

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

Metallurgie

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Etude du comportement des aciers
de construction 35CO4 et 42CO4 au
cours d'un cyclage thermique.*

Proposé par :

K. ABAOUI

Etudié par :

M. AOURAR

Dirigé par

K. ABAOUI

PROMOTION

Juillet 1993

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

Metallurgie

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Étude du comportement des aciers
de construction 35 CD 4 et 42 CD 4
au cours d'un cyclage thermique.*

Proposé par :

K. ABAULI

Etudié par :

M. AOURAR

Dirigé par

A. ABAULI

PROMOTION

Juillet 1993

E.N.P. 10, Avenue Hacem Badi El-Harrach - ALGER

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à:

- Ma mère.
- Mes chers frères et ma soeur.
- Toute la famille "AOURAGH".
- Mes chers amis.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur;
K.ABADLI, enseignant au département "Métallurgie"(E.N.P).

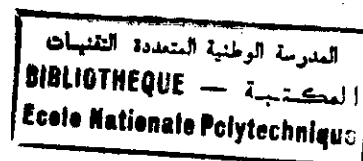
A cette occasion, je voudrais, en premier lieu, remercier
profodément, mon promoteur K.ABADLI, pour l'aide constante
depuis mes debuts au laboratoire et le souvi continu, pend-
ant toute la période de projet .

Je remercie vivement tous les enseignants du département
"Metallurgie", qui ont contribués à ma formation .

Je tiens à remercier les agents du laboratoire de métallur-
gie et de l'atelier mécanique de l'E.N.P.

Je ne saurais oublier de remercier tous les travailleurs
desunités S.N.T.F d'Alger et C.V.I de Rouiba. Je remercie
enfin tous ceux qui , d'une façon ou d'une autrem'ont aidé.
dans ce travail.

SOMMAIRE



<u>INTRODUCTION :</u>	1
<u>CHAPITRE I :</u> CARACTERISTISATION DES ACIERS FAIBLEMENT ALLIES 35 CD 4 - 42 CD 4	3
1.1 DESIGNATION CONVENTIONNELLE	3
1.1.1 Composition chimique	3
1.1.2 caractéristiques mécaniques	4
1.2 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION	5
1.2.1 Influence des éléments d'élaboration	6
1.2.1.1 Influence du Carbone	6
1.2.1.2 Influence du Manganèse	6
1.2.1.3 Influence du Silicium	6
1.2.2 Influence des éléments d'addition	9
1.2.2.1 Influence du Chrome	9
1.2.2.2 Influence du Molybdène	9
1.3 TRANSFORMATION DE PHASES	13
1.3.1 Austinisation	13
1.3.1.1 Composition chimique	13
1.3.1.2 Grosseur du grain	13
1.3.2 Transformations anisothermes de l'austénite	17
1.3.3 Transformations au cours du revenu	20
1.3.3.1 Transformation de la martensite	20
1.3.3.2 Transformation de l'austénite résiduelle	21
1.3.3.3 Influence des conditions de revenu	21
1.3.3.4 Influence de l'austénite résiduelle	21
1.3.3.5 Influence des éléments d'addition	21
1.3.4 Transformations isothermes de l'austénite	21
1.3.5 Trempabilité	24
1.3.6 Tenue à chaud	24
1.3.7 Application	24

CHAPITRE II : METHODE EXPERIMENTALE	27
2.1 MATERIAUX ETUDIES	27
2.1.1 <i>Etat brut</i>	27
2.1.2 <i>Préparation des éprouvettes</i>	29
2.1.3 <i>Etat de référence</i>	29
2.2 TECHNIQUES EXPERIMENTALES	31
2.2.1 <i>Essais de cyclage thermique</i>	31
2.2.1.1 <i>Le dispositif expérimental</i>	31
2.2.1.2 <i>Conditions expérimentales</i>	35
2.2.2 <i>Essai de traction</i>	37
2.2.3 <i>Essai de dureté</i>	37
2.2.4 <i>Caractérisation structurale</i>	38
CHAPITRE III : EVOLUTION STRUCTURALE DES ACIERS 35 CD 4 ET 42 CD 4 AU COURS D'UN CYCLAGE THERMIQUE	39
3.1 EVOLUTION DE LA STRUCTURE DE L'ACIER 35 CD 4	39
3.1.1 <i>Premier essai</i>	39
3.1.2 <i>Deuxième essai</i>	39
3.2 EVOLUTION DE LA STRUCTURE DE L'ACIER 42 CD 4	39
3.2.1 <i>Premier essai</i>	39
3.2.2 <i>Deuxième essai</i>	40
CHAPITRE IV : EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES	47
INTRODUCTION	47
4.1 VARIATION DE LA DURETE	49
4.1.1 <i>Premier essai</i>	49
4.1.2 <i>Deuxième essai</i>	52

4.2 VARIATION DE LA LIMITE ELASTIQUE	52
4.2.1 Premier essai	52
4.2.2 Deuxième essai	52
4.3 VARIATION DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE	54
4.3.1 Premier essai	54
4.3.2 Deuxième essai	54
4.4 VARIATION DE L'ALLONGEMENT	54
4.4.1 Premier essai	54
4.4.2 Deuxième essai	56
CHAPITRE V : INTERPRETATIONS GENERALES DES RESULTATS	58
INTRODUCTION	58
5.1 EFFETS DES PARAMETRES DU CYCLAGE THERMIQUE	58
5.1.1 Effets sur la structure	59
5.1.1.1 Evolution de la cémentite	59
5.1.1.2 Evolution de la ferrite	60
5.1.2 Effets sur les caractéristiques mécaniques	60
5.2 EFFET DU TAUX DE CARBONE	60
5.2.1 Effet sur l'évolution structurale	61
5.2.2 Effets sur le comportement mécanique	61
CONCLUSION :	66
BIBLIOGRAPHIE :	68

INTRODUCTION

Les aciers de construction a traitement thermique sont employés dans la fabrication des éléments de machines, dans la construction des ouvrages d'art et des édifices.

La famille des aciers de construction contient des aciers au Carbone et des aciers faiblement alliés au Chrome (0,8 - 1,1 %), le Nickel (0,5 - 4,5 %), le Silicium (0,5 - 1,2 %) et le manganèse (0,8 - 1,8 %). D'autres éléments sont introduits dans l'acier en combinaison avec le chrome tels que : le Molybdène, le Vanadium, le titane, et le bore.

Après un traitement de trempe revenu, les caractéristiques mécaniques de ces aciers atteignent un niveau remarquable qui leurs confèrent des propriétés technologiques très intéressantes, parmi ces propriétés on peut citer:

- L'aptitude au formage (par laminage, forgeage, emboutissage).
- L'aptitude à l'usinage et au soudage.
- Une pénétration de trempe élevée.
- Une bonne résistance à chaud.
- Une résistance notable à l'usinage et aux efforts mécaniques.
- Une faible aptitude à la déformation et à la production des tapures de trempe.

Ces aptitudes remarquables ont orienté les industriels à choisir les aciers de construction pour la production de pièces ou de structures devant supporter des contraintes mécaniques élevées ou des effets thermiques importants.

Ces aciers sont utilisés en particuliers dans les domaines de hautes températures que se soit en condition isotherme ou dans des conditions de cyclage thermique (exemple, les soupapes d'échappement, les engrenages, pièces pour les centrales thermiques).

L'objet de notre travail est de contribuer à l'étude du comportement de deux nuances d'acier de construction faiblement alliés au chrome - molybdène (35CD4 et 42CD4) soumis à des variations cycliques de température. L'étude porte sur l'évolution de la structure et des caractéristiques mécaniques au cours de cyclage thermique.

Les aciers nous ont été fournis gracieusement par la Société Nationale des Chemins de Fer. Les travaux ont été fait au laboratoire de métallurgie de l'Ecole Nationale Polytechnique. Nous avons utilisé un dispositif expérimental mis au point dans le laboratoire.

Ce mémoire contient cinq chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons une étude bibliographiques sur les aciers étudiés.

Les techniques expérimentales sont exposées au deuxième chapitre. Les résultats expérimentaux sont présentés dans les chapitres III et IV. Enfin le dernier chapitre est réservé à l'interprétation des résultats obtenus.

CHAPITRE I

CARACTERISATION DES ACIERS FAIBLEMENT ALLIES 35 CD4 - 42 CD4

INTRODUCTION:

La présence des éléments Chrome et Molybdène, même en faible quantité, assure à l'acier hypoeutectoïde des propriétés remarquables de ténacité, de résistance à chaud et à la corrosion de ductilité, d'usinabilité, de soudage, ...etc. Grâce à ces propriétés, les aciers au Chrome-Molybdène sont utilisés dans un domaine très étendu de l'industrie mécanique : chaque fois que les pièces sont appelés à supporter de fortes sollicitations mécaniques et thermiques faisant appel à des résistances à l'usure et à chaud élevées.

1.1 DESIGNATION CONVENTIONNELLE:

Les aciers de nuances 35 CD 4 et 42 CD 4 font partie de la famille des aciers faiblement alliés au Chrome-Molybdène. Selon les normes Française AFNOR NF A35-351, Allemande DIN 17200 et Américaine SAE AISI.

La somme totale des taux de Chrome et de Molybdène ne doit pas dépasser 5% . Les nuances apparentées sont:

- 30 CD 4 pour l'acier 35 CD 4
- 40 CD 4 , 45 CD 4 et 42 CD V 4 pour l'acier 42 CD 4 .

Ces aciers sont classés comme des aciers de construction à traitement thermique, ils sont trempants ordinaires et ont une résistance à chaud élevée [1]

1.1.1 Composition chimique:

La composition chimique visée se présente de la manière suivante:

- Pour l'acier 35 CD 4 :
% C : 0,35 % Cr : 1,00 % Mo : 0,20
- Pour l'acier 42 CD 4 :
% C : 0,42 % Cr : 1,00 % Mo : 0,20

Les fourchettes retenues par les normes sont présentées dans les tableaux suivants [2]:

Tableau 1: Composition chimique de l'acier 35 CD 4

Composition Norme	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	S+P _{max} (%)
AFNOR NF A 35-551 35 CD 4	0,33-0,39	0,60-0,90	0,10-0,40	0,85-1,15	0,15-0,30	0,035
DIN 17200 34 Cr Mo4	0,30-0,37	0,50-0,80	0,15-0,40	0,90-1,20	0,15-0,30	0,035
SAE AISI 4135	0,30-0,37	0,70-0,90	0,20-0,35	0,80-1,00	0,15-0,25	0,035

Tableau 2: Composition chimique de l'acier 42 CD 4

Composition Norme	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	S+P _{max} (%)
AFNOR NF A 35-551 42 CD 4	0,39-0,45	0,60-0,90	0,10-0,40	0,85-1,15	0,15-0,30	0,035
DIN 17200 42 Cr Mo4	0,31-0,45	0,50-0,80	0,15-0,40	0,90-1,20	0,15-0,30	0,035
SAE AISI 4142	0,40-0,45	0,70-0,90	0,20-0,35	0,80-1,00	0,15-0,25	0,035

1.1.2 Caractéristiques mécaniques:

Les caractéristiques mécaniques minimales que doivent vérifier ces deux aciers aux états recuit et revenu sont présentés dans les tableaux suivants [3]:

Tableau 3: Caractéristiques mécaniques minimales de l'acier 35CD4

Caractéristique Etat	Re _{0,2} (daN/mm ²)	R _m (daN/mm ²)	A _{5 d} (%)	dureté HB	K _{IC} (daJ/cm ²)
	Récut 850 C	47	70	17	200
T.H.850 C Revenu 200 C	140	175	5	490	3
T.H.850 C Revenu 550 C	93	105	10	320	5

Tableau 4: Caractéristiques mécaniques minimales de l'acier 42CD4

Caractéristique Etat	$R_{e0,2}$ (daN/mm ²)	R_m (daN/mm ²)	A_{5d} (%)	dureté HB	$K_{c u}$ (daJ/cm ²)	σ_D (daN/mm ²)
Recuit 850 C	50	77	15	220	-	35
T.H 840 C Revenu 200 C	150	190	4	500	2	65
T.H 840 C Revenu 550 C	100	115	9	350	4	52

Les traitements thermiques de recuit ou de trempe à l'huile TH et revenu sont appliqués sur des éprouvettes normalisées aussi bien pour l'essai de traction que pour l'essai de résilience ou de fatigue.

Les caractéristiques mécaniques désignées sont:

$R_{e0,2}$: limite élastique conventionnelle à 0,2% en daN/mm²

R_m : résistance à la rupture en daN/mm²

A_{5d} : allongement à la rupture en % pour des éprouvettes rondes ayant une longueur initiale entre repères l_0 liée au diamètre de la partie calibrée par la relation:

$$l_0 = 5 d$$

$K_{c u}$: résilience en daJ/cm² pour éprouvette entaillée en U

σ_D : limite de fatigue en daN/mm²

1.2 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION:

Les éléments présents dans l'acier sont: le Carbone, le Manganèse, le Silicium, le Chrome et le Molybdène. Seuls les deux derniers sont considérés comme éléments d'addition. Les éléments C, Mn et Si sont obtenus lors de l'élaboration de l'alliage de base après un ajustement convenable de la composition. Avant d'étudier l'influence des éléments Cr et Mo, nous jugeons utile d'étudier les effets des éléments d'élaboration.

1.2.1 Influence des éléments d'élaboration:

1.2.1.1 Influence du carbone:

Cet élément est présent dans les aciers sous deux formes:

- En solution solide d'insertion dans la ferrite, dans l'austenite, dans la bainite ou dans la martensite. La solubilité maximale dans chaque phase dépend de la température et des autres éléments présents. La dureté des différentes phases est accrue par le Carbone.
- Sous forme de carbure: La Cémentite Fe_3C de structure orthorhombique et contenant 6,67 % C. Ce carbure possède une dureté élevée correspondant à une fragilité importante, il se présente dans l'acier sous forme de lamelles minces dans la perlite, de plaquettes dans la bainite et sous forme de particules sphériques dans une matrice ferritique. Cette dernière forme peut être obtenue soit par recuit de globulisation d'une structure ferritoperlitique soit par revenu à haute température de la martensite.

Lorsque le taux de Carbone augmente, la proportion de la Perlite augmente ce qui entraîne des caractéristiques de résistance (R_m , R_e) élevées et une ductilité plus faible.

1.2.1.2 Influence du Manganèse:

Le Manganèse est un élément gamagène et carburigène, il élargit le domaine de stabilité de l'austenite par l'abaissement de la température A_3 (transformation $\gamma \rightleftharpoons \alpha$) et le relèvement de la température A_4 (transformation $\delta \rightleftharpoons \gamma$), (figure 1). Le Manganèse est soluble dans l'austenite en toute proportion. Il se dissout partiellement dans la ferrite en provoquant son durcissement (figure 2). Le pouvoir carburigène du Manganèse est faible mais suffisant pour stabiliser la Cémentite et contrecarrer l'effet graphitisant du Silicium. Le coefficient de partage de Mn dans la ferrite et le carbure est moyen. La présence de cet élément agit sur les conditions de la transformation perlitique; il abaisse la température $AC1$ et la composition eutectoïdes (figure 3). Les caractéristiques mécaniques de tenacité sont relevées au dépend de la ductilité.

1.2.1.3 Influence du Silicium:

Le Silicium est un élément alphagène et non carburigène, il rétrécit le domaine austénitique par le relèvement de la température A_3 et l'abaissement de la température A_4 (figure 4). La solubilité du Silicium dans la cémentite est pratiquement nulle, il se retrouve totalement dans la ferrite qui subit un durcissement très important et une chute notable de sa ductilité (figure 2). Le Silicium a tendance à déstabiliser la cémentite et empêche sa formation au profit du graphite ou d'un autre carbure, mais en limitant son taux, et grâce à la présence du Manganèse et des autres éléments carburigènes la cémentite précipite. Les conditions de la transformation perlitique sont affectés (figure 3): relèvement de la température $AC1$ et abaissement de la composition eutectoïde.

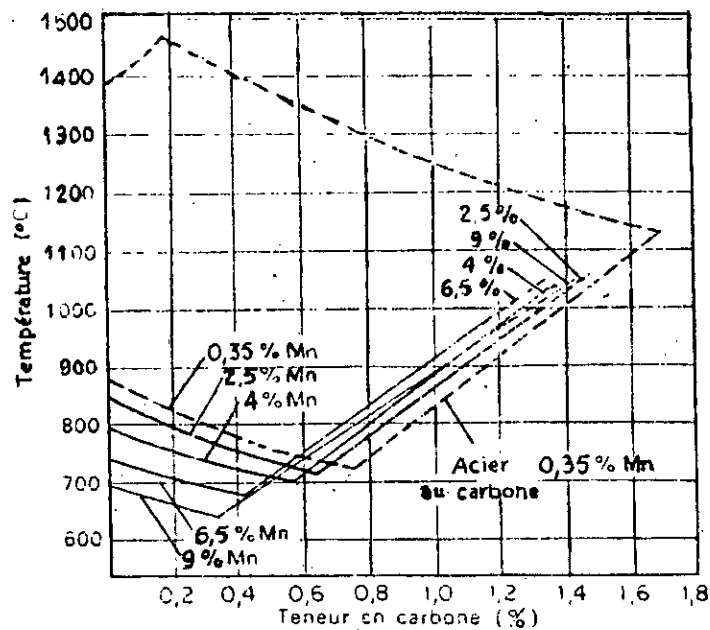


fig.1-Influence du Manganese sur le domaine (δ) [1]

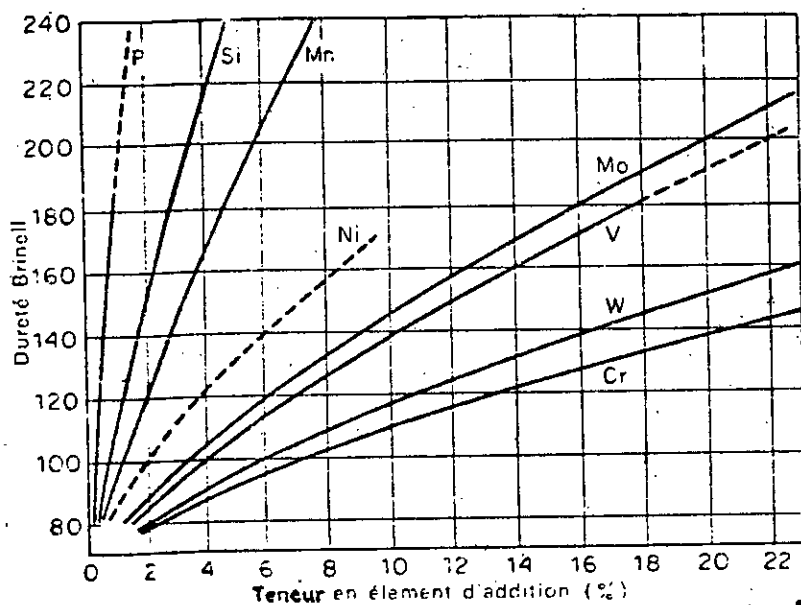


fig.2-Durcissement de la phase (α) par les éléments addition [1]

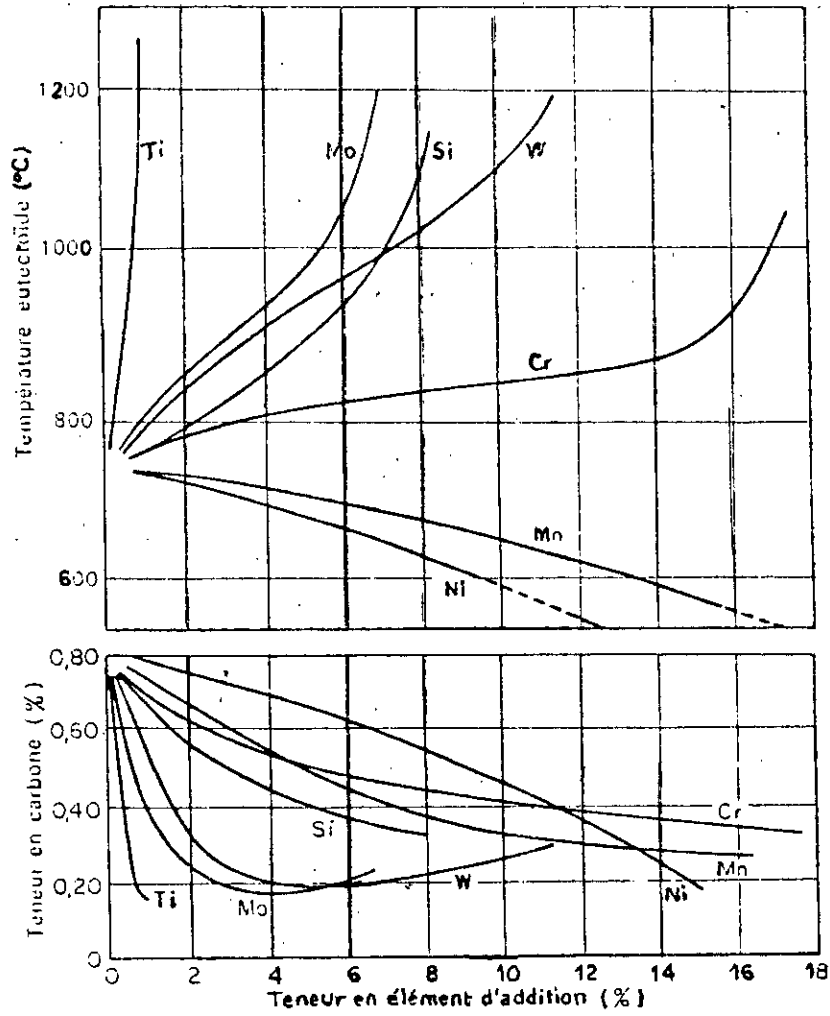


fig.3—Influence des éléments d'addition sur la composition et la température eutectoïde. [1]

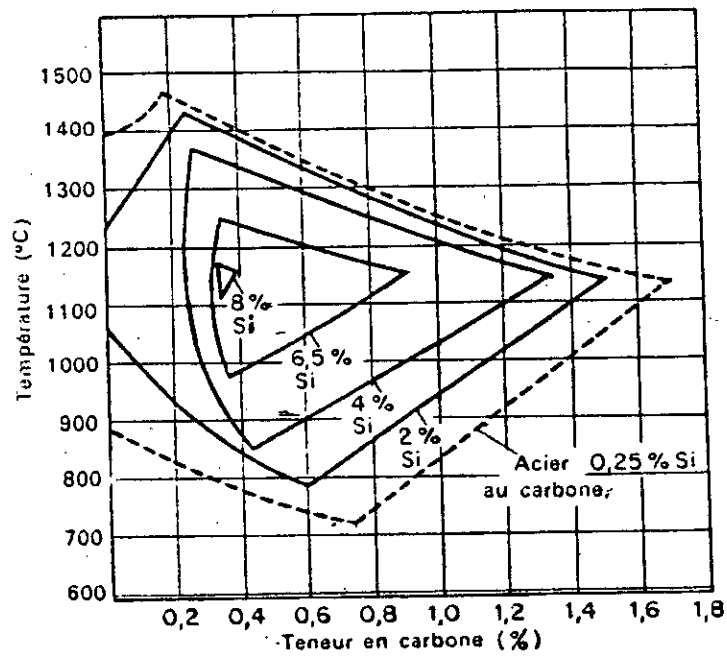


fig.4—Influence du Silicium sur le domaine (δ) [1]

1.2.2 Influence des éléments d'addition:

1.2.2.1 Influence du Chrome:

Le Chrome est un élément alphagène et carburigène, il rétrécit le domaine austénitique (figure 5). Jusqu'à 7 à 8 % Cr, le point A_3 est abaissé puis il est relevé, pour des taux supérieurs mais l'abaissement du point A_4 étant rapide ce qui engendre la réduction du domaine de stabilité de l'austenite. Aux faibles taux % Cr < 5 le seul carbure qui précipite est la cémentite alliée $(FeCr)_3C$ (figure 6). Le pouvoir carburigène du Cr est supérieur à celui du Manganèse avec un coefficient de partage moyen entre la cémentite et la ferrite. L'action du Chrome sur les conditions de la transformation perlitique est identique à celle du Silicium mais de façon moins marquée (figure 3). Par son effet alphagène, le relèvement du point A_3 a un effet nuisible sur la résilience de la ferrite. Par contre il semble que la cémentite n'est pas affectée.

