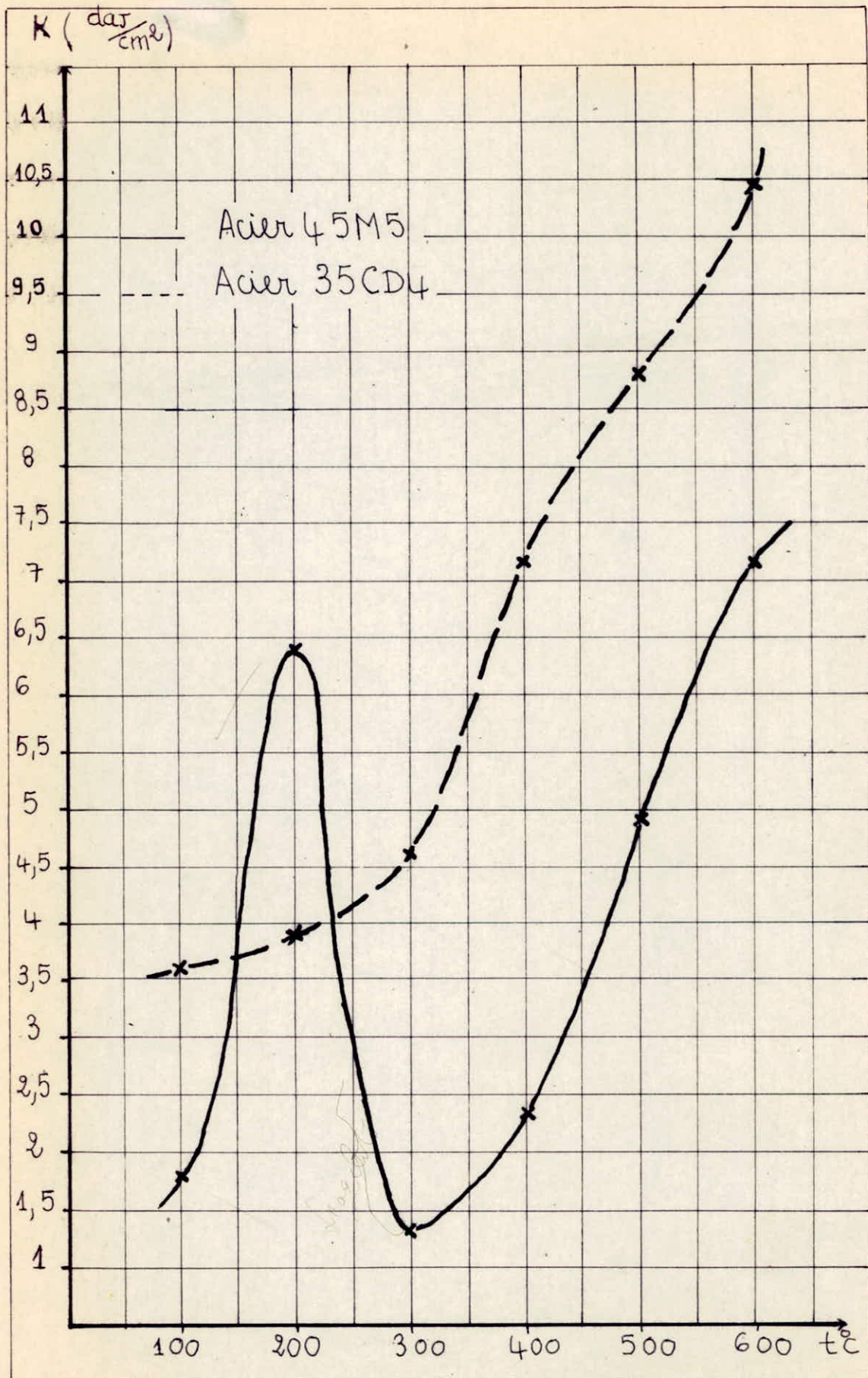


Fig. 16 Evolution de la résilience des aciers 45 M5 et 35 CD4 en fonction de la température de revenu.