1.2.2.2 Influence du Molybdène:

Comme le Chrome, le Molybdène est à la fois alphagène et carburigène. il rétrécit le domaine austénitique (figure 7). Son pouvoir carburigène est élevé supérieur à ceux du Manganèse et du Chrome. D'après le diagramme (figure 8), Le seul carbure stable au dessous de 700 C pour un taux en Mo inférieur à 1 % est la cémentite alliée $(Fe,Mo)_3C$. Le coefficient de partage X / X_{cem} est moyen. L'action sur les conditions de la transformation perlitique est semblable à celle du Chrome mais avec une intensité plus importante (figure 3).

D'une manière générale, Andrews a établi une relation mettant en évidence les effets des éléments chimiques présents sur les températures AC_1 et AC_3 dans les aciers faiblement alliés [4].

$$Ac_1 (C) = \begin{array}{r} 727 \\ + 29,1 Si \\ + 290 As \end{array} - \begin{array}{r} 10,7 Mn \\ + 16,9 Cr \end{array} - \begin{array}{r} 16,9 Ni \\ + 6,38 W \end{array}$$

$$Ac_3 (C) = \begin{array}{r} 912 \\ - 30 Mn \\ + 44,7 Si \\ + 13,1 W \\ + 400 Al \end{array} - \begin{array}{r} 203 \sqrt{C} \\ - 11 Cr \\ + 31,5 Mo \\ + 104 V \\ + 120 As \end{array} - \begin{array}{r} 15,2 Ni \\ - 20 Cu \\ + 700 P \\ + 400 Ti \end{array}$$

Les taux des éléments sont exprimés en %

Les éléments gamagènes abaissent le point AC_3 et relève AC_1 , les éléments alphagènes ont un effet inverse. Le Chrome a un effet complexe.

Les effets des éléments C, Mn, Si, Cr, Mo sur les propriétés des aciers sont relatés dans le tableau 5.

TABLEAU.5- Influence des éléments C,Cr,Mo,Mn,Si sur les propriétés mécaniques des aciers [11]

Propriétés	C	Cr	Mo	Mn	Si	Effet cummulatif
Charge de rupture	++	++	++	++	+	C, Cr, Mo, Mn, Si
Dureté	++	++	++	++	+	C, Cr, Mo, Mn, Si
Ductilité	--	+	+	+		Cr, Mo, Mn
Résistance à la chaleur et la corrosion		++	+	--	--	Cr, Mo
Soudabilité	--		+	+	--	Mo, Mn
Usinage	--	--		--	--	
Elasticité	+	+	+	+	++	C, Cr, Mo, Mn, Si
Résilience	--	+	+	+		Cr, Mo, Mn
Magnétisme		+			--	Cr
Forgeabilité			+	+		Mo, Mn

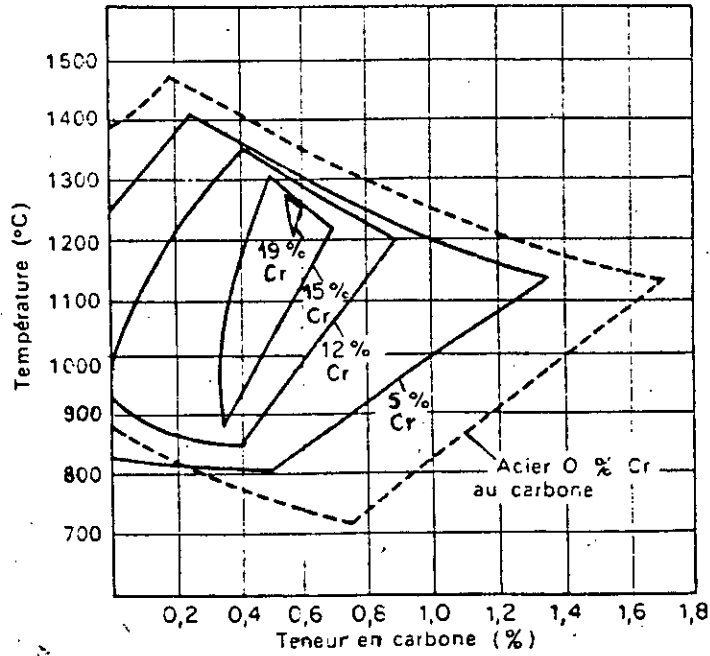


fig.5-Influence du Chrome sur le domaine (δ) [1]

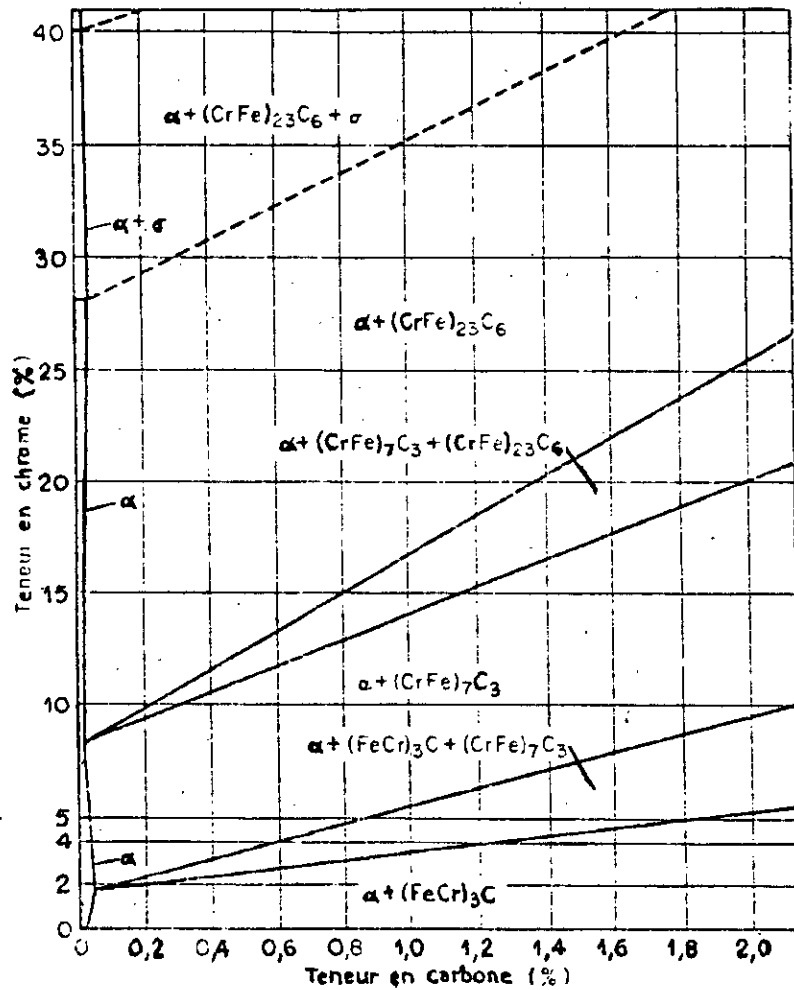


fig.6-Diagramme d'équilibre des alliages Fe-C-Cr [1]
à l'état recuit.

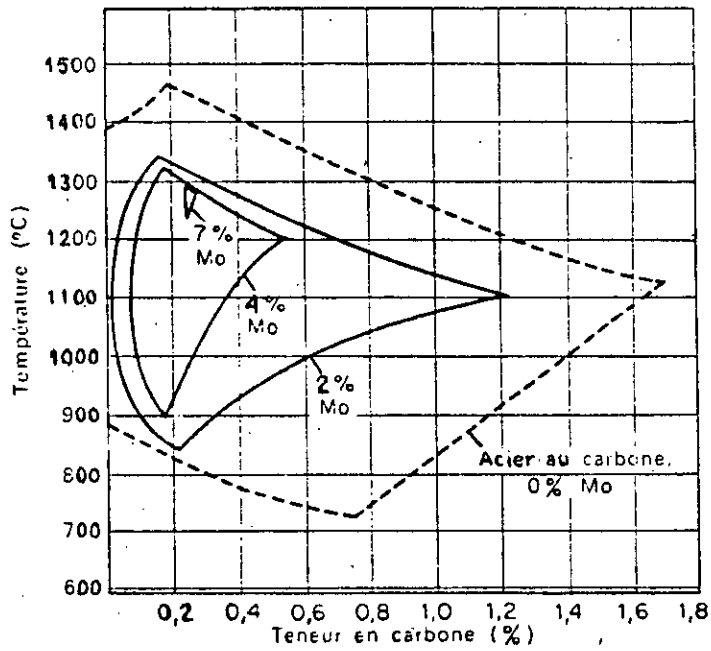


fig.7—Influence du Molybdène sur le domaine (γ) [1]

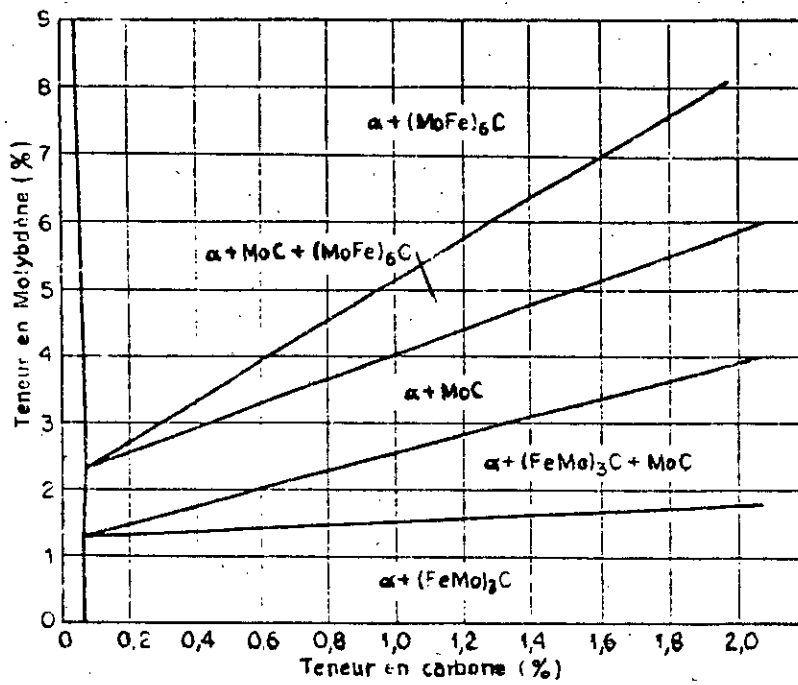


fig.8—Diagramme d'équilibre des alliages Fe-C-Mo à 700°C. [1]

1.3 TRANSFORMATIONS DE PHASES:

Les aciers 35 CD 4 et 42 CD 4 subissent les traitements thermiques de recuit et de trempe revenu. La structure et les propriétés sont inhérentes aux conditions de l'austenitisation, de refroidissement et à la composition chimique.

1.3.1 Austenitisation:

Les paramètres de l'austenitisation sont : la température θ_a et la durée d'austenitisation t_a . L'état de l'acier est caractérisé par la composition chimique et la grosseur moyenne du grain austenitique G_a .

1.3.1.1 Composition chimique:

La présence du Chrome dans l'acier a un effet négatif sur l'austenitisation, puisqu'il ralentit et limite la mise en solution des carbures, et empêche de même le grossissement du grain, car les carbures non dissous constitueraient des obstacles à la migration des joints des grains (augmentation de l'enthalpie d'activation ΔH_a).

Dans le cas des aciers 35 CD 4 et 42 CD 4, le taux en éléments d'addition étant faible, la dissolution de l'ensemble des éléments présents (C, Si, Mn, Cr, Mo) est totale à 850 C comme le montre la figure 9 [5].

1.3.1.2 Grosseur du grain:

Le grossissement du grain γ est un phénomène thermiquement activé. Pour décrire l'état de l'austenite, on utilise un paramètre d'équivalence température - temps d'austenitisation défini par :

$$P_a = \left(\frac{1}{T_a} - \frac{2,3 R}{\Delta H_a} \text{Log } t_a \right)^{-1} \quad (^\circ\text{K})$$

T_a étant la température absolue d'austenitisation R , la constante des gaz parfaits

$$R = 8,314 \text{ J/mole } ^\circ\text{K}$$

ΔH_a : l'enthalpie d'activation en KJ/mole.

Pour les aciers faiblement alliés : $\Delta H_a = 460 \text{ KJ/mole}$

Ainsi, dans des conditions d'austenitisation équivalentes (θ_a , t_a) correspondantes à la même valeur de P_a , l'acier a la même taille des grains G_a . Une augmentation de θ_a ou de t_a (ou les deux à la fois) entraîne une augmentation de P_a et donc de la grosseur du grain G_a . La figure 10 montre les conditions des austenitisations équivalentes de l'acier 35 CD 4.

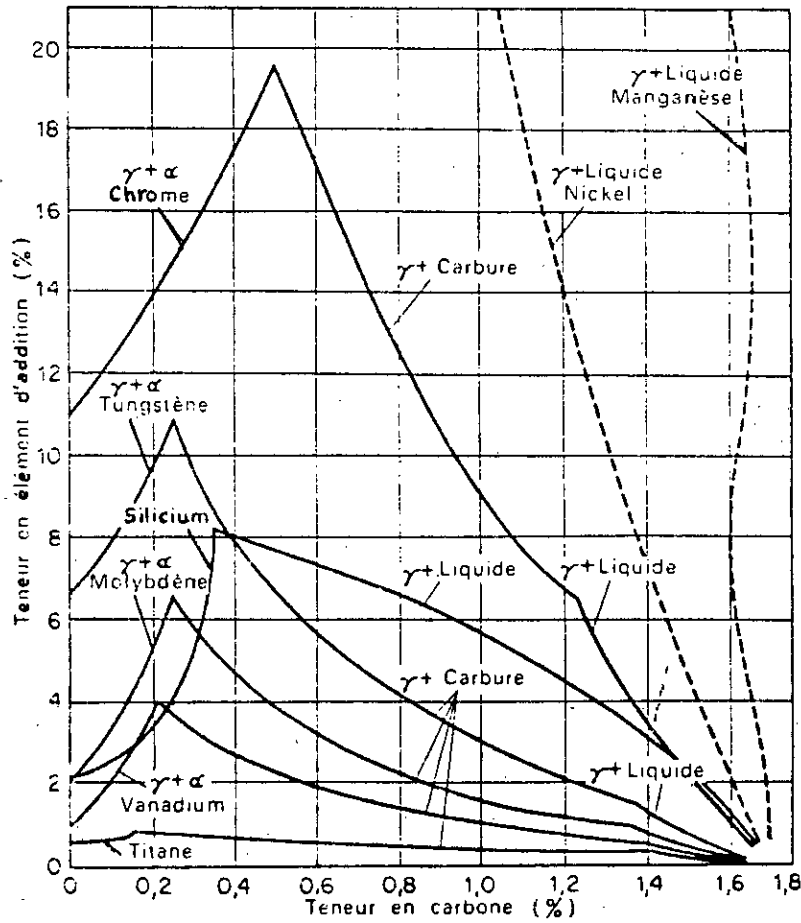


fig.9-Limite de solubilité de l'austénite pour différents éléments d'addition

[1]

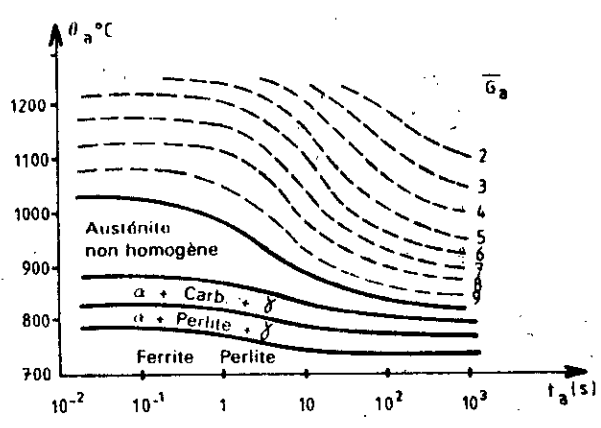
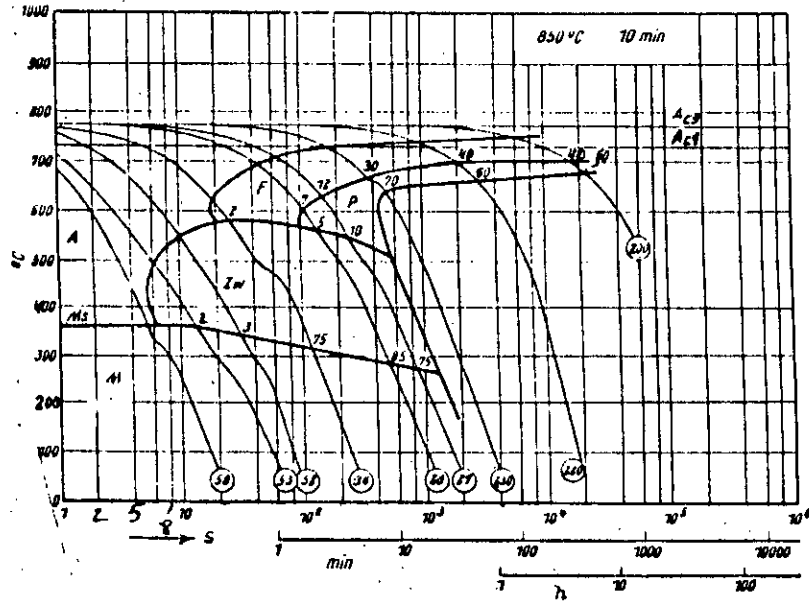


fig.10-Austénitisation équivalent de l'acier 35 CD 4

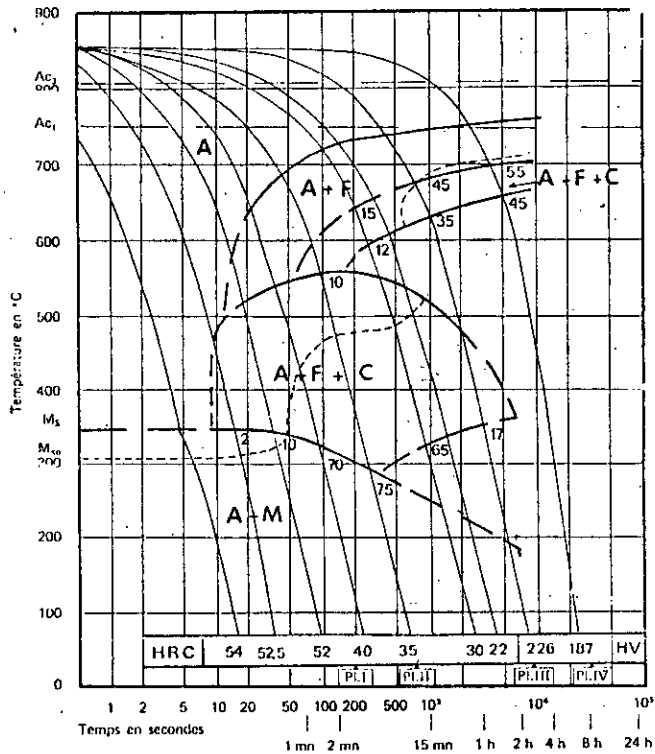
[2]



42 CD 4 [14]

Austénitisé à : 850 °C 30 mn

Grosseur du grain : 9

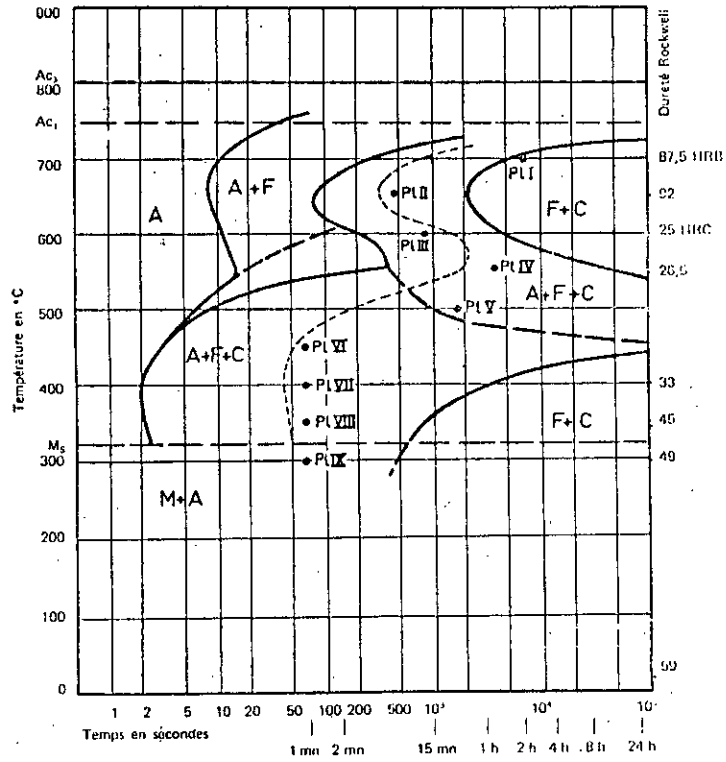


35 CD 4 [7]

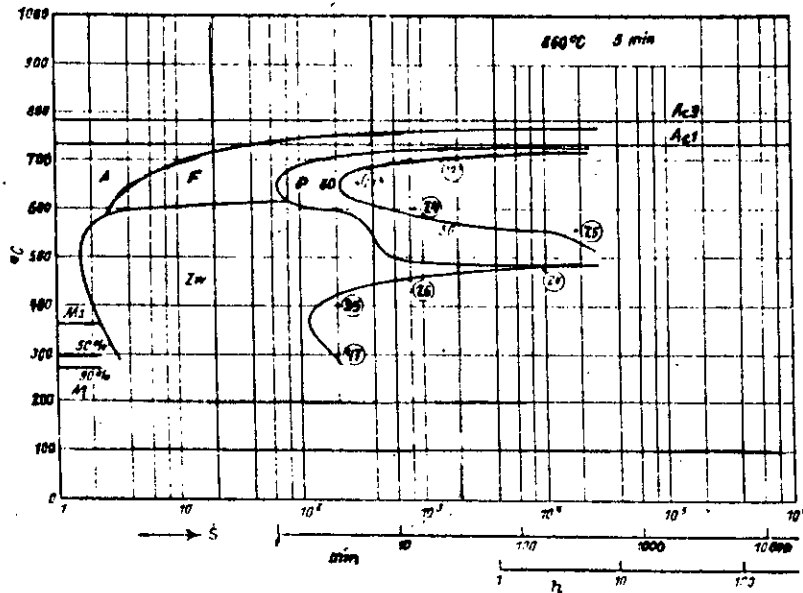
fig.11-Diagrammes TRC des aciers 42 CD 4 et 35 CD 4.

Austénisé à 850 °C 30 mn

Grosueur du grain : 8.9



35 CD 4 [7]



42 CD 4 [14]

Fig.12-Diagrammes TTT des aciers 35 CD 4 et 42 CD 4.

1.3.2 Transformations anisothermes de l'austenite:

L'étude du diagramme TRC de l'acier 42 CD 4 (figure 11) permet de faire les observations suivantes:

1/ - Selon l'ordre des vitesses de refroidissement la structure finale de l'acier est:

* Martensitique $V_r > 32,5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

* Martensite + Bainite $3,60 < V_r < 32,5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

* Ferrite + Perlite + Bainite + Martensite
 $0,25 < V_r < 3,6 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

* Ferrite + Perlite $V_r < 0,25 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

exemple:

- Pour une vitesse de refroidissement de $0,18 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ la structure obtenue est composée de 30% de ferrite et 70% de perlite avec une dureté de 230 Hv.

- Pour une vitesse de $0,7 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ la structure est:
7% F + 5% P + 85% B + 3% M
la dureté est 28 HRC

- Pour une vitesse de $7 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ la structure est: 98% M + 2% B
avec une dureté de 53 HRC

- Pour une vitesse de $31,5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ la structure est martensitique
la dureté est 58 HRC

2/ - La température M_s est élevée ($370 \text{ } ^\circ\text{C}$). Elle est constante pour les vitesses élevées ($V_r > 32,5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$) pour des vitesses plus faibles M_s dépend de V_r selon une loi linéaire décroissante.

3/ - La comparaison avec le diagramme TRC de l'acier 35 CD 4 (figure 11) montre les effets du Carbone: M_s est plus faible ($360 \text{ } ^\circ\text{C}$), une comparaison sur l'allure des deux diagrammes n'est pas possible car les compositions chimiques des deux aciers sont différentes.

D'après les travaux de **Brisson** et **All** [6], la dureté de l'acier à l'état ferrito-perlitique dépend de la composition et de la vitesse de refroidissement V_r , selon une loi établie et vérifiée du type:

$$H_v = A + B \log V_r$$

A et B sont fonction de la composition.

Les calculs de corrélation effectués sur ordinateur IBM 1130 ont donné le résultat suivant:

$$Hv_{F+P} = 42 + 223 C + 53 Si + 30 Mn + 13 Ni \\ + 7 Cr + 19 Mo + \text{Log } V_r [10 - 19 Si + 4 Ni \\ + 8 Cr + 130 V]$$

Cette relation montre les effets des éléments Cr et Mo (mais aussi C, Si et Mn). Pour une vitesse donnée le Cr et Mo provoquent un durcissement de la structure l'effet du Cr est plus marqué. Le Silicium a un effet inverse (figure 13).

Le même résultat a été trouvé pour une structure bainitique (figure 14), l'équation obtenue est :

$$Hv_B = - 323 + 185C + 330 Si + 153 Mn + 65 Ni + 144 Cr \\ + 191 Mo + \text{Log } V_R [89 + 54 C - 55 Si - 22 Mn \\ - 10 Ni - 20 Cr - 33 Mo]$$

Pour la martensite, les résultats des travaux ont permis d'établir une équation de la forme:

$$Hv = A + b \text{Log } V_r$$

A dépendant de la composition mais b est constant

Les calculs ont donné le résultat suivant:

$$Hv = 127 + 949 C + 27 Si + 11 Mn + 8 Ni + 16 Cr + 21 V_r$$

L'influence des éléments est donc indépendante de la vitesse de refroidissement. D'autre part, le Molybdène ne semble pas intervenir dans le durcissement de la martensite, ce résultat a été confirmé par **Meyzand** et **Murry** [7].

Pour une structure polyphasée contenant x % martensite, y % bainite et z % ferrite perlite la dureté de l'acier pour une vitesse V_r donnée se calcule de la manière suivante:

$$Hv = x H_{vM} + y H_{vB} + z H_{vFP}$$

Dans le cas d'une vitesse de refroidissement élevée conduisant à une structure martensitique **Andrews** a établi une relation permettant la détermination du point M_s (Début de transformation) connaissant la composition chimique de l'acier [2] :

$$M_s (C) = 539 - 423 C - 30,4 Mn - 17,7 Ni \\ - 12,1 Cr - 11 Si - 7 Mo$$

Le point $M_s (C)$ est connu à 10% près.

La fraction de la martensite formée à une température inférieure à M_s pour un acier faiblement allié est [9] :

$$y = 1 - \exp [- 0,011 (M_s - \theta)]$$

On constate qu'une trempe à l'ambiante conduit à une structure mixte: martensite M et austénite résiduelle δ_R .

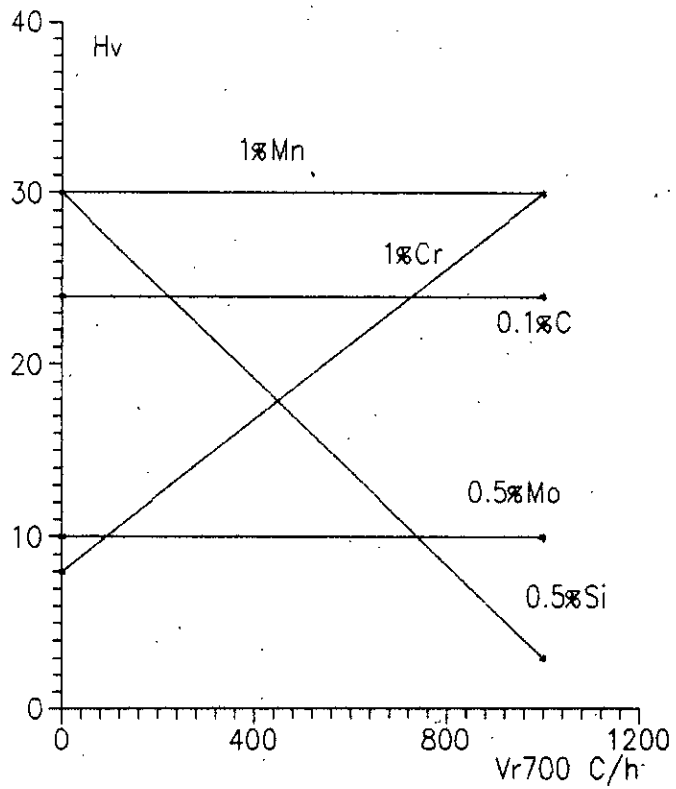


fig.13—Influence des elements d'alliage sur la durete de la ferrite-perlite. [6]

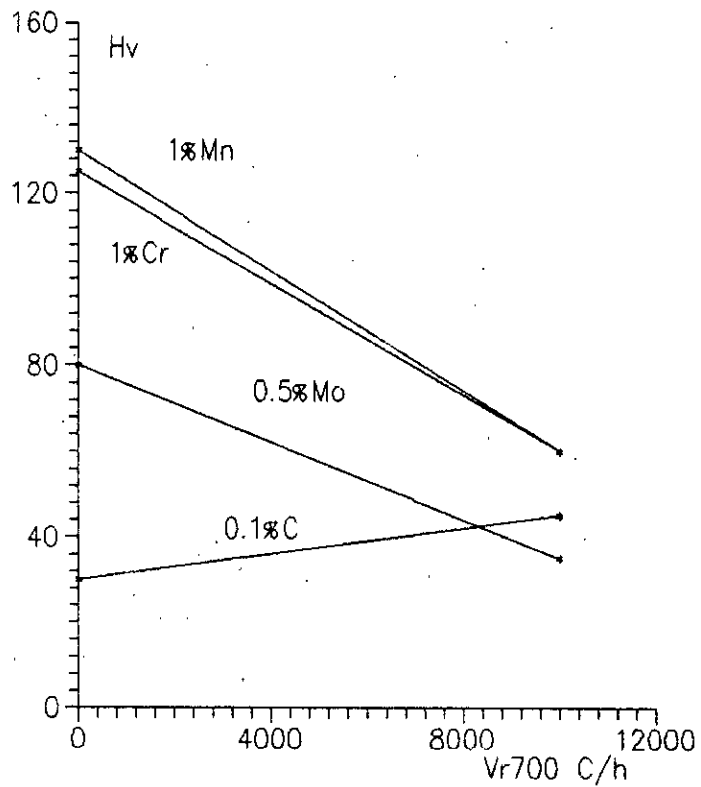


fig.14—Influence des elements d'alliage sur la durete de la bainite. [6]

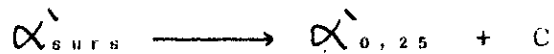
1.3.3 Transformations au cours du revenu:

1.3.3.1 Transformation de la martensite:

La martensite possède la même composition que l'austénite mère. Le retour à l'état d'équilibre se fait en quatre étapes:

a/ Premier stade (θ_R : 100 - 150 °C) :

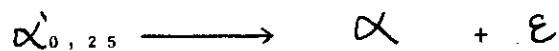
Les aiguilles de martensite s'appauvrissent en C qui les sites z de la maille quadratique. Ce carbone se grege vers les défauts cristallins (dislocations joints de grains). La structure quadratique est maintenue



Le taux de Carbone restant dans la martensite est de 0,25 % . Pendant ce stade se produit une relaxation des contraintes (R_e est relevée, R_m varie peu).

b/ Deuxième stade (θ_R : 130 - 250 °C)

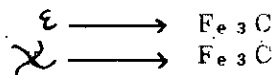
Précipitation du Carbure ($\text{Fe}_{2,4} \text{C}$) à partir du Carbone déposé dans les dislocations et dans les joints de grain.



Un deuxième Carbure χ de Hagg ($\text{Fe}_3 \text{C}_{1,05}$) peut précipiter la martensite se transforme en ferrite.

c/ Troisième stade (θ_R : 300 - 450 °C)

Les carbures ϵ et χ se transforment en cémentite



La structure est donc constituée de ferrite et de cémentite . Cette dernière est sous forme de plaquettes, entre les grains ferritiques et dans ces grains également; cette structure est proche de la bainite inférieure au voisinage de 300 C et de la bainite supérieure au voisinage de 450 C.

d/ Quatrième étape ($\theta_R > 450$ °C)

Diffusion des éléments carburigènes Mn, Cr, Mo dans la cémentite et substitution aux atomes de fer. La cémentite devient alliée au Mn, Cr et Mo.

D'autre part une globulisation suivie d'une coalescence de la cémentite se produit. La structure finale est constituée de cémentite alliée coalescées dans une matrice ferritique.

1.3.3.2 Transformations de l'austenite résiduelle:

L'austenite résiduelle se transforme à partir de 200 °C en bainite inférieure avec précipitation du carbure ϵ aussi bien entre les grains ferritiques et au sein de ces grains. Pour des températures supérieures à 200 °C, la structure évolue vers une forme de bainite supérieure, le Carbone diffuse vers les joints à partir de 350 °C le carbure se transforme en cémentite qui subira une globulisation puis une coalescence à partir de 450 °C.

1.3.3.3 Influence des conditions de revenu:

Les travaux de Villela et al [10] ont montré les effets des paramètres θ_R et t_R dans un acier à 0,35 % C faiblement allié au Chrome et au Molybdène. La figure 15 montre que la dureté suit une loi quasilogarithmique lorsque t_R augmente.

L'adoucissement de l'acier est d'autant plus important que θ_R et t_R sont élevées.

1.3.3.4 Influence de l'austenite résiduelle:

L'évolution de δ_R engendre un durcissement qui contre-carre l'adoucissement du à la transformation de la martensite. Ceci explique la décroissance rapide de la dureté entre 300 et 400 °C. Plus la température M_s est basse (sous l'effet des éléments) plus la fraction de δ_R est grande et l'adoucissement est important. La fraction dépend aussi de la vitesse de refroidissement.

1.3.3.5 Influence des éléments d'addition:

la présence du Chrome, provoque un ralentissement de l'adoucissement notamment aux températures élevées de revenu. Une addition de 2% Cr suffit pour entraîner un accroissement de la dureté de près de 10 HRC (figure 16). Le Molybdène agit dans le même sens que le Chrome, mais son effet est plus marqué (figure 17). La présence simultanée de ces deux éléments entraîne un effet cumulatif puisque la dureté de l'acier contenant 2% Cr et 5% Mo est accrue de 15 HRC à 500 °C (figure 18). Le durcissement est plus important si le taux de Carbone est plus élevé (figure 19).

1.3.4 Transformations isothermes de l'austenite:

L'étude du diagramme TTT de l'acier 35 CD 4 montre que les deux domaines perlitique et bainitique sont partiellement séparés. Il y'a une interpénétration des deux domaines dans l'intervalle 480 - 550 °C de telle sorte, que la structure finale de l'acier est mixte: perlite et bainite en plus de la ferrite initiale. Les deux domaines perlitique et bainitique sont précédés par un domaine de formation de la ferrite, d'abord properlitique de structure granulaire et ensuite probainitique de structure aciculaire. La ferrite ne précipite pas au dessous de

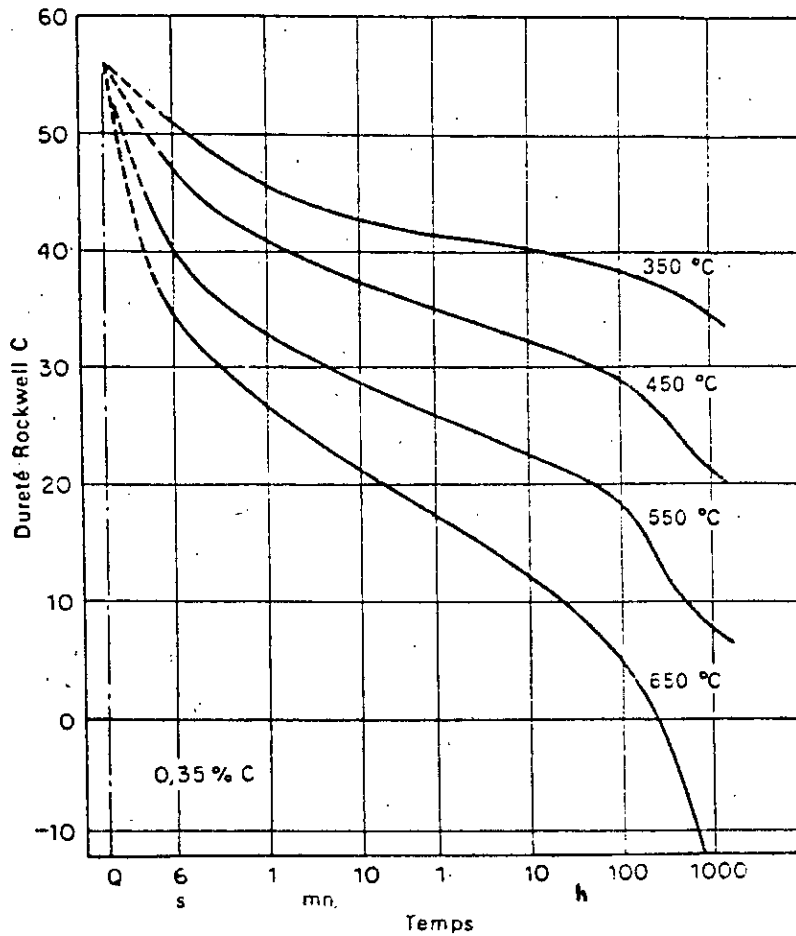


fig.15-Influence du temps et de la température de revenu sur un acier à 0.35% C, faiblement allié [1]

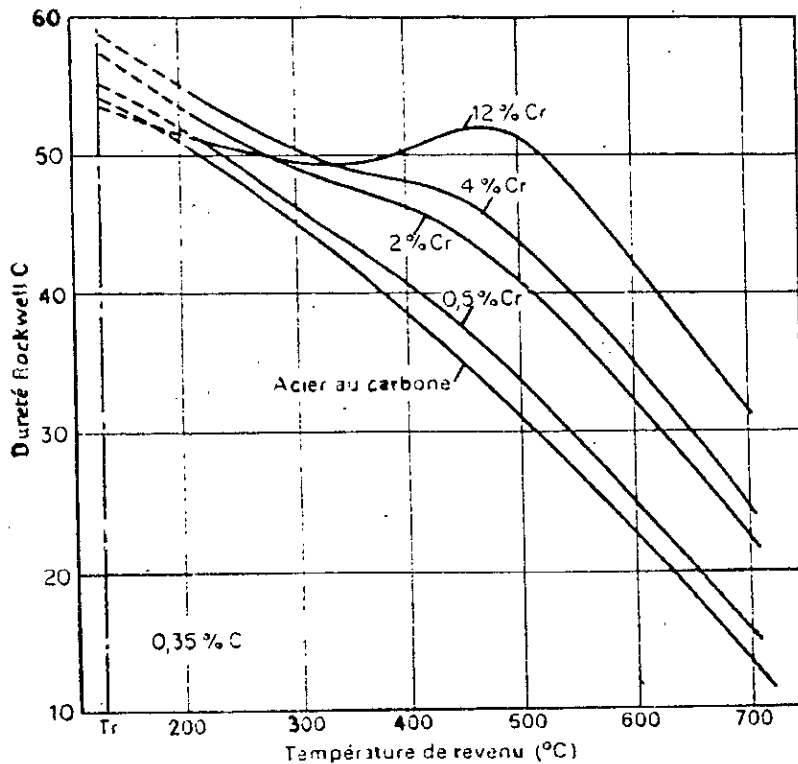


fig.16-Effet de durcissement du Chrome sur un acier à 0.35% C [1]

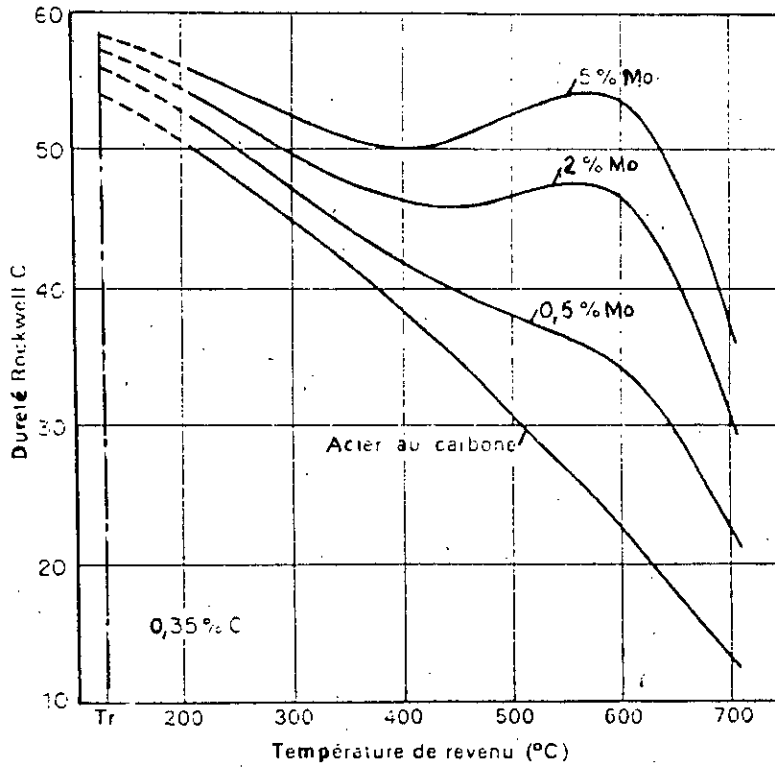


fig.17-Effet de durcissement du Molybdène sur un acier à 0,35%C [1]

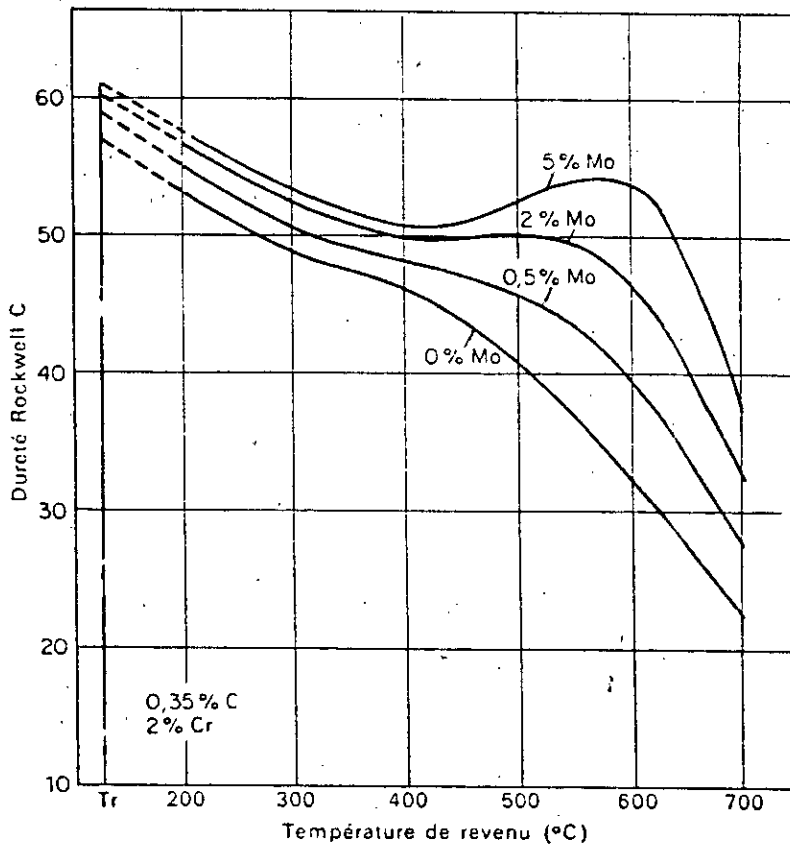


fig.18-Effet de durcissement du Chrome et Molybdène sur un acier à 0,35%C [1]

425 °C. La perlite précipite pour des températures supérieures à 525 °C. La bainite se forme dans l'intervalle $B_s - M_s$ avec $B_s = 525$ °C et $M_s = 340$ °C. La bainite inférieure commence à précipiter à partir de 400 °C environ.