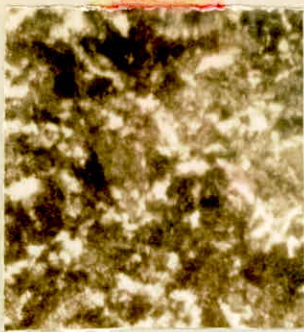


Fig. 17

Acier 45 M5 refroidi

à l'air calme $T = 850^{\circ}\text{C}$

Attaque au Nital X 1000

Structure : ferrite + Perlite fine



Fig. 18

Acier 35 CD4 refroidi

à l'air calme $T = 870^{\circ}\text{C}$

Attaque au Nital X 1000

Structure : bainite supérieure



Fig. 19

Acier 45 M5 trempe à l'eau

$T = 850^{\circ}\text{C}$

Attaque au Nital X 1000

Structure : martensite



Fig. 20

Acier 35 CD4 trempe à l'eau

$T = 870^{\circ}\text{C}$

Attaque au Nital X 1000

Structure : martensite



Fig 21

Acier 45 M5 trempe à l'huile

$T = 850^{\circ}\text{C}$

Attaque au nital X 100

Structure : Martensite



Fig 22

Acier 35 CD4 trempe à l'huile

$T = 850^{\circ}\text{C}$

Attaque au nital X 1000

Structure : aiguille de bainite
sur fond de martensite



Fig. 23

Acier 45 M5 Revenu à 100°C

Attaque au nital X 1000

Structure : martensite de revenu



Fig 24

Acier 35 CD4 Revenu à 100°C

Attaque au nital X 1000

Structure : martensite de revenu



Fig. 25

Acier 45 M5 Revenu à 200°C

Attaque au nital X 1000

Structure : martensite de revenu



Fig. 26

Acier 35 CD4 Revenu à 200°C

Attaque au nital X 1000

Structure : martensite de revenu



Fig. 27

Acier 45 M5 revenu à 300°C

Attaque au nital X 1000

Structure : troostite de revenu



Fig. 28

Acier 35 CD4 Revenu à 300°C

Attaque au nital X 1000

Structure : troostite de revenu

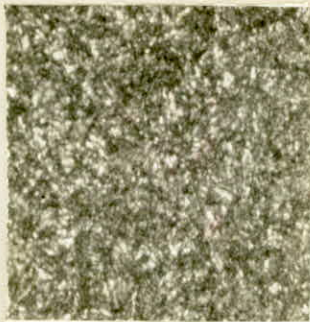


Fig. 29
Acier 45 M5 Revenu à 400°C
Attaque au nital X 1000
Structure : troostite de revenu

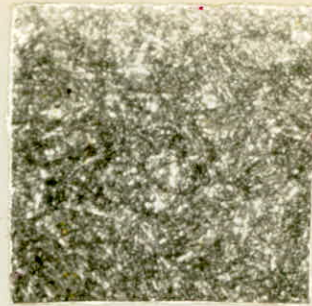


Fig. 30
Acier 35 CD4 Revenu à 400°C
Attaque au nital X 1000
Structure : troostite de revenu

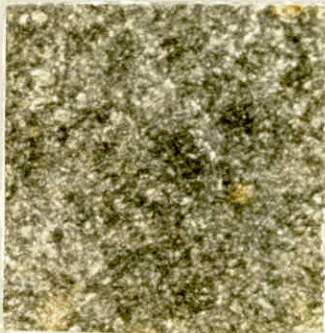


Fig. 31
Acier 45 M5 Revenu à 500°C
Attaque au nital X 1000
Structure : sorbite de revenu



Fig. 32
Acier 35 CD4 Revenu à 500°C
Attaque au nital X 1000
Structure : sorbite de revenu



Fig. 33
Acier 45 M5 revenu à 600°C
Attaque au nital X 1000
Structure : sorbite de revenu



Fig. 34
Acier 35 CD4 revenu à 600°C
Attaque au nital X 1000
Structure : sorbite de revenu

CONCLUSION GENERALE

La recherche d'une limite élastique et d'une résistance à la traction aussi élevée que possible, en rapport avec une résilience suffisante, d'une part, la considération de l'économie de matière d'autre part commandent d'utiliser tous les aciers au maximum de leur qualités.

Le traitement thermique à justement pour but de communiquer à l'acier les meilleures propriétés possibles en vue de son emploi. Il permet d'agir dans une large mesure sur les caractéristiques des aciers.

Il faut noter tout de suite que ces différentes caractéristiques ne varient pas toutes dans le même sens, et le problème revêt ainsi un caractère de diversité qui ouvre la voie à de nombreuses applications.

En pratique, on peut toutefois fixer, comme règle générale que le traitement thermique optimal consiste à faire coexister dans le même acier les valeurs maximales possibles des différentes caractéristiques mécaniques.

Dans les cas difficiles, on peut y arriver par le choix d'acier suffisamment alliés, mais il n'est pas toujours nécessaire d'avoir recours à cette ressource coûteuse.

Le traitement thermique bien appliqué peut parfois exercer sur les propriétés finales de l'acier une influence plus grande que certaines variations de la composition chimique.

Voilà pourquoi, il est très utile de tracer pour chaque nuance d'acier, les courbes représentants les caractéristiques mécaniques en fonction de la température de revenu.

C'est justement, cela qui nous a permis d'étudier la possibilité de remplacer l'acier 35 CD4 par un acier moins coûteux en l'occurrence l'acier 45 M5 pour la fabrication de certaines pièces mécaniques.