Les éléments présents déplacent le diagramme vers la droite; ils retardent la germination de la ferrite et de la cémentite. Le Chrome et le Molybdène par leur effet carburigène, retardent la transformation perlitique et changent la cinétique de la transformation bainitique (figure 12).

1.3.5 Trempabilité:

Les courbes limites **Jominy** représentées dans les figures (20) et correspondant aux aciers 35 CD 4 et 42 CD 4 montrent une bonne trempabilité. Grâce à la présence des éléments Cr, Mo, cette trempabilité est améliorée par le Carbone dans l'acier 42 CD 4. Dans cet acier la martensite a une dureté de 61 HRC car plus riche en Carbone. Pour prévoir la courbe **Jominy** d'un acier faiblement allié, **Just** propose une relation donnant la dureté HRC de l'acier en fonction de la composition, et des conditions d'austenitisation [2].

$$\begin{aligned} \text{HRC} = & 88 \sqrt{\%C} - 0,0055 J_x \sqrt{\%C} + 19(\%Cr) \\ & + 6,3 (\%Ni) + 16(\%Mn) + 35(\%Mo) + 5(\%Si) \\ & - 0,82 Ga - 15,9\sqrt{J_x} + 1,33 J_x - 2 \end{aligned}$$

1.3.6 Tenue à chaud:

Les aciers au Chrome-Molybdène figurent parmi les aciers utilisés aux températures élevées (350 - 650 C), leurs caractéristiques de limite élastique à chaud et du fluage sont intéressantes.

Ce comportement est due à la présence des éléments Cr et Mo dans l'acier, ces éléments entraînent une élévation de la température de recristallisation de la ferrite et rendent plus difficile le processus de diffusion, ce qui conduit à l'amélioration de la résistance à chaud de l'acier.

1.3.7 Application:

Les aciers 35 CD 4 et 42 CD 4 sont utilisés pour la fabrication de pièces mécaniques qui doivent supporter à la fois des efforts mécaniques et thermiques importantes. Ces pièces peuvent être usinées et subir un soudage. Parmi les applications on peut citer la fabrication des bielles, des soupapes, des engrenages, des arbres, etc....

Ils sont recommandés aussi pour des emplois à chaud jusqu'à des températures de 500 - 525 °C, en particulier pour :

- les chaudières
- turbine à gaz
- moteur à réaction
- boulonnerie (centres thermiques, raffineries de pétrole)
- piles atomiques

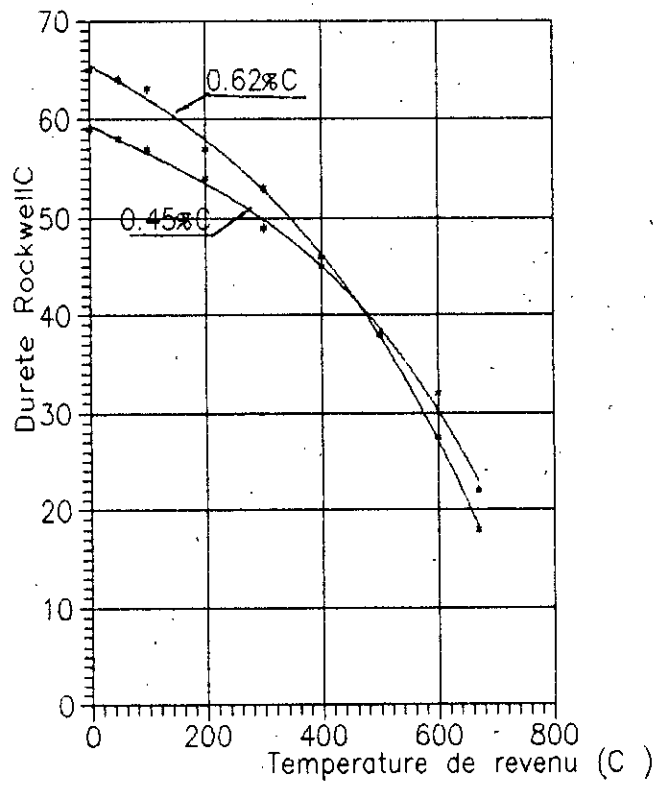
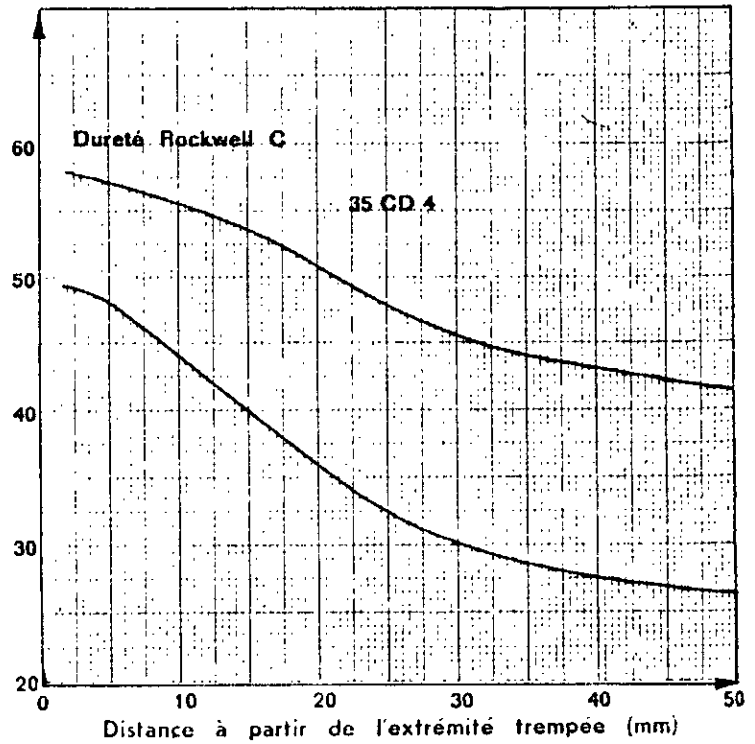


fig.19-Effet durcissant du carbone [1]

35 CD 4

Distance	Dureté Rockwell C	
	mm	min.
1,5	49	58
3	49	58
5	48	57
7	47	56
9	45	56
11	43	55
13	41	54
15	40	53
20	36	51
25	32	48
30	30	46
35	29	44
40	28	43
50	26	41



42 CD 4

Distance	Dureté Rockwell C	
	mm	min.
1,5	54	61
3	53,5	61
5	52,5	61
7	51,5	61
9	50	60
11	48,5	59,5
13	47	59
15	45,5	58
20	42	56
25	39,5	54
30	37	53
35	35	51
40	33	50,5
50	32	50

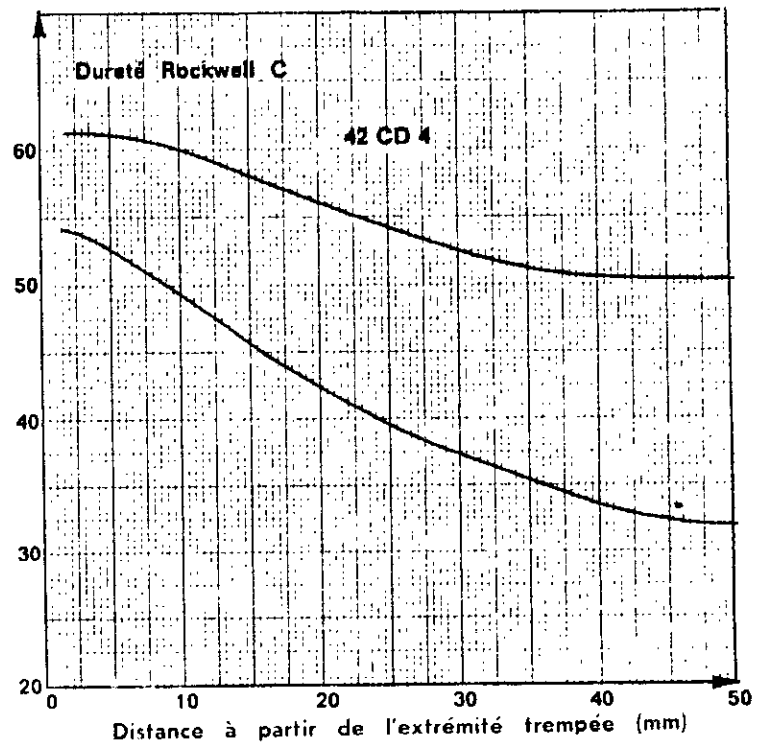


Fig.20 Courbes Jominy des aciers 35 CD 4 et 42 CD 4 [12]

CHAPITRE II

METHODE EXPERIMENTALE

2.1 MATERIAUX ETUDIES:

2.1.1 Etat brut:

Les matériaux utilisés dans cette étude sont deux aciers faiblement alliés au Chrome et Molybdène, de nuances 35 CD 4 et 42 CD 4 fournis gracieusement par la Société Nationale des Chemins de Fer. Les aciers sont livrés sous forme de soupapes d'échappement d'un moteur diesel d'une locomotive Général Motors. La composition chimique des aciers est donnée dans le tableau (6):

Tableau (6): Composition chimique des aciers 35CD4 et 42CD4

Composition Nuance	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	S (%)	
35 CD 4	0,36	0,88	0,24	1,10	0,21	0,09	0,007	
42 CD 4	0,46	0,89	0,27	1,05	0,18	0,09	0,008	

On peut constater la conformité des compositions comparées à celle définies par les normes. Pratiquement seul le taux de Carbone est différent dans les deux nuances.

La structure de l'état brut se présente de la manière suivante:

* Acier 35 CD 4:

La structure est ferrito-perlitique régulière avec des grains de ferrite de forme polyédrique et des filots de perlite. La finesse de la structure est moyenne, la dureté de l'acier est 18 HRC (figure 21).

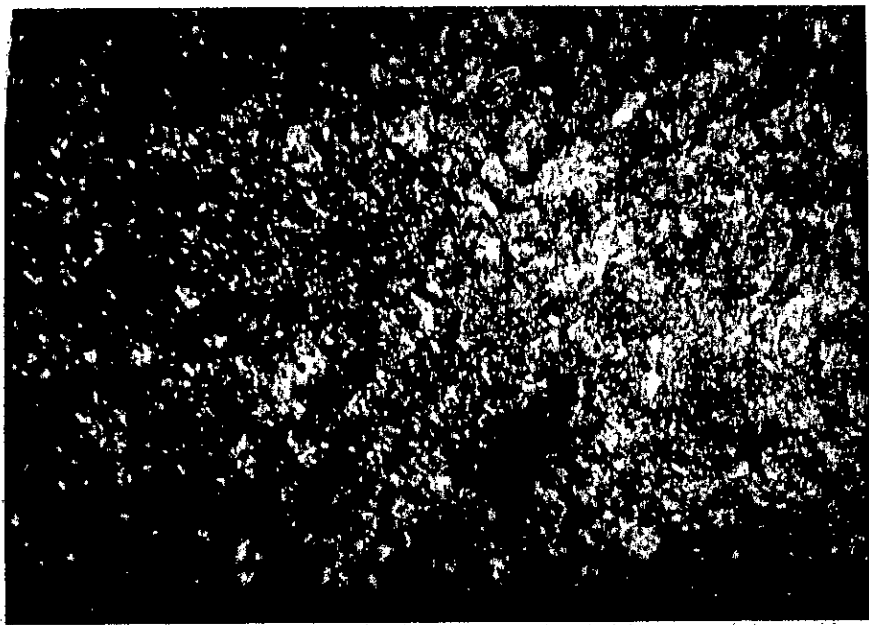


fig.21-Structure de l'acier 35 CD 4 à l'état brute (G.500)

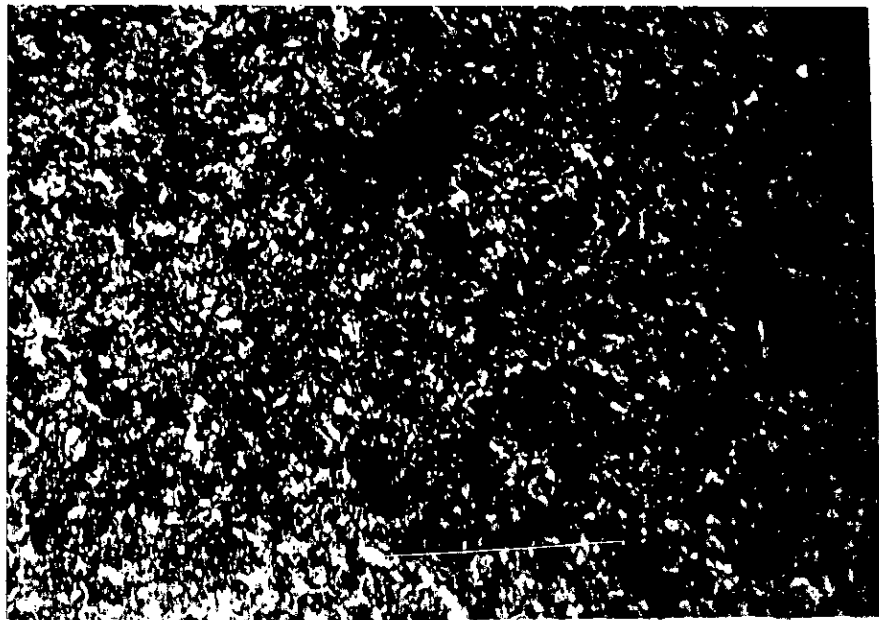


fig.22-Structure de l'acier 42 CD 4 à l'état brute (G.500)

* Acier. 42 CD 4:

La structure est ferrito-perlitique également mais elle résulte d'un revenu, car on constate à côté d'une ferrite aciculaire, la présence de carbures très fins. La dureté est égale à 26,5 HRC (figure 22).

2.1.2 Préparation des éprouvettes:

Les pièces fournies sont constituées d'une tige cylindrique dont l'une des extrémités a une forme conique. Les dimensions de la pièce sont présentées dans la figure (23) ; seule la partie cylindrique est récupérée pour la préparation des éprouvettes de traction. Avant l'usinage les pièces ont subi un traitement de recuit d'adoucissement par chauffage à 850 °C pendant 30 mn, suivi d'un refroidissement à l'air calme, ce traitement permet d'adoucir l'acier et faciliter donc l'opération d'usinage. Les caractéristiques mécaniques après ce traitement sont les suivantes:

Tableau (7): Caractéristiques mécaniques des aciers 35 CD 4 et 42 CD 4 recuits.

caractéristiques nuance	Re (daN/mm ²)	Rm (daN/mm ²)	A (%)	Dureté HRC
35 CD 4	86,8	94,7	17	14,9
42 CD 4	93,4	102,8	12	24

Après usinage, les éprouvettes obtenues subissent un traitement de stabilisation pour relâcher les contraintes internes dues à l'écaillage pendant l'opération d'usinage. Le traitement appliqué consiste en un chauffage à 600 °C pendant une heure et un refroidissement à l'air.

2.1.3 Etat de référence:

En conformité avec les normes et les conditions d'utilisation de ces aciers, nous avons procédé à un traitement de trempe revenu des pièces. Les conditions de ce traitement sont:

- 1)- Austenitisation à 850 °C pendant 30 mn.
- 2)- Trempe à l'huile.
- 3)- Revenu à 550 °C pendant une heure.

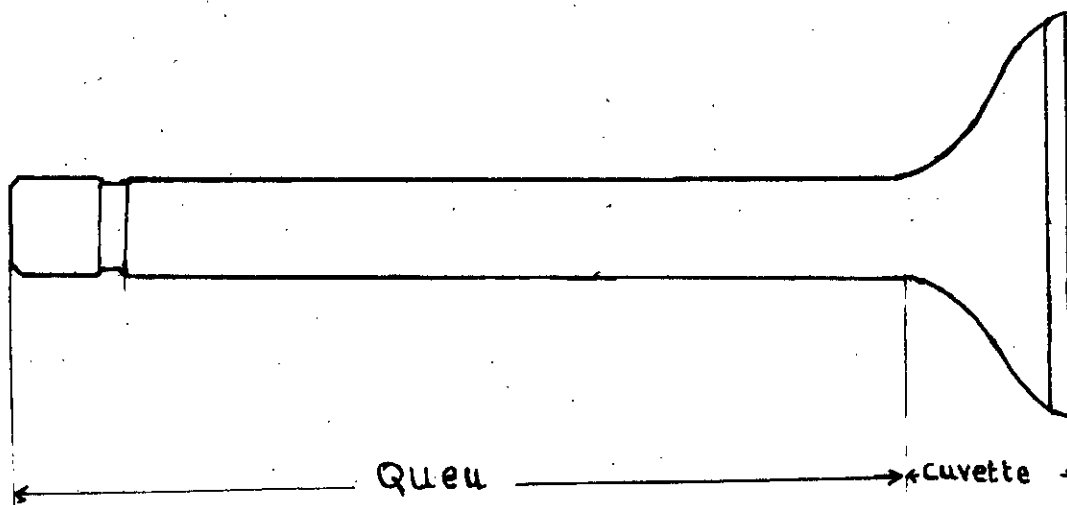


fig.23-Schémas d'une soupape d'échappement

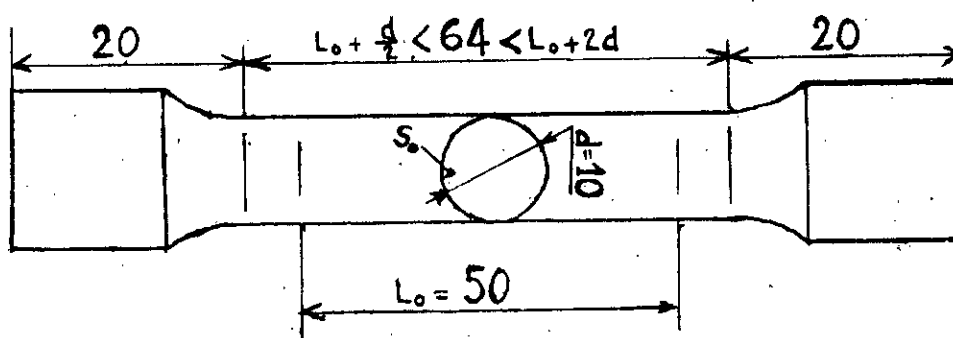


fig.28-Forme de l'éprouvette de traction

La structure des aciers à l'état revenu se présente sous la forme de grains fins de ferrite de couleur claire et dont la morphologie est héritée de l'ancien grain martensitique, l'espèce intergranulaire est plus sombre et est rempli de précipité fin de cémentite (figure 24). Les caractéristiques mécaniques des aciers à l'état revenu figurent dans le tableau suivant:

Tableau (8): Caractéristiques mécaniques des aciers 35 CD 4 et 42 CD 4 à l'état revenu

Caractéristiques Nm	Re (daN/mm ²)	Rm (daN/mm ²)	A (%)	Dureté HRC
35 CD 4	100,5	101	14	31,8
42 CD 4	105,6	107,3	13	34,4

2.2 TECHNIQUES EXPERIMENTALES:

Dans cette étude nous avons procédé à des essais de cyclage thermique sur un dispositif qui simule la fatigue thermique des essais mécaniques de traction et de dureté et enfin une étude structurale.

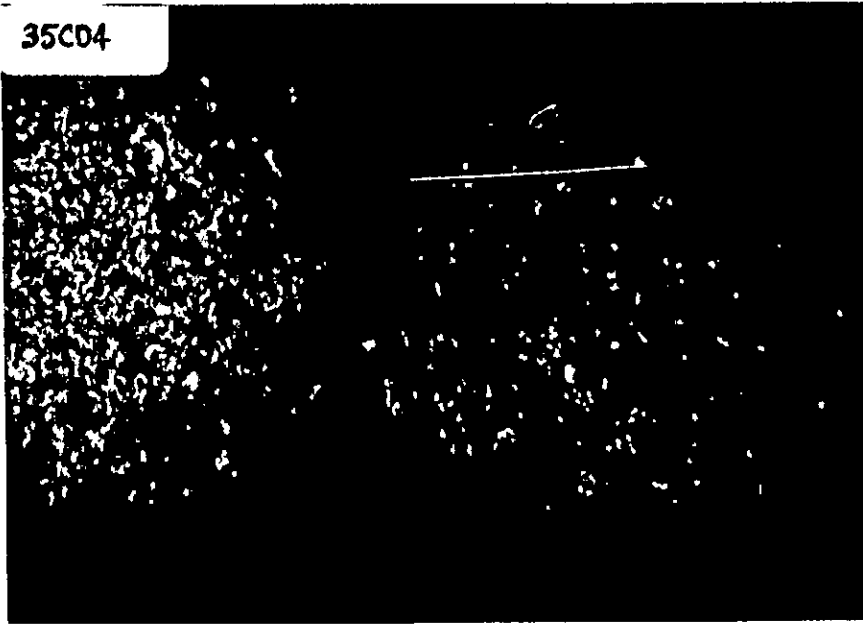
2.2.1 Essais de cyclage thermique:

2.2.1.1 Le dispositif expérimental:

Le dispositif utilisé se distingue par sa simplicité, sa fiabilité et sa facilité d'utilisation permettant d'agir sur les différents paramètres de cyclage (températures, durées, vitesses,...). Cette machine permet d'étudier l'évolution aussi bien de la structure, que des caractéristiques mécaniques et de l'endommagement au cours du cyclage thermique, la machine (fig 25) est constituée des parties suivantes:

- 1)- Four tubulaire de marque ADAMEL monté sur un support, la température maximale de chauffage est de 1050 C.
- 2)- Un support avec un contrepoids pour fixer la position du four.
- 3)- Un régulateur permet de fixer la température du four.
- 4)- Un bloc de puissance.
- 5)- Un bac de trempe en plexiglas rempli d'eau et de capacité de 40 litres.
- 6)- Un moteur à courant continu.

35CD4



G.500

42CD4



G.500

fig.24-Structure des aciers 35CD4 et 42CD4 à l'état trempé + revenu.

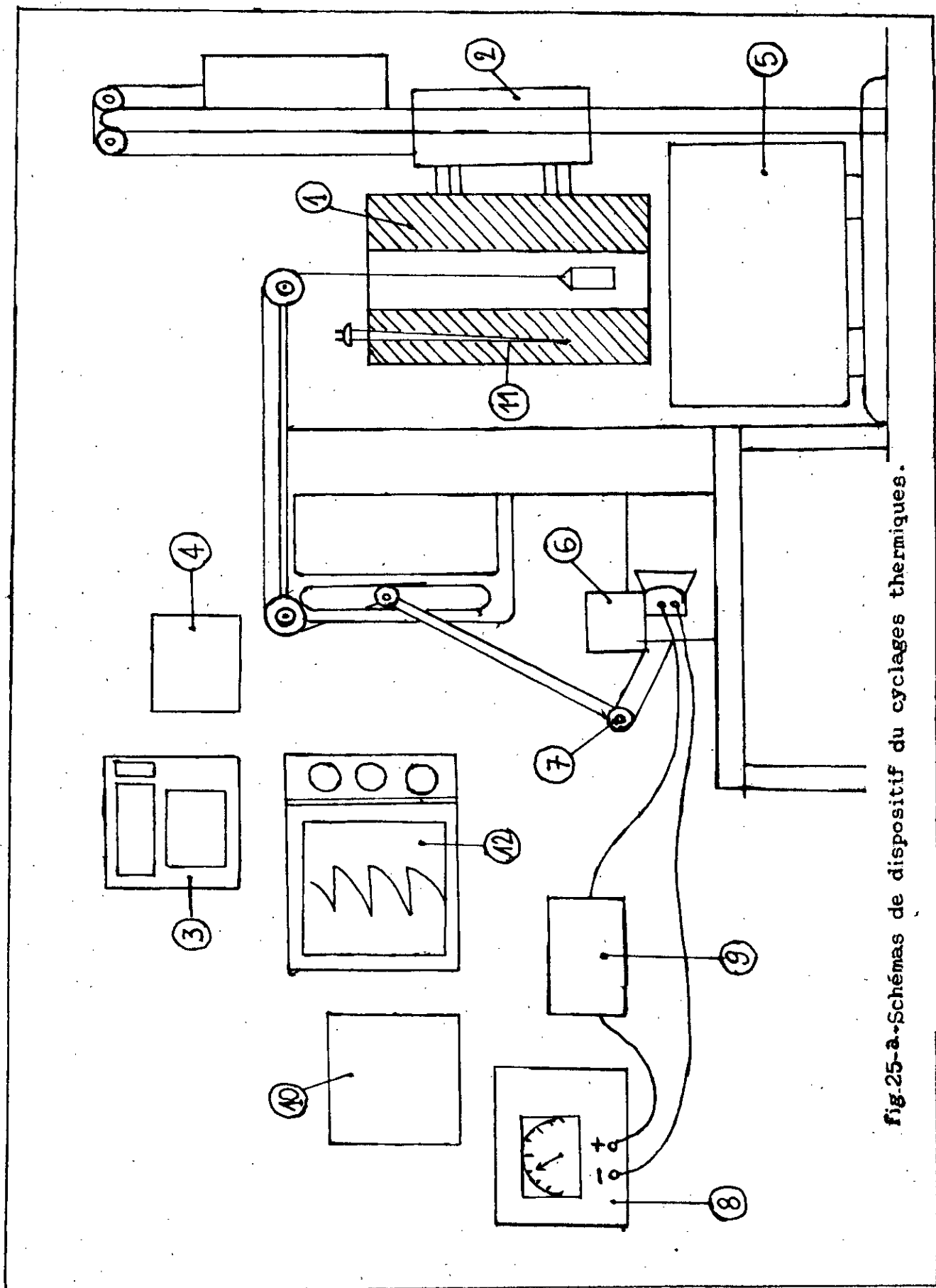


fig.25-a-Schémas de dispositif du cyclages thermiques.



fig. 25.b. Dispositif du cyclages thermiques.

- 7)- Un système mécanique de bielle-manivelle solidaire à l'axe du moteur pour obtenir un mouvement oscillatoire
- 8)- Une alimentation stabilisée du moteur permettant de fixer la vitesse du mouvement oscillatoire.
- 9)- Un temporisateur pour fixer la durée de maintien dans four.
- 10)- Un compteur de cycles.
- 11)- Un thermocouple chromel alumel pour contrôler la température de la pièce.
- 12)- Une table traçante pour obtenir la courbe des variations de la température de la pièce au cours du temps.

2.2.1.2 Conditions expérimentales:

Le cyclage thermique des pièces est obtenu de la manière suivante:

L'éprouvette accrochée par un fil en acier est reliée à l'extrémité de la bielle manivelle.

En fixant la puissance d'alimentation du moteur (tension, intensité) on obtient la vitesse désirée du mouvement oscillatoire de l'éprouvette entre la zone chaude (milieu du four) et la zone froide (dans le bac de trempe). Les vitesses de chauffage et de refroidissement de l'éprouvette sont ainsi fixés. Par la régulation on fixe la température maximale du four, la durée de maintien t_1 est également fixée par temporisation. Enfin la température du bain est fixée à 40 °C environ, au cours du cyclage le séjour de l'éprouvette dans le bac entraîne une température minimale de l'éprouvette élevée, cette dernière n'ayant pas le temps de refroidir. Pour déterminer la température de l'éprouvette, l'extrémité du thermocouple a été fixée à la surface de l'éprouvette dans sa partie centrale. De cette manière le thermocouple effectue le mouvement oscillatoire avec l'éprouvette à l'aide de la table potentiométrique, on trace les courbes de cyclage $\theta = f(t)$.

Dans cette étude nous avons procédé à deux essais dont les conditions sont:

1/ Premier essai:

- température du four : 800 °C
- température maximale de la pièce : 600 °C
- température minimale de la pièce : 350 °C
- temps nécessaire pour que la pièce atteigne la température maximale : 67 sec
- durée de maintien à chaud : 55 sec
- temps de refroidissement : 2 sec
- vitesse de chauffage : 3,37 °C/sec
- vitesse de refroidissement : 125 °C/sec
- durée du cycle : 124 sec

La courbe du cyclage thermique est représentée dans la figure (26)

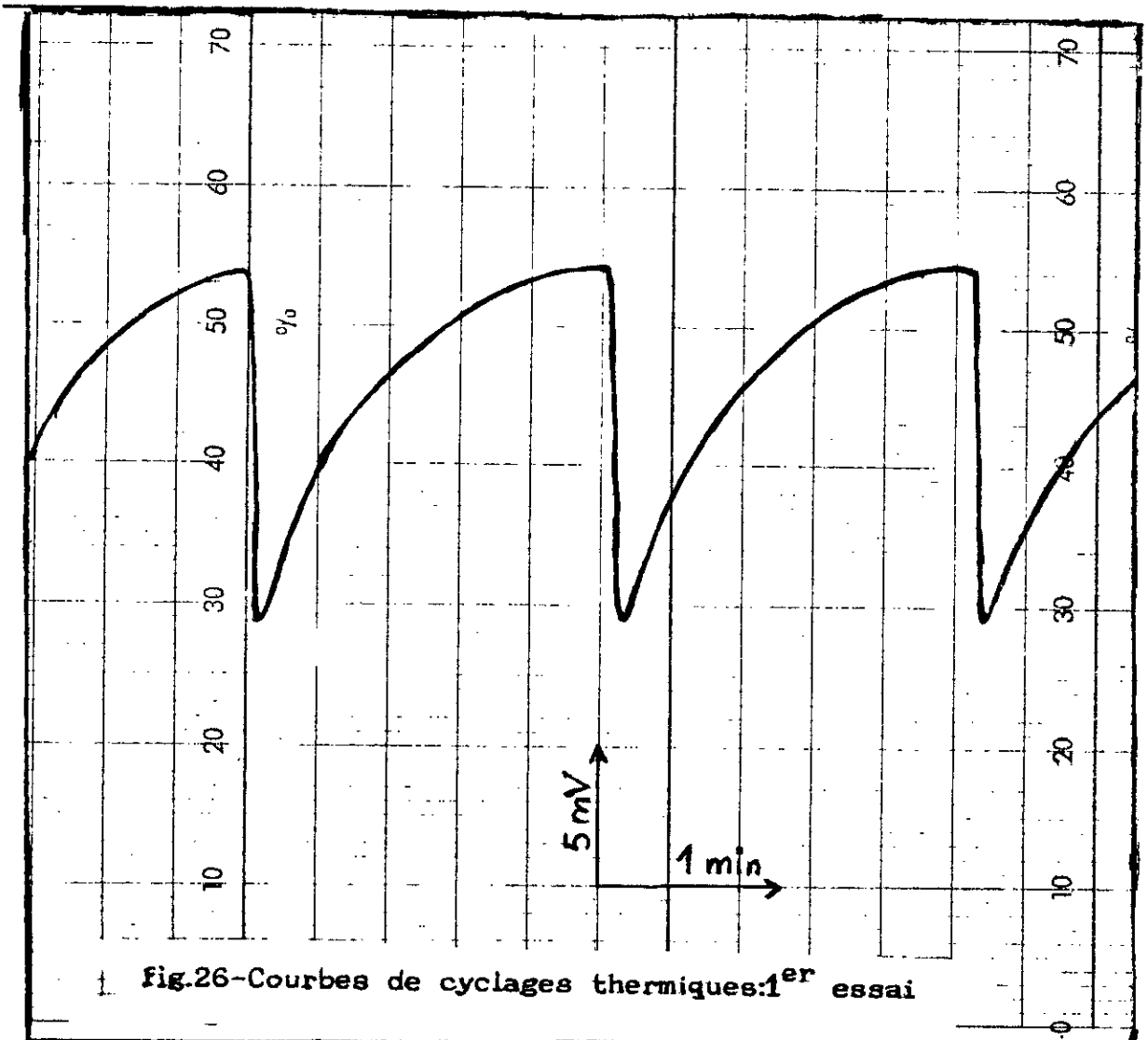


Fig.26-Courbes de cyclages thermiques:1^{er} essai

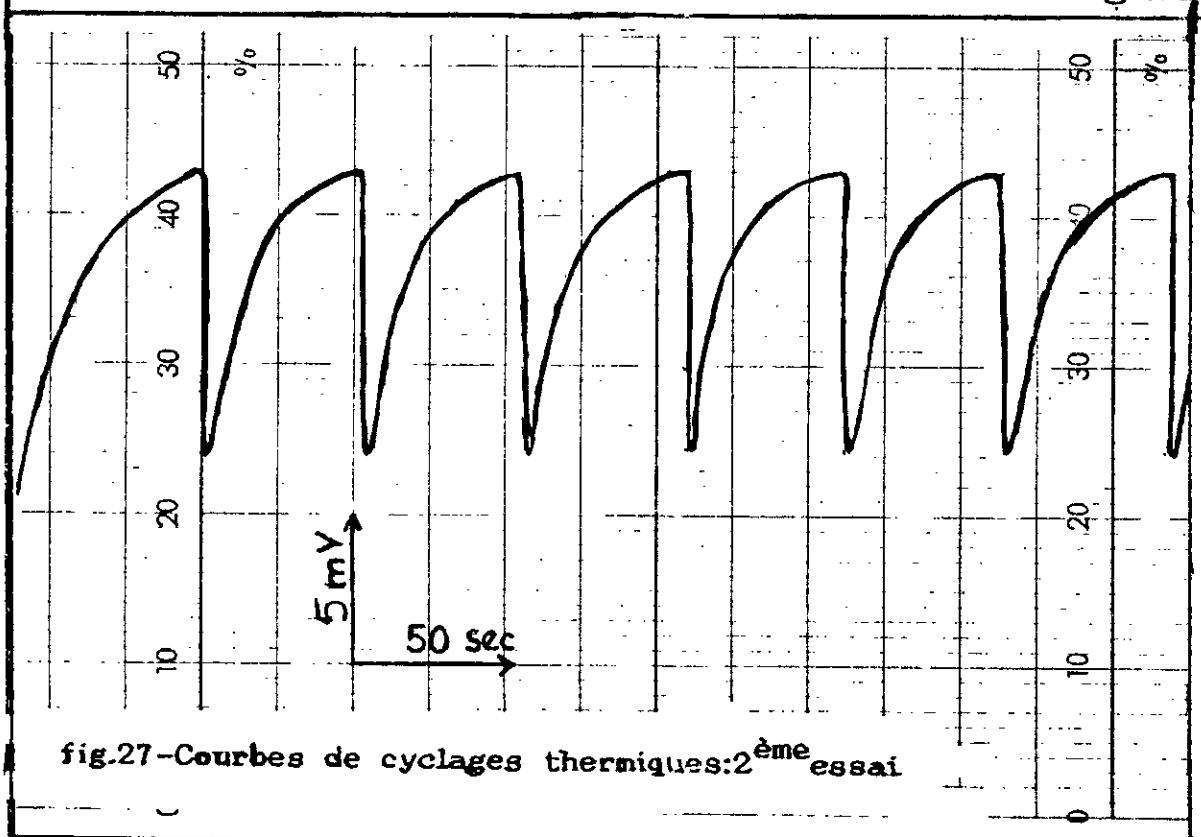


fig.27-Courbes de cyclages thermiques:2^{ème} essai

2/ Deuxième essai:

- température du four : 800 °C
- température maximale de la pièce : 500 °C
- température minimale de la pièce : 300 °C
- temps nécessaire pour que la pièce atteigne la température maximale : 22 sec
- durée de maintien à chaud : 30 sec
- temps de refroidissement : 2 sec
- vitesse de chauffage : 9,1 °C/sec
- vitesse de refroidissement : 100 °C/sec
- durée totale du cycle : 54 sec

La courbe de cyclage thermique du deuxième essai est représentée dans la figure (27).

2.2.2 Essai de traction:

Les conditions de l'essai sont ceux définis par la norme AFNOR NF A 03-151. La machine utilisée est de marque WOLPERT (laboratoire central de la SNVI). La forme et les dimensions de l'éprouvette sont ceux définies par la norme NF A 03-151 figure (28). Les caractéristiques obtenues de l'essai de traction sont:

- La résistance à la rupture R_m en daN/mm².
- La limite élastique conventionnelle à 0,2 % $R_{e0,2}$ en daN/mm²
- L'allongement à la rupture A en pourcent de déformation.

2.2.3 Essai de dureté:

Dans nos essais de dureté, on a choisi la dureté ROCKWELL utilisée particulièrement pour les aciers étudiés:

- L'essai ROCKWELL consiste à mesurer l'accroissement rémanent e de profondeur de pénétration

$$HRC = 100 - e_1$$

$$\text{avec: } e_1 = \frac{e}{0,002} \quad (e \text{ est en mm})$$

- Nos essais de dureté ont été effectués sur un duromètre de marque "LECO-TR.240" (labo de métallurgie -ENP-), les paramètres de l'essai sont:

. charge : 150 Kgf

. Pénétrateur en diamant de forme conique

2.2.4 Caractérisation structurale:

Nous avons utilisé pour l'observation microscopique un microscope métallographique de marque " CALEZEISS - JENA ".

Les échantillons ont subi des polissages au papier abrasif 120, 320, 600 et 1000 sous lubrification d'eau, suivie d'une finition au feutre avec de la pâte diamantée (1μ) et sous lubrification appropriée l'attaque au métal 4 % pendant 12 secondes.

CHAPITRE III

EVOLUTION STRUCTURALE DES ACIERS 35 CD4 ET 42 CD 4 AU COURS D'UN CYCLAGE THERMIQUE

3.1 EVOLUTION DE LA STRUCTURE DE L'ACIER 35 CD 4 :

3.1.1 Premier essai:

La structure revenue de l'acier 35 CD 4 est constituée d'une dispersion de fines précipités de cémentite alliée de couleur sombre sur un fond clair de ferrite. La structure de l'acier est aciculaire, elle ne permet pas, pour un grossissement de 500 de révéler la forme de la cémentite.

Au cours du cyclage thermique, on ne constate de changement qu'à partir de 400 cycles, marqué par une coalescence progressive de la ferrite et une tendance à la globulisation associée à une coalescence de la cémentite. Ces phénomènes sont observables à partir de 600 cycles. Après 1000 cycles, on remarque un phénomène de dégénérescence caractérisé par une croissance exagérée de la ferrite qui s'appauvrit en Carbone.

D'après les figures de la planche (I), les deux phases évoluent de manière progressive au cours du cyclage.

La dispersion des précipités de cémentite semble diminuer car ce carbure se localise dans des régions qui apparaissent plus sombres dans les figures.

3.1.2 Deuxième essai:

La structure revenue de l'acier 35 CD 4 subit au cours de ce cyclage une évolution qui n'est décelable qu'après 600 cycles. Les phénomènes produits sont identiques à ceux du premier essai: coalescence de la ferrite. La cémentite semble subir une croissance en volume (coalescence); et sa forme semble devenir globulaire au fur et à mesure du cyclage thermique la cinétique du processus semble moins rapide que celle du premier essai car on constate que les changements affectant la structure se produisent en retard planche (II) ; en effet, la structure obtenue après 800 cycles est similaire à celles obtenue après 400 cycles du premier essai.

3.2 EVOLUTION DE LA STRUCTURE DE L'ACIER 42 CD 4:

3.2.1 Premier essai:

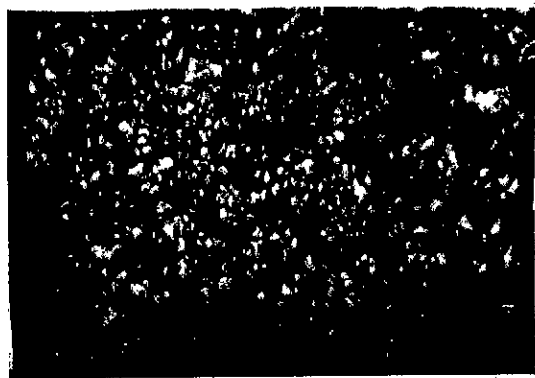
la structure aciculaire de revenue, héritée de la structure de trempe évolue au cours du cyclage de manière progressive; on

peut constater les transformations à partir des 200 premiers cycles. La ferrite subit une coalescence qui devient de plus en plus importante avec le nombre de cycles ou avec le temps. La cémentite subit à la fois une globulisation et une coalescence, ces phénomènes se produisant de façon progressive au cours du cyclage. Après 1000 cycles, les plages ferritiques sont importantes, les globules de cémentite se regroupent dans les régions sombres diminuant ainsi la dispersion. (Planche III).

3.2.2 Deuxième essai:

L'évolution de la structure est rapide, car à partir de 200 cycles, on constate des changements. A 400 cycles, la coalescence de la ferrite est importante. Après 800 cycles elle est très avancée, et les précipités de cémentite sont de forme globulaire et de taille importante.

L'analyse des figures de la planche (IV) montre que le processus est rapide dès le début du cyclage, les changements commencent mais ensuite, le processus semble se dérouler de façon régulière jusqu'à 800 cycles (planche IV).



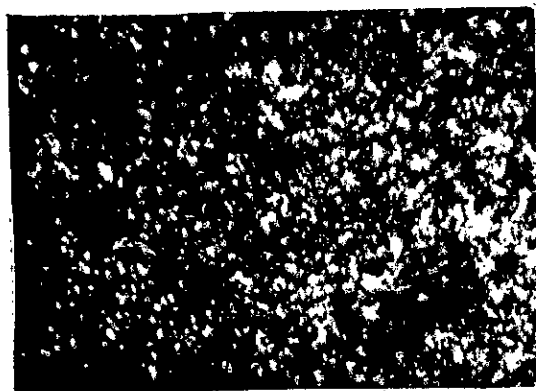
a-Etat de référence

G. 500



b-Après 200 cycles

G.500

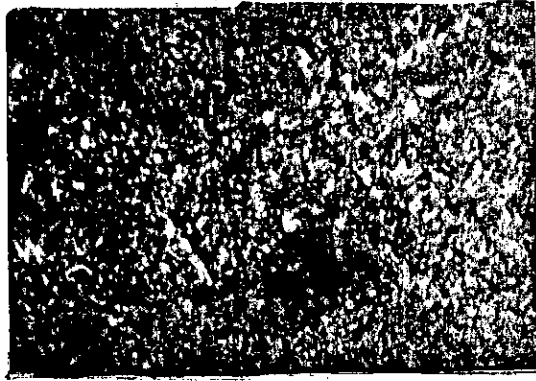


c-Après 400 cycles

G.500

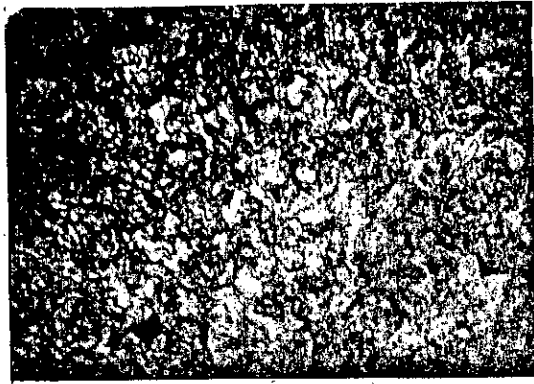
PLANCHE (I):(de a jusqu'à f).

Evolution structurale de l'acier 35 CD 4 au cours
de cyclage thermique (essai.1)



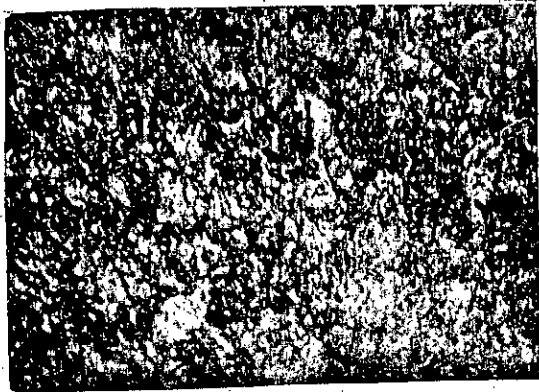
d-Après 600 cycles

G.500



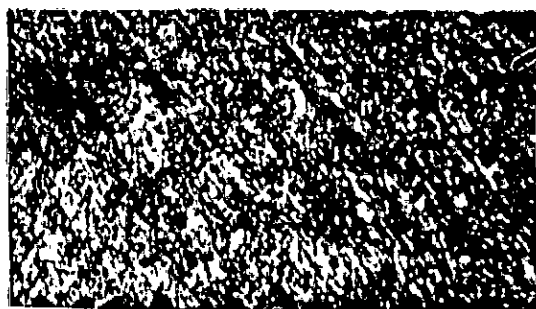
e-Après 800 cycles

G.500



f-Après 1000 cycles

G.500



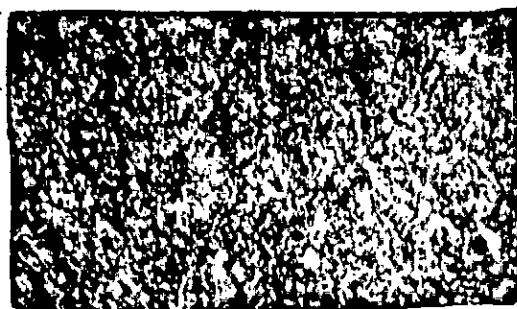
a-Après 200 cycles

G.500



b-Après 400 cycles

G.500



c-Après 600 cycles

G.500



d-Après 800 cycles

G.500

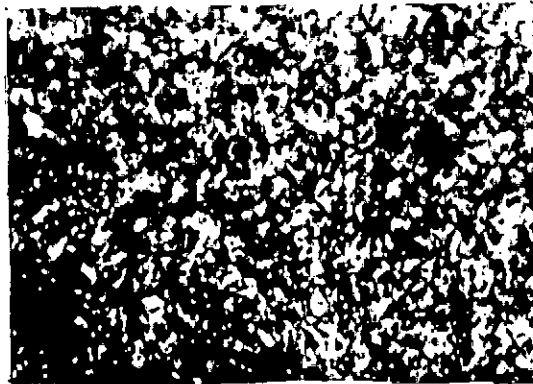
PLANCHE (II):(de a jusqu'à d).

Evolution structurale de l'acier 35 CD 4 au cours
de cyclage thermique (essai.2)



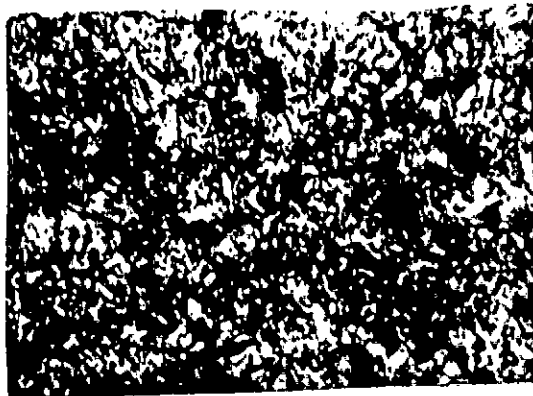
a-Etat de référence

G.500



b-Après 200 cycles

G.500

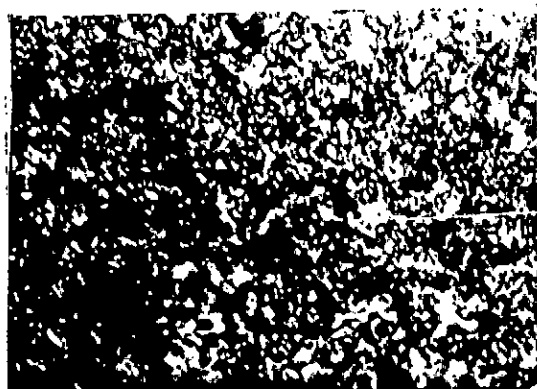


c-Après 400 cycles

G.500

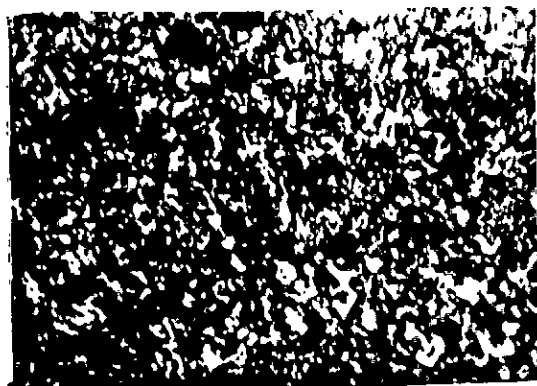
PLANCHE (III):(de a jusqu'à f).

Evolution structurale de l'acier 42 CD 4 au cours
de cyclage thermique (essai.1)



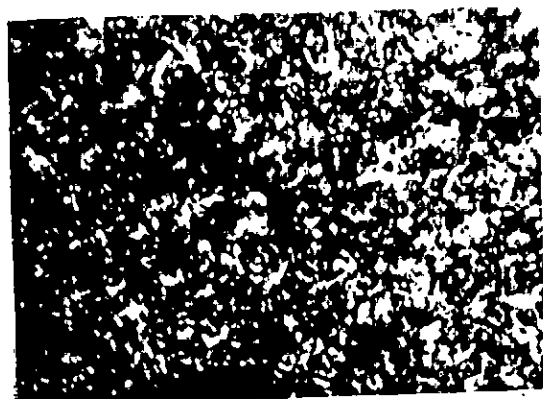
d-Après 600 cycles

G.500



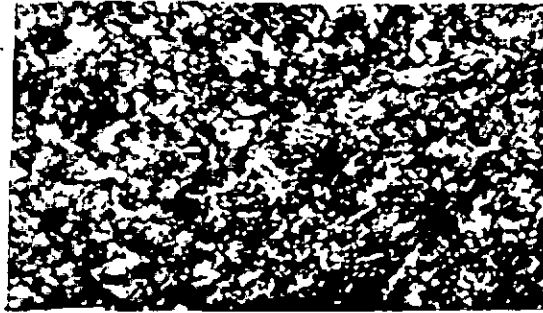
e-Après 800 cycles

G.500



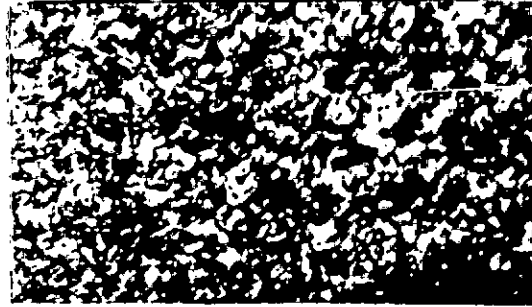
f-Après 1000 cycles

G.500



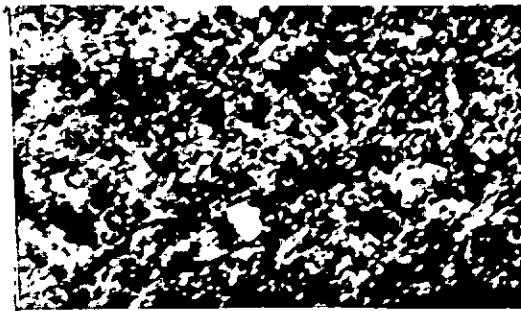
a-Après 200 cycles

G.500



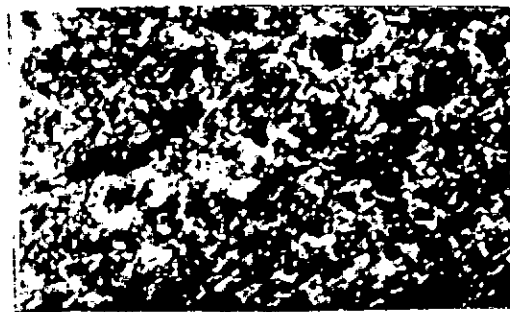
b-Après 400 cycles

G.500



c-Après 600 cycles

G.500



d-Après 800 cycles

G.500

PLANCHE (IV):(de a jusqu'à d).

Evolution structurale de l'acier 42 CD 4 au cours
de cyclage thermique (essai.2)

CHAPITRE IV

EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES

INTRODUCTION:

Après un certain nombre de cycles (de 200 à 1000 cycles), les éprouvettes sont destinées aux essais de traction et de dureté. Les caractéristiques mécaniques obtenues sont :

la dureté HRC, la résistance à la rupture, la limite élastique conventionnelle à 2 % de déformation et l'allongement à la rupture. Chaque résultat est la moyenne de deux essais pour la limite élastique, la résistance à la rupture et l'allongement à la rupture et de quatre essais pour la dureté HRC.

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux (de 9 à 12).

Tableau (9): Evolution des caractéristiques mécaniques de l'acier 35 CD 4 au cours du cyclage thermique (1^{er} essai).

Nombre de cycles	0	200	400	600	800	1000
Caractéristique mécanique						
HRC	31,8	29	26	26,7	14,3	1,9
Re (daN/mm ²)	100,56	69,82	49,26	66,03	47,4	45,7
Rm (daN/mm ²)	101	76,18	58,7	78,21	59,94	52,18
A%	14	15	16	11	18	30

Tableau (10): Evolution des caractéristiques mécaniques de l'acier 35 CD 4 au cours du cyclage thermique (2^{ème} essai).

Nombre de cycles Caractéristique mécanique	0	200	400	600	800
HRC	31,8	29,9	33,3	28,73	24,8
Re (daN/mm ²)	100,56	97,52	103,53	88,37	97,51
Rm (daN/mm ²)	101	106,65	101,52	94,91	101,67
A%	14	15	14	15	16

Tableau (11): Evolution des caractéristiques mécaniques de l'acier 42 CD 4 au cours du cyclage thermique (1^{er} essai).

Nombre de cycles Caractéristique mécanique	0	200	400	600	800	1000
HRC	34,4	30,33	25,6	27,95	16	2,15
Re (daN/mm ²)	105,64	71,61	69,07	74,66	50,78	43,67
Rm (daN/mm ²)	107,35	79,14	74,90	81,79	60,94	53,17
A%	13	14	16	12	16	24

Tableau (12): Evolution des caractéristiques mécaniques de l'acier 42 CD 4 au cours du cyclage thermique (2^{eme} essai).

Nombre de cycles	0	200	400	600	800
Caractéristiques mécaniques					
HRC	34,4	30,8	35	27,7	24,76
Re (daN/mm ²)	106,64	105,64	108,7	100,05	93,45
Rm (daN/mm ²)	107,35	109,90	110,52	105,5	104,90
A%	13	15	12	14	15

4.1 VARIATION DE LA DURETE:

4.1.1 Premier essai:

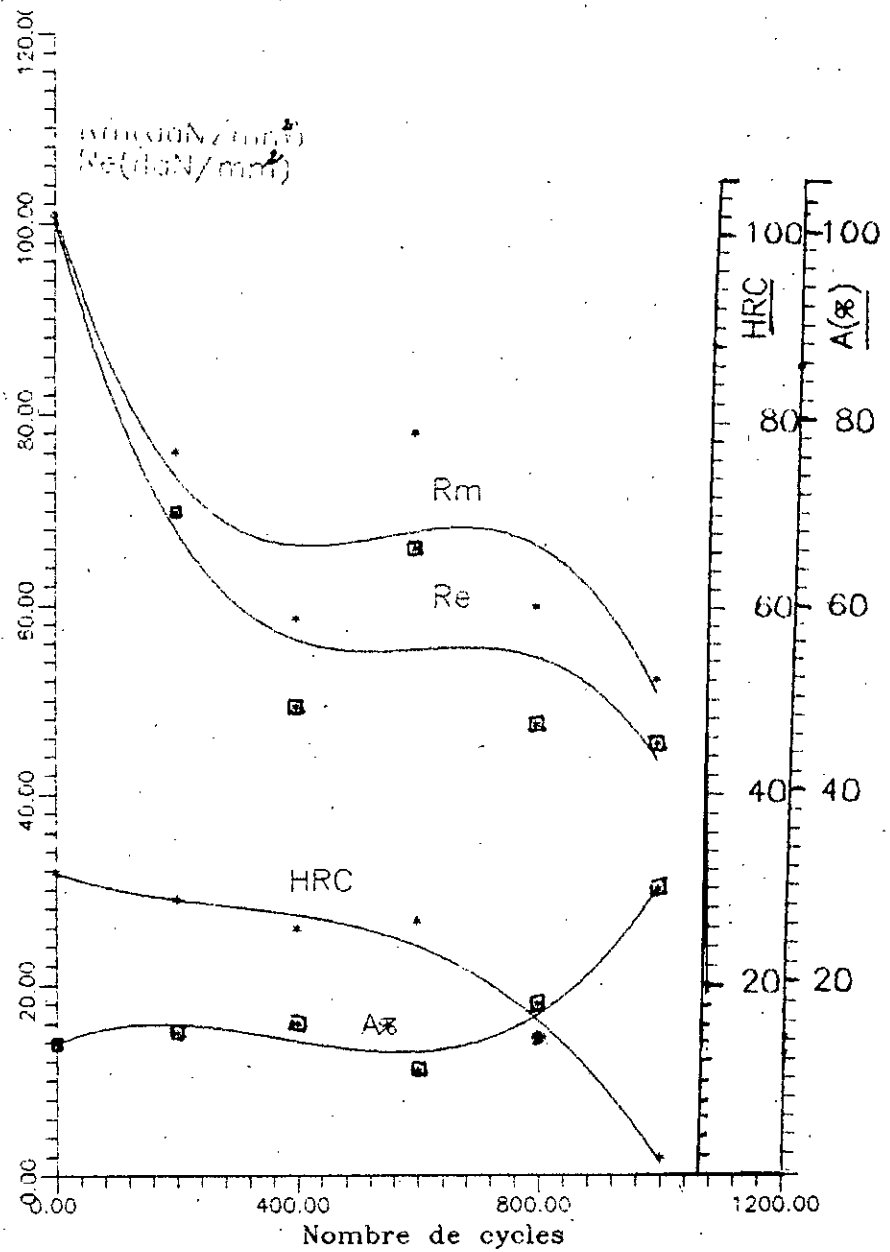
Pour l'acier 35 CD 4 l'analyse des résultats des variations de la dureté au cours du cyclage thermique montre que pendant les 200 premiers cycles l'acier subit un adoucissement faible de 2,8 points correspondant à une chute relative de 8,8 %. Pendant une deuxième phase entre 400 et 600 cycles, on constate un très faible durcissement de 0,7 points correspondants à une variation relative de 2,7 %.

Enfin après 600 cycles, la dureté subit une chute importante estimée à 66 % en moyenne entre 600 et 1000 cycles (figure 29). On remarque la dureté semble décroître de façon régulière (figure 33).

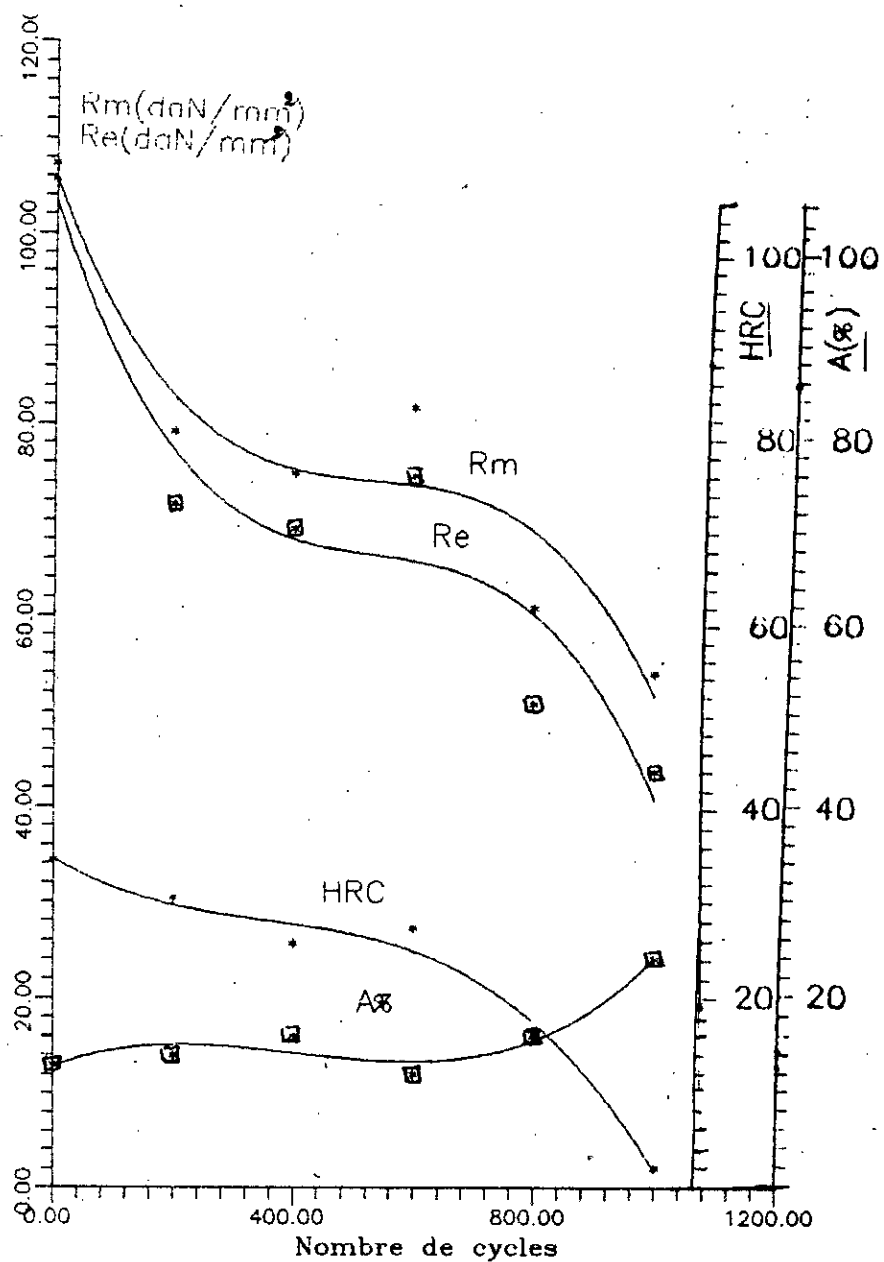
Pour l'acier 42 CD 4, les mêmes phénomènes sont observés:

- Un adoucissement pendant les 400 premiers cycles, au cours desquelles la dureté subit une chute de 14% environ. Entre 400 et 600 cycles l'acier subit un faible durcissement correspondant à un accroissement de 6,5 % de la dureté.

Enfin entre 600 et 1000 cycles, l'adoucissement est important : la chute de la dureté atteint 64 % (figure 30 et 33).



fig(29): Evolution des caracteristiques mecaniques au cours de cyclage thermique (35 CD, 4), (essai.1)



fig(30): Evolution des caracteristiques mecaniques au cours de cyclage thermique (42 CD 4). (essai.1)

4.1.2 Deuxième essai:

Pour l'acier 35 CD 4 on constate une baisse de la dureté pendant les 200 premiers cycles, suivie d'un important durcissement de 17 % jusqu'à 400 cycles, puis une chute régulière pendant les cycles suivants qui atteint 16 % à 800 cycles (figure 31).

L'acier 42 CD 4 a le même comportement, le durcissement à 400 cycles est plus faible car l'accroissement relatif de la dureté n'est que de 8 %. La chute de dureté après 400 cycles est également plus faible, elle atteint 11 % (figure 32). Les variations de la dureté des deux aciers sont plus faibles que dans le cas du premier essai (figure 34).

4.2 VARIATION DE LA LIMITE ÉLASTIQUE:

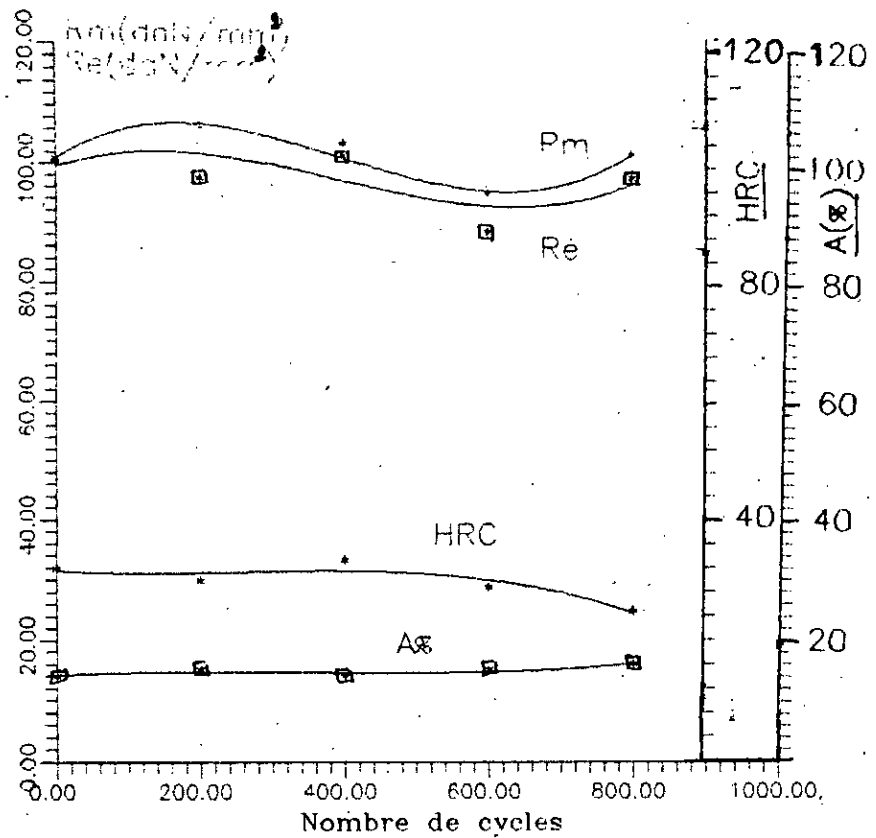
4.2.1 Premier essai:

La limite élastique à 0,2 % varie dans le même sens que la dureté. Pour l'acier 35 CD 4 on observe une variation en trois étapes:

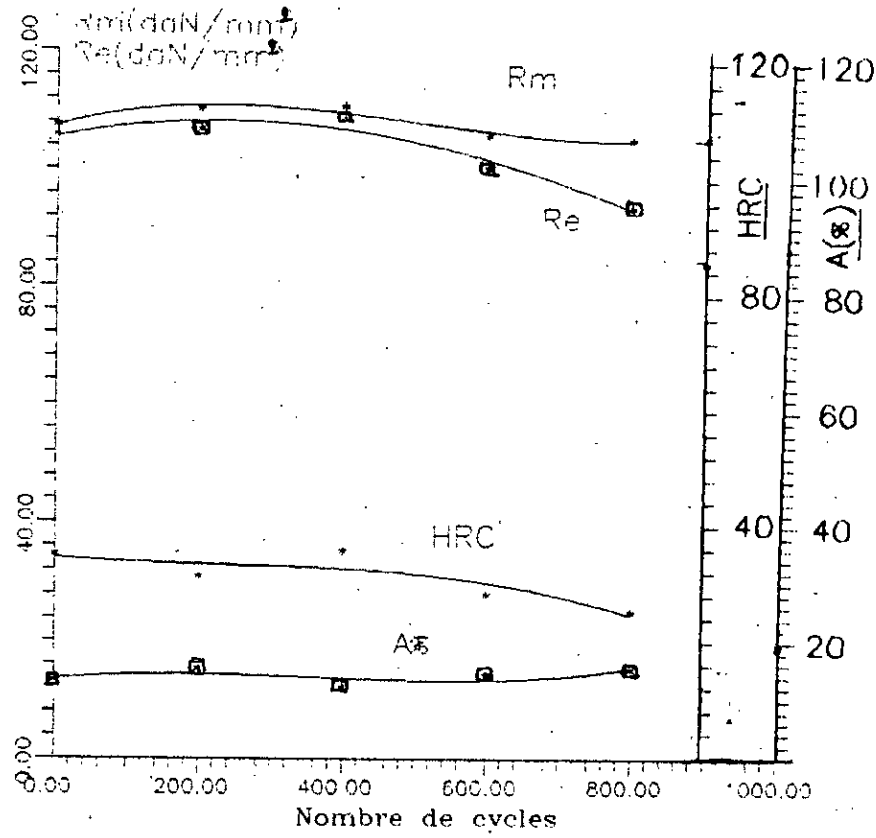
- Première étape correspondant aux premiers 400 cycles : la limite élastique subit un abaissement de l'ordre de 30 % .
- Deuxième étape : de 400 à 600 cycles pendant laquelle se produit une stabilisation de la caractéristique .
- Une troisième étape de 600 à 1000 cycles, la limite élastique subit un abaissement de 16 % (figure 29).
- Pour l'acier 42 CD 4, les variations de la limite élastique se produisent de la même manière que celles de l'acier 35CD4:
 - * première étape (jusqu'à 400 cycles): un abaissement de 18 % .
 - * deuxième étape (de 400 à 600 cycles): stabilisation.
 - * troisième étape (de 600 à 1000 cycles): une chute de 23 % (figure 30).

4.2.2 Deuxième essai:

L'évolution de la limite élastique $Re_{0,2}$ est similaire à celle de la dureté: un abaissement dans une première étape qui va jusqu'à 200 cycles (3 % pour 35 CD 4 et 0,93 % pour 42 CD 4) suivie d'une augmentation à 400 cycles (de 6 % pour 35 CD 4 et 3 % pour 42 CD 4) et enfin une chute pendant les cycles suivants (9,4 % pour 35 CD 4 et 7,3 % pour 42 CD 4) (figure 31 et 32).



fig(31): Evolution des caracteristiques mecaniques au cours de cyclage thermique.(35 CD 4) (essai.2)



fig(32): Evolution des caracteristiques mecaniques au cours de cyclage thermique.(42 CD 4) (essai.2)

4.3 VARIATION DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE:

4.3.1 Premier essai:

Comme la dureté et la limite élastique, la résistance à la rupture R_m évolue en trois étapes.

Dans le cas de l'acier 35 CD 4 ces étapes sont:

- Première étape (jusqu'à 400 cycles): la résistance subit une chute de 28 % .
- Deuxième étape (de 400 à 600 cycles): la résistance augmente de 8 % .
- Troisième étape (de 600 à 1000 cycles): la résistance décroît, la chute est de 18 % (figure 29). La résistance de l'acier 42 CD 4 évolue de la manière suivante (figure 30).
 - * première étape (jusqu'à 400 cycles): l'abaissement atteint 16 % .
 - * deuxième étape (de 400 à 600 cycles): l'augmentation de la résistance atteint 2,5 % .
 - * troisième étape (de 600 à 1000 cycles): la chute de R_m atteint 19 % .

4.3.2 Deuxième essai:

la résistance R_m des deux aciers varie dans le même sens que la dureté et la limite élastique (figure 31 et 32).

Une croissance de la résistance pendant les 200 premiers cycles suivie d'une stabilisation jusqu'à 400 cycles .

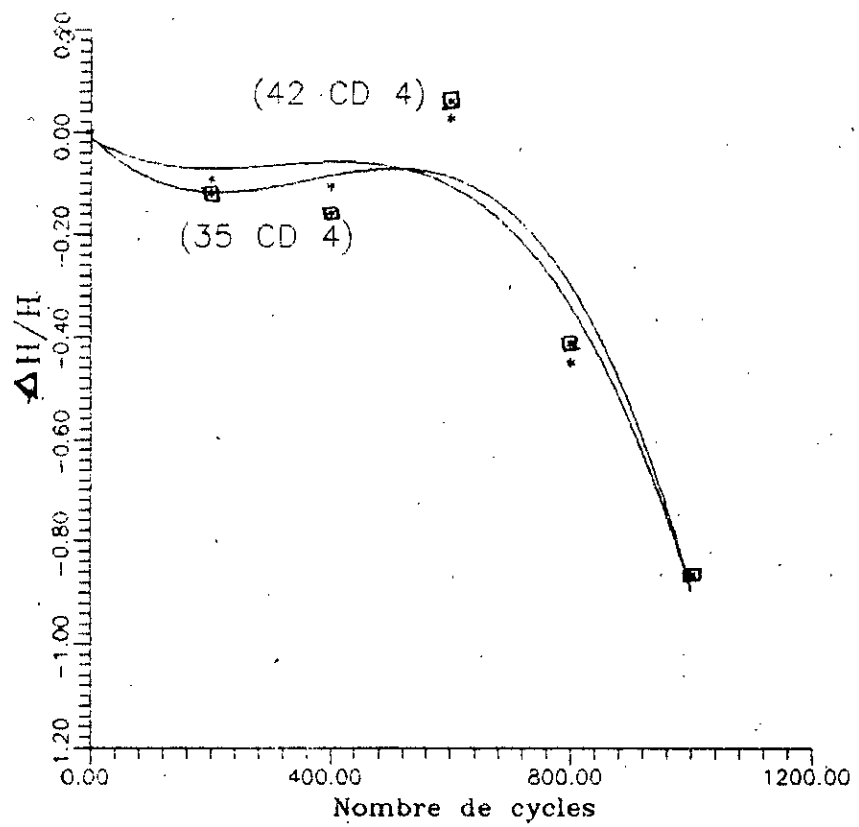
Enfin une chute régulière de la résistance, qui atteint 10% à 800 cycles.

Les variations des caractéristiques, limite élastique , résistance et dureté sont différentes de celles du premier essai. Elles sont plus modérées et le comportement au cours des premiers 400 cycles est différent.

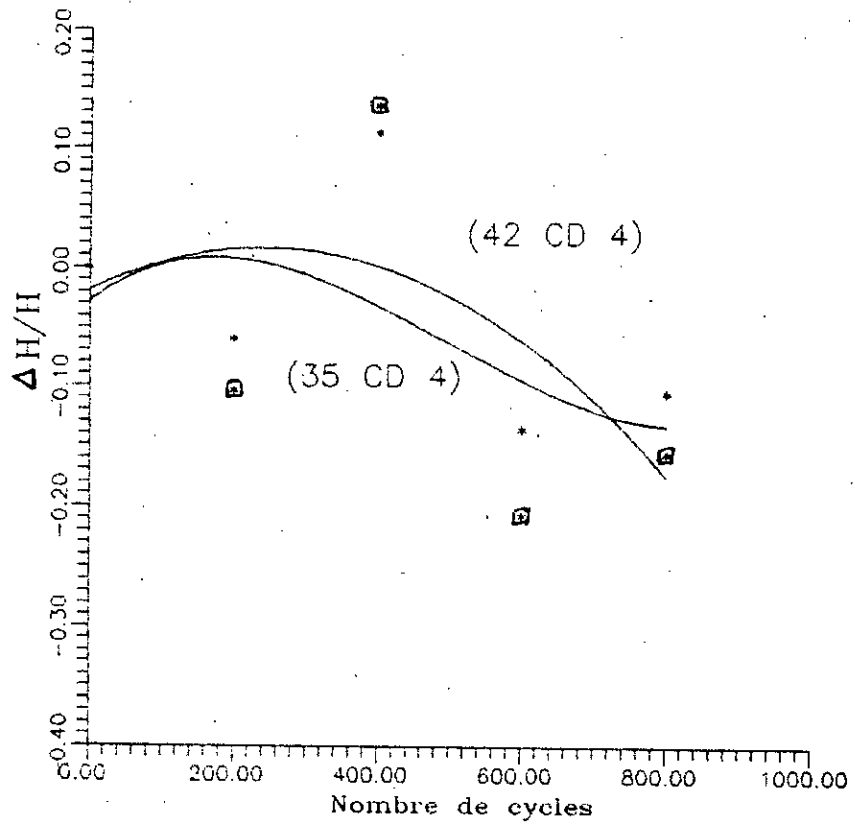
4.4 VARIATIONS DE L'ALLONGEMENT:

4.4.1 Premier essai:

L'allongement à la rupture A varie différemment des autres caractéristiques étudiées précédemment. Pour les deux aciers on a constaté une évolution de A en trois étapes:



fig(33):Variation relative de la durete au cours de cyclage.(essai.1)



fig(34):Variation relative de la durete au cours de cyclage thermique.(essai.2)

Pour l'acier 35 CD 4 , ces étapes sont (figure 29):

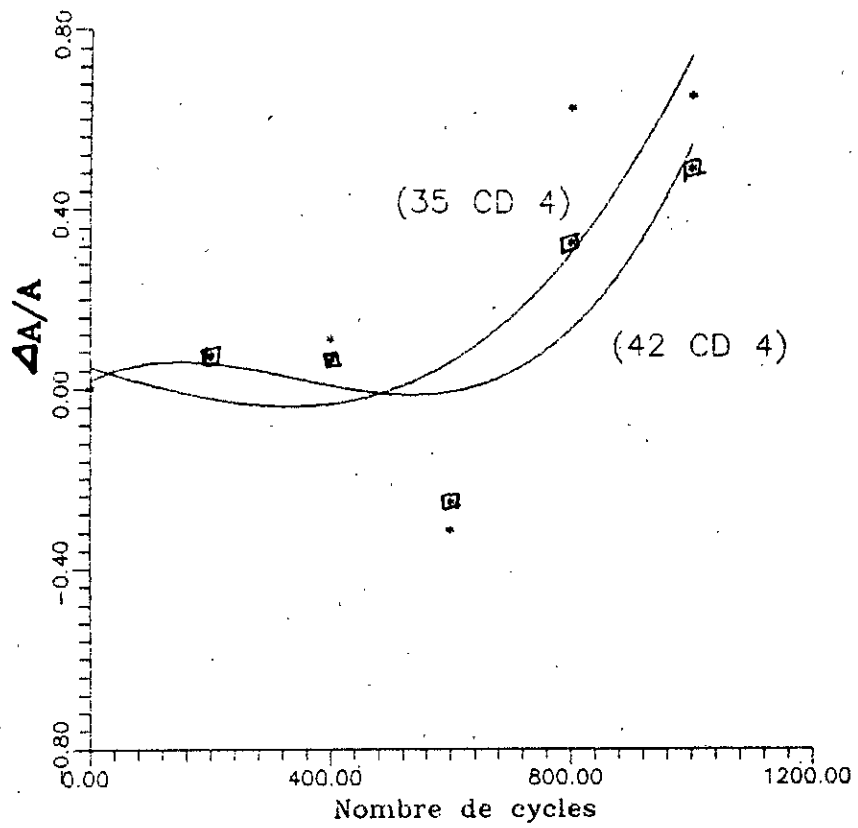
- Première étape (jusqu'à 200 cycles) : une croissance de l'allongement de 7 % .
- Deuxième étape (de 200 a 600 cycles): l'allongement subit une chute importante de 7,1 % .
- Troisième étape (de 600 à 1000 cycles) : l'accroissement de l'allongement est important, il est de 65 % .

pour l'acier 42 CD 4 l'évolution de l'allongement se produit de la manière suivante (figure 30 et 35):

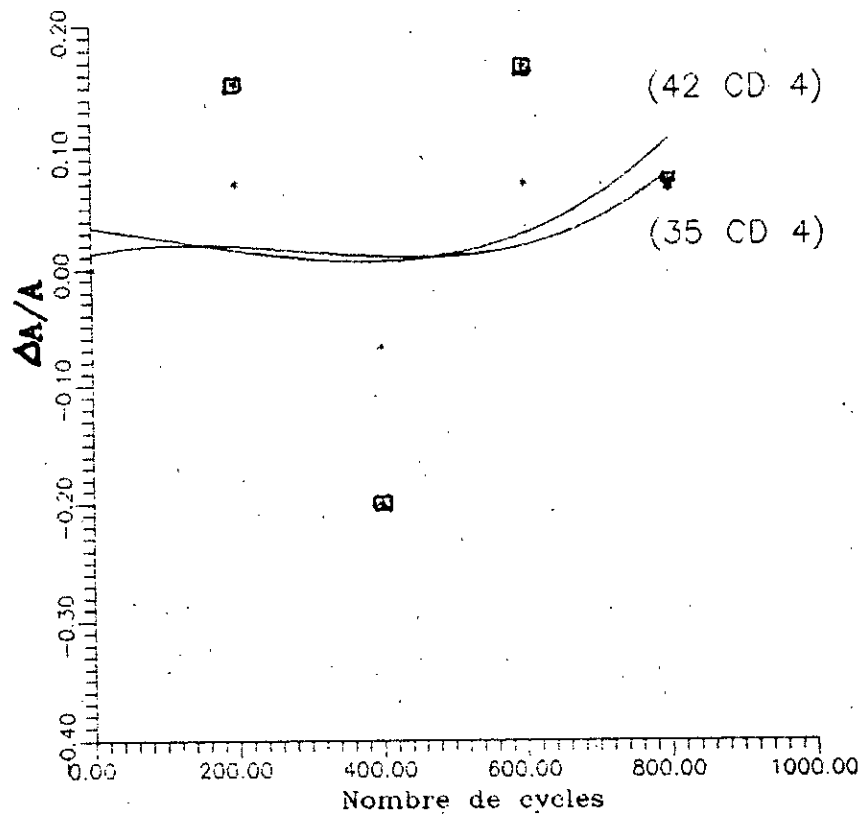
- Première étape (jusqu'à 200 cycles): l'allongement augmente de 11 % .
- Deuxième étape (de 400 à 600 cycles): l'allongement subit une chute de 10,5 % .
- Troisième étape (de 600 à 1000 cycles): une nouvelle augmentation de l'allongement qui atteint en moyenne 42 % .

4.4.2 Deuxième essai:

Les variations de l'allongement à la rupture des deux aciers lors du cyclage sont décrites par les figures 31 et 32, ces variations sont faibles . Les figures 35 et 36 montrent une tendance à la stabilité de l'allongement. Pour les deux aciers , on peut observer une faible diminution de l'allongement entre 200 et 600 cycles suivie d'une faible augmentation entre 600 et 800 cycles pour les deux aciers (figure 36).



fig(35):Variation relative de $A\epsilon$ au cours de cyclage thermique.(essai.1)



fig(36):Variation relative de $A\epsilon$ au cours de cyclage thermique.(essai.2)

CHAPITRE V

INTERPRETATIONS GENERALES DES RESULTATS

INTRODUCTION:

Dans cette étude, les résultats obtenus montrent le comportement de deux aciers faiblement alliés au Chrome-Molybdène au cours d'un cyclage thermique. Les facteurs du cyclage thermique sont : les températures maximale et minimale , le différentiel thermique $\Delta\theta$, les durées de maintien et les vitesses de chauffage et de refroidissement. Le choix des deux aciers, permet d'étudier le rôle du Carbone.

Les paramètres du cyclage thermique dans les deux essais sont exposés dans le tableau suivant:

Tableau (13): Paramètres de cyclage.

Essai	1	2
Paramètres		
θ_{\max} (°C)	600	500
θ_{\min} (°C)	350	300
$\Delta\theta$ (°C)	250	200
Maintien à θ_{\max} (t_2) (s)	55	30
Vitesse de chauffage (°C/s)	3,73	9,1
Vitesse de refroidissement (°C/s)	125	100

5.1 EFFETS DES PARAMETRES DU CYCLAGE THERMIQUE:

Les paramètres du cyclage agissent sur la structure de l'acier et sur ses caractéristiques mécaniques. Les conditions de cyclage thermiques utilisées permettent une évolution de l'acier différente lors des deux essais.

5.1.1 Effets sur la structure:

Au cours du cyclage thermique, la structure ne subit pas de transformations de phases, car les constituants (ferrite et cémentite) sont des phases d'équilibre stables aux températures du cyclage. La seule évolution constatée concerne la forme et la taille des constituants.

5.1.1.1 Evolution de la cémentite:

Avant le cyclage, dans la structure revenue, les précipités de cémentite alliée au Mn, Cr, Mo ont la forme de bâtonnets (précipités allongés).

La cémentite qui précipite au cours du revenu dans le grain ferritique n'est pas observable ; pas contre celle qui précipite entre les grains de ferrite est très nette (région sombre).

Le grossissement des particules de cémentite au cours du cyclage est régi par les facteurs:

- 1- Les coefficients de diffusion de Carbone, de diffusion des éléments d'addition (Cr, Mo, Mn) et d'autodiffusion du fer.
- 2- L'énergie libre ou force motrice des processus de coalescence à la température maximale du cyclage.
- 3- Les contraintes thermiques engendrées par le cyclage.

La globulisation de la cémentite se fait de façon progressive au cours du cyclage, pendant la phase de maintien à chaud. Au cours du refroidissement le processus est interrompu, il reprendra au cours de la phase suivante de chauffage. Le taux de globulisation est proportionnel au nombre de cycles. Les étapes du processus sont schématisées de la manière suivante:

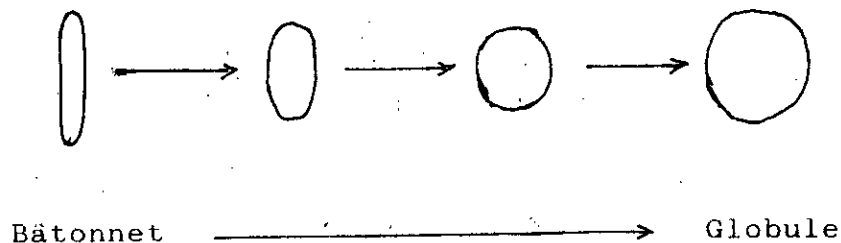


Figure 37 : *Processus de la globulisation de la cémentite*

Ce phénomène se produit par diffusion des éléments C, Mn, Cr et Mo et par auto diffusion du fer. Le Carbone étant le plus actif car son coefficient de diffusion est le plus élevé.

L'explication de l'évolution de la forme longitudinale à la forme sphéroïdale est donnée par les considérations thermodynamiques car l'énergie interfaciale de la forme sphérique est la plus faible, donc l'énergie libre de la forme globulaire est plus basse que celle de la forme longitudinale.

La coalescence de la cémentite se produit par le mécanisme de diffusion de deux manières:

- Par apport d'atomes de Carbone, Chrome, Molybdène et Manganèse issus de la coalescence de la ferrite.
- Par " absorption " des petits précipités de cémentite par les particules plus grosses.

On a constaté une cinétique plus rapide pour le premier essai qui s'explique par un gradient thermique et un temps de maintien à chaud plus élevé ce qui engendre des contraintes thermiques plus importantes d'où l'accélération de processus.

5.1.1.2 Evolution de la ferrite:

La ferrite évolue de la forme aciculaire fine héritée de la phase martensitique vers une forme coalisée. Ce phénomène se produit par autodiffusion du Fer, par diffusion du Silicium, élément non soluble dans la cémentite et enfin par la diffusion du Carbone, du Manganèse et du Chrome résultant de la dissolution de la cémentite précipitée dans les grains ferritiques.

Les éléments C, Cr, Mo et Mn quittent la phase ferritique vers les joints de grains pour participer à la coalescence de la cémentite.

Le processus est plus rapide dans le premier essai à cause du niveau des contraintes thermiques.

5.1.2 Effets sur les caractéristiques mécaniques:

D'après les résultats obtenus (tableaux de 9 à 12), on constate que les variations des caractéristiques mécaniques sont plus importantes dans le premier essai pour les deux aciers. On constate que la dureté de l'acier 35 CD 4 est plus faible pendant le premier essai que pendant le second et ce à n'importe quel nombre de cycles. La même remarque est faite pour l'acier 42 CD 4; ce résultat est dû aux conditions du cyclage qui sont plus sévères dans le premier essai.

5.2 EFFET DU TAUX DE CARBONE:

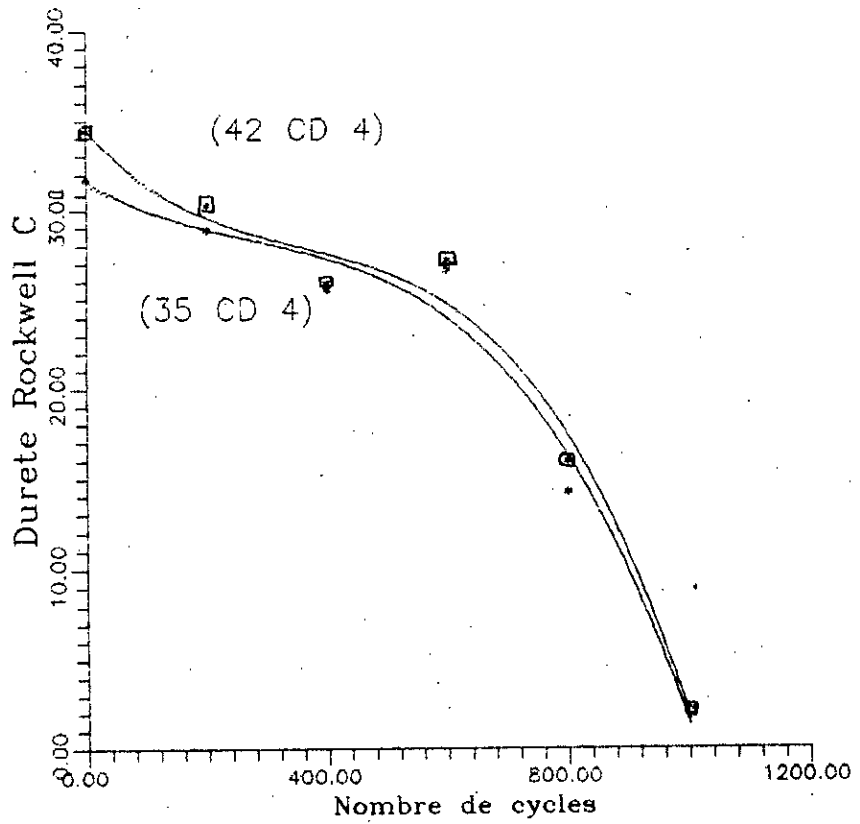
La comparaison des résultats des deux aciers pour chaque nombre de cycle montre l'effet du taux de Carbone sur le comportement au cours du cyclage.

5.2.1 Effet sur l'évolution structurale:

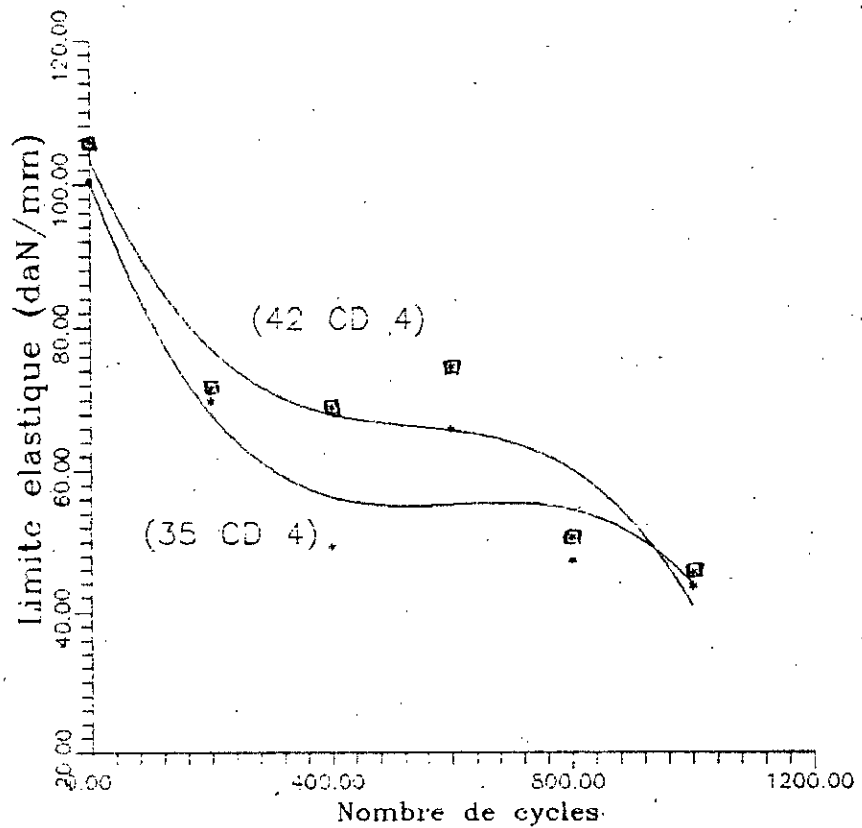
Les résultats obtenus ne permettent pas de déterminer une différence dans les processus d'évolution de la structure des deux aciers. En principe un taux plus élevé de Carbone a un effet plus marqué sur le processus de globulisation et de coalescence (flux plus important).

5.2.2 Effets sur le comportement mécanique:

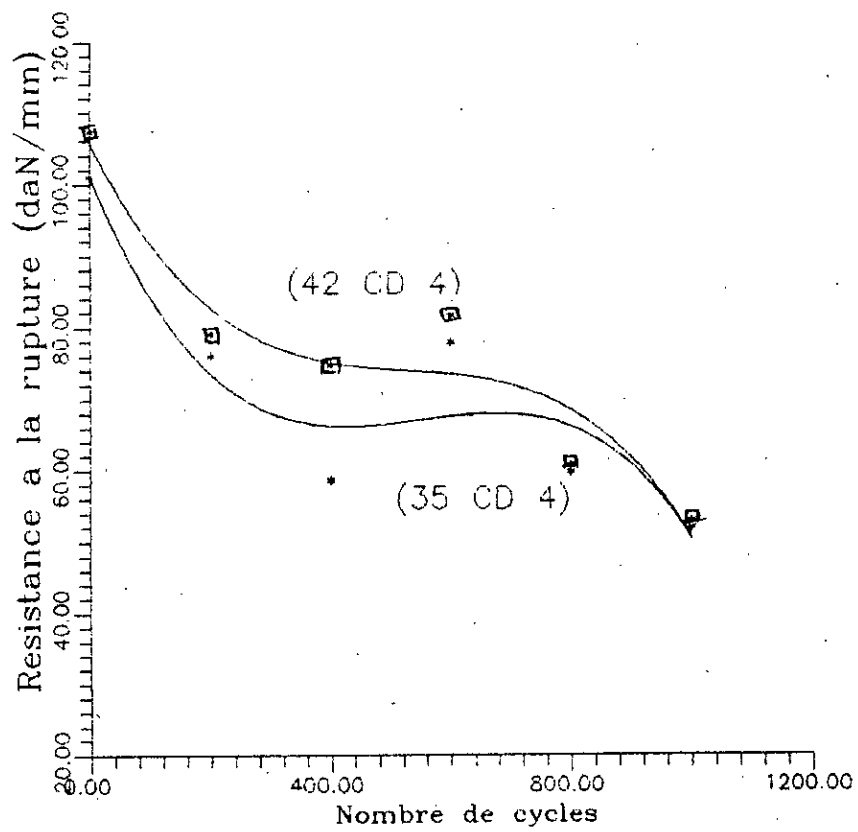
Les résultats obtenus montrent que les aciers 35 CD 4 et 42 CD 4 ont pratiquement le même comportement au cours du premier essai (figures de 38 à 41); le même résultat est obtenu au cours du deuxième essai (figures de 42 à 45). Ce comportement peut être expliqué par le taux de Carbone proche dans les deux nuances: une différence de 0,07 % de Carbone n'influence pas beaucoup sur le comportement de l'acier.



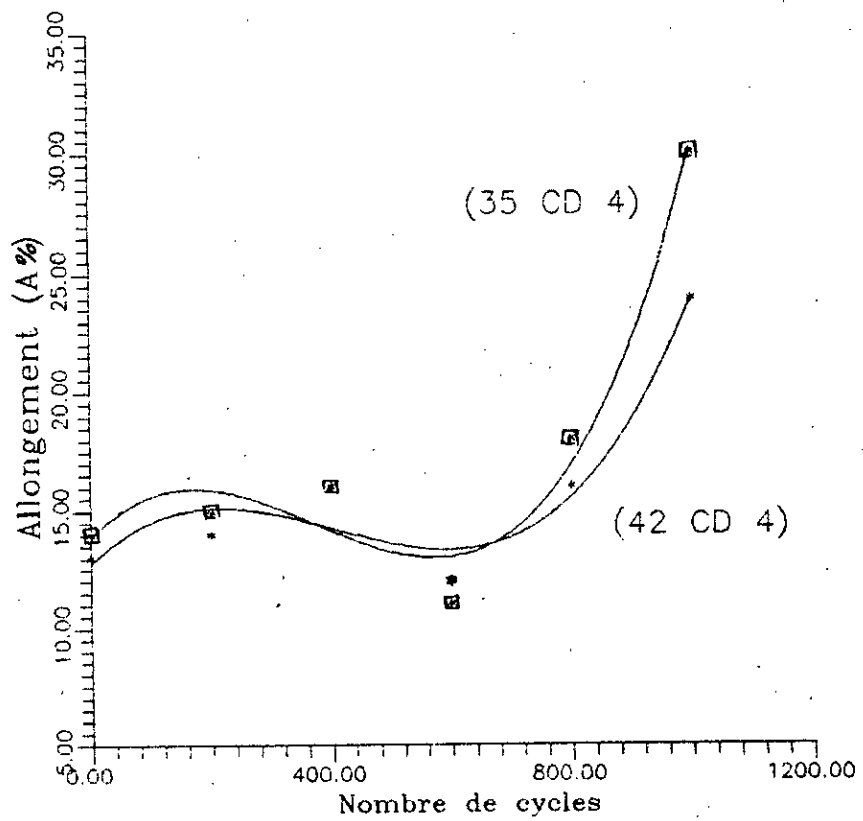
fig(38):Variation de la durete Rockwell C au cours de cyclage.(essai.1)



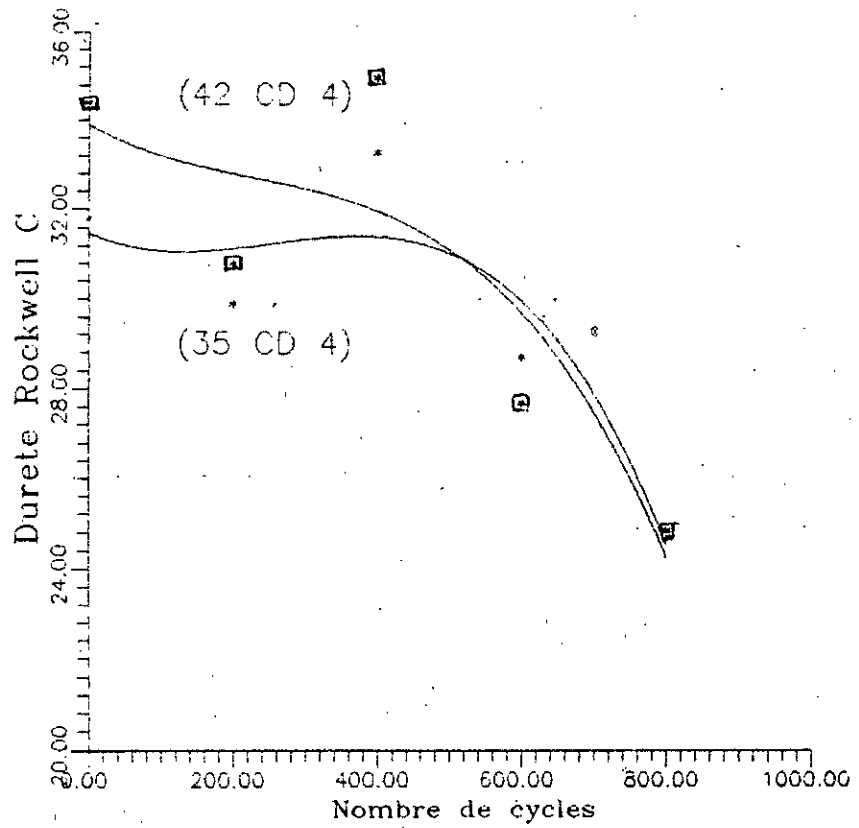
fig(39):Variation de la limite elastique au cours de cyclage.(essai.1)



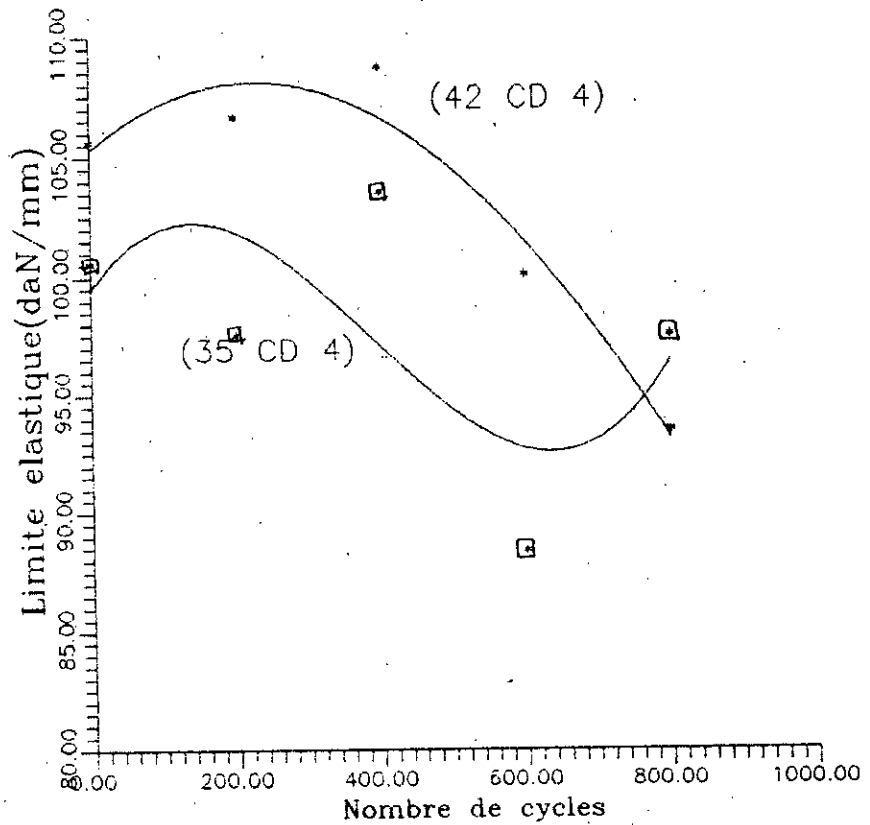
fig(40):Variation de la resistance a la rupture au cours de cyclage thermique.(essai.1)



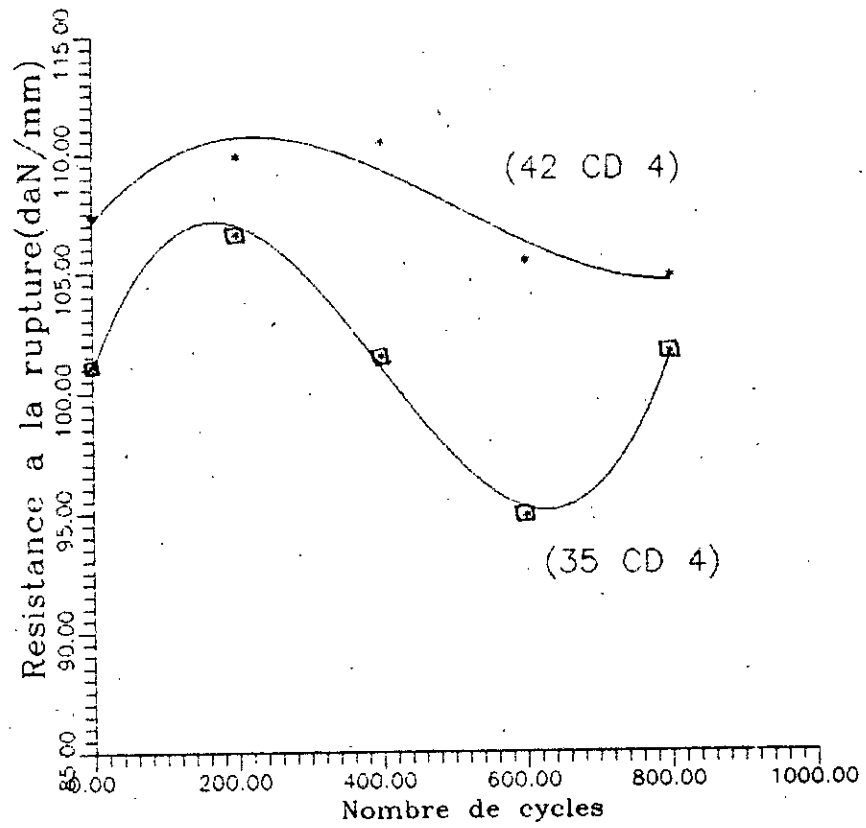
fig(41):Variation de l'allongement a la rupture au cours de cyclage thermique.(essai.1)



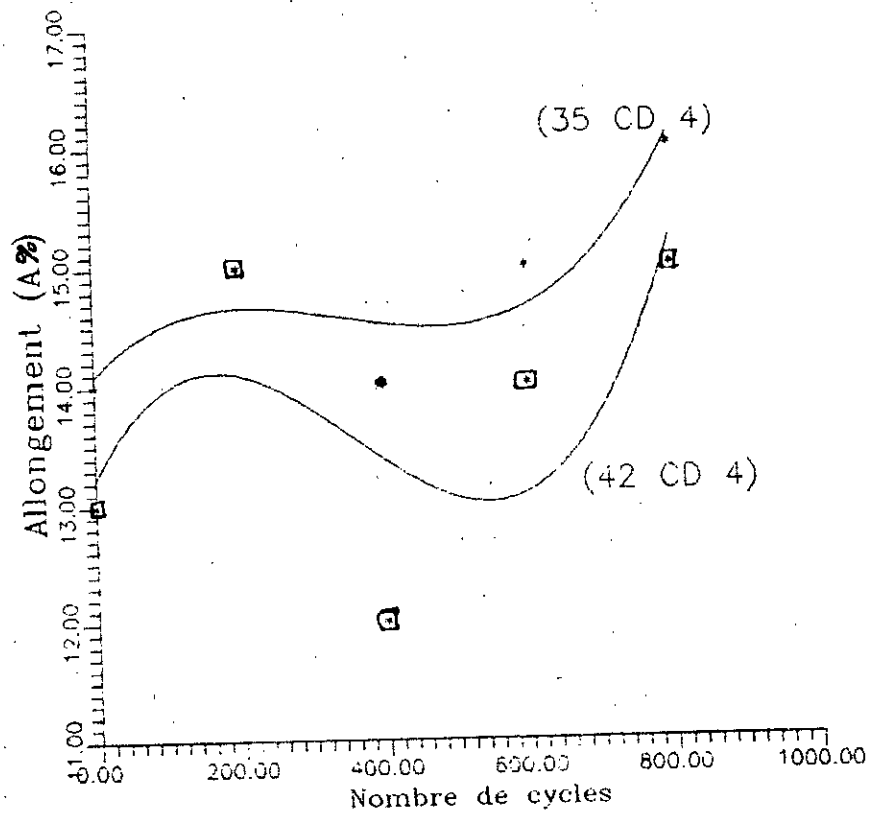
fig(42): Evolution de la durete Rockwell C au cours de cyclage thermique.(essai.2)



fig(43): Variation de la limite elastique au cours de cyclage thermique.(essai.2)



fig(44):Variation de la resistance a la rupture au cours de cyclage thermique.(essai.2)



fig(45):Evolution de l'allongement (A%) au cours de cyclage thermique.(essai.2)

CONCLUSION

L'objectif visé par cette étude est la détermination du comportement de deux aciers de construction faiblement alliés au chrome-molybdène de nuances 35CD4 et 42CD4 au cours d'un cyclage thermique.

L'étude du comportement consiste à suivre l'évolution de la structure et des caractéristiques mécaniques conventionnels au cours du cyclage thermique.

Le dispositif expérimental utilisé a été réalisé au laboratoire de métallurgie de l'École Nationale Polytechnique. Les résultats obtenus montrent :

- Un processus de globulisation de la cémentite au cours du cyclage thermique.
- Un processus de coalescence de la cémentite et de la ferrite au cours du cyclage thermique.
- Les processus se font par fraction de chauffage de chaque cycle.
- Les processus sont plus rapides au cours de premiers essais ce qui prouve l'effet des contraintes thermiques sur la cinétique.
- L'influence du carbone sur la structure (comparaison des deux nuances) n'est pas remarquée.
- Les structures subissent au cours du cyclage un adoucissement. On observe toutefois un léger durcissement vers 600 cycles dans le premier essai et vers 400 cycles dans le deuxième essai.

L'influence des contraintes thermiques sur les caractéristiques mécaniques a été constatée par comparaison des résultats des deux essais.

Après une durée correspondante à 1000 cycles, on constate une chute considérable de la dureté (environ 2 HRC).

Pour approfondir cette étude et comprendre mieux les phénomènes mis en jeu et les comportements correspondants, il est souhaitable :

- D'agir sur les paramètres de cyclage notamment : la fréquence, l'amplitude des températures et le gradient thermique, les durées de maintien.
- D'utiliser des cyclages plus longs.

- De caractériser la structure par des moyens plus adéquats (MEB, diffraction X, ...)
- De suivre l'évolution de la globulisation et de la coalescence en fonction du cyclage.
- De trouver des corrélations entre l'évolution de la structure et celle des caractéristiques mécaniques.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- **E.C.BAIN , H.W.PAXTON**
" Les éléments d'addition dans l'acier "
2^{ème} édition, DUNOD - PARIS 1968
- 2- **J.BARALIS , G.MAEDER**
" Précis de métallurgie "
5^{ème} édition AFNOR 1990
- 3- **ANDRE MECHEL**
" ACIERS A OUTILS "
2^{ème} édition Boulevard 1949
- 4- **PIERRE ROUSSEAU**
" Les aciers spéciaux pour traitements thermiques "
AFNOR. Juin 1983
- 5- **A.ROSS**
" Précis de métallographie appliquée "
DUNOD - BORDAS PARIS 1963.
- 6- **J.BRISSON , R.BLONDEAU , Ph.MAYNIER**
" Mémoires scientifiques de la revue de métallurgie "
Fevrier 1975 N 2 P.P 85-131
- 7- **Y.MEYZAUD , G.MURRY , Rapport IRSID**
R1 279
- 8- **K.ABADLI**
" Contribution à l'étude du comportement en fatigue et en
choc thermique d'une fonte à graphie speroidal "
Thèse de magister 1990
- 9- **A.DAHOUN**
" Etude et réalisation d'un dispositif d'essai de fatigue et
de choc thermiques "
(P.F.E) Juin 1987
- 10- **" OTUA "**
" Produits sidérurgiques français
(nuances et qualités) 1978

- 11- **G.LEMASSON , L.BLAIN**
" Matériaux de construction mécanique et électrique "
BORDAS Paris 1976

- 12- " **SPAS** " (CHAMBRE syndicale des producteurs d'aciers fins
et spéciaux)
" Aciers de construction non alliés spéciaux pour traitement
thermique "
7^{ème} édition du 1^{er} Janvier 1971

- 13- **GUY.MURRY**
" Techniques de l'ingénieur "
(Propriétés des alliages), M 2 II, 1982

- 14- **SCHREIDER**
" De Ferri metallographia II "
édition 1961

- 15- **I.LAKHTINE**
" Métallographie et traitement thermique des métaux "
4^{ème} édition, Mir.MOSCOU 1977