

7/95

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : **METALLURGIE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**SUJET**

**OPTIMISATION D'UN TRAITEMENT THERMIQUE  
POUR UN ACIER INDUSTRIEL DE TYPE 35CD4  
UTILISE EN CONSTRUCTION AERONAUTIQUE**

proposé par :

Y. KHELFAOUI

Etudié par :

F. MERNACHE

Dirigé par :

Y. KHELFAOUI

PROMOTION : juillet 1995

E.N.P 10 , Avenue Hassen Badi - EL- HARRACH- ALGER

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : **METALLURGIE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**SUJET**

**OPTIMISATION D'UN TRAITEMENT THERMIQUE  
POUR UN ACIER INDUSTRIEL DE TYPE 35CD4  
UTILISE EN CONSTRUCTION AERONAUTIQUE**

proposé par :

Y. KHELFAOUI

Etudié par :

F. MERNACHE

Dirigé par :

Y. KHELFAOUI

PROMOTION : juillet 1995

E.N.P 10 , Avenue Hassen Badi - EL- HARRACH- ALGER

DEDICACES .  
JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À  
MES CHÈRS PARENTS,  
MES FRÈRES ET SOEURS,  
TOUTE LA FAMILLE,  
MON ENTRAINEUR BOUALEM,  
ASUC EL HARRACH,  
TOUS CEUX QUI ME SONT CHÈRS

## REMERCIEMENTS



Je remercie Mr Y.Khelfaoui qui était à l'origine de ce travail. Qu'il trouve ici mes vifs remerciements pour m'avoir orienté et dirigé tout au long de la réalisation de ce travail. Mes remerciements vont également à Mr Nait Ali Nacer, responsable du laboratoire de métallurgie des poudres (H.C.R.) pour son aide et ses multiples conseils.

Ma profonde reconnaissance et mes vifs remerciements vont à Mr N.Hamdache chef d'atelier (service qualité) au niveau de la S.N.V.I. (C.V.I.) de Rouiba pour sa précieuse aide durant toute la période du projet.

Je témoigne ici mes chaleureuses salutations à Mr Oualem Seddik Ingénieur au C.S. Che.raga pour avoir mis à ma disposition le matériel nécessaire. J'exprime aussi ma sincère gratitude à Mr S.Zouiyed pour m'avoir accepté au sein du laboratoire de l'U.F.R.

J'adresse mes plus sincères remerciements à :

- Mr Rouene responsable du laboratoire de métallurgie au centre de formation de la S.N.V.I,
- Mr Ouahrani ingénieur à la S.N.V.I
- Mr Boudamous du centre de développement des matériaux (HCR)

Je profite de cette occasion formelle pour exprimer ma gratitude à tous les membres du jury qui ont bien voulu accepter de participer à l'évaluation de ce modeste travail.

Je ne termine pas sans remercier mes enseignants pour m'avoir aidé et dirigé tout le long de mon cursus universitaire.

Enfin, tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'élaboration de ce travail trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

## ABREVIATIONS ET SIGLES

|            |   |
|------------|---|
| NF :       | Norme française                           |
| AC1:       | Température de palier eutectoïde          |
| $\alpha$ : | Ferrite                                   |
| $\gamma$ : | Austénite                                 |
| TTT:       | Temps, Température, Transformation        |
| $M_s$ :    | Début de formation de la martensite       |
| $M_f$ :    | Fin de formation de la martensite         |
| TRC:       | Transformation en refroidissement continu |
| HRC:       | Dureté . ROCKWELL                         |
| HB:        | Dureté . BRINELL                          |
| HV:        | Dureté VICKERS                            |
| $R_m$ :    | Résistance à la traction                  |
| A:         | Allongement à la rupture                  |
| M.O:       | Microscope optique                        |
| M.E.B:     | Microscope électronique à balayage        |
| $V_c$ :    | Vitesse de chauffage                      |
| $V_r$ :    | Vitesse de refroidissement                |
| $K_{cu}$ : | Résilience                                |

# SOMMAIRE

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCTION  | 7  |
| I-1- DESIGNATION CONVENTIONNELLE:   | 8  |
| I-1-1- COMPOSITION CHIMIQUE   | 8  |
| I-1-2 TRAITEMENT THERMIQUE ET CARACTERISTIQUES DE REFERENCE                           | 8  |
| I-2- TRAITEMENT THERMIQUE DES ACIERS :  | 8  |
| I-2-1- RECUITS :  | 9  |
| I-2-2- TRAITEMENTS THERMIQUES DANS LA MASSE   | 9  |
| 1. AUSTENITISATION  | 9  |
| 2- TREMPE   | 10 |
| TREMPE A L'HUILE :  | 10 |
| REVENU  | 10 |
| Revenu de la martensite   | 11 |
| - Premier stade ( $\theta_R : 20 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ )                      | 11 |
| - Deuxième stade ( $\theta_R : 200 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$ )                    | 11 |
| - Troisième stade ( $\theta_R : 300 - 450 \text{ }^\circ\text{C}$ )                   | 11 |
| - Quatrième stade ( $\theta_R \geq 450 \text{ }^\circ\text{C}$ )                      | 12 |
| INFLUENCE DES CONDITIONS DE REVENU  | 12 |
| I-2-3- PHENOMENES LIES AUX TRAITEMENTS THERMIQUES                                     | 12 |
| I-3- LES ACIERS FAIBLEMENT ALLIES ET L'INFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGES DANS L'ACIER | 15 |
| I-3-1- INFLUENCE DES ELEMENTS D'ELABORATION   | 16 |
| I-3-1-1- INFLUENCE DU CARBONE   | 16 |
| I-3-1-2- INFLUENCE DU MANGANESE   | 20 |

|   |    |
|---|----|
| i-3-1-3- INFLUENCE DU SILICIUM                            | 20 |
| i-3-2- INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION                  | 20 |
| i-3-2-1- INFLUENCE DU CHROME                              | 20 |
| i-3-2-2- INFLUENCE DU MOLYBDENE :                         | 21 |
| I-4- TRANSFORMATION DE PHASES :                           | 28 |
| i-4-1- AUSTENITISATION                                    | 28 |
| I-3-1-1- COMPOSITION CHIMIQUE                             | 28 |
| I-4-1-1- GROSSEUR DU GRAIN                                | 28 |
| I-4-2- TRANSFORMATION ISOTHERME DE L'AUSTENITE            | 29 |
| I-4-2-1- TRANSFORMATION ISOTHERME AVEC DIFFUSION          | 29 |
| I-4-2-2- TRANSFORMATION SANS DIFFUSION (OU MARTENSITIQUE) | 29 |
| DIAGRAMME T.T.T. DE L'ACIER 35 CD4                        | 31 |
| I-4-3- TRANSFORMATION ANISOTHERME DE L'AUSTENITE          | 31 |
| DIAGRAMME T.R.C. DE L'ACIER 35 CD4                        | 31 |
| I-4-4 - INFLUENCE DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT        | 32 |
| I-4-5 - TREMPABILITE                                      | 32 |
| I-5 - LA RUPTURE DES ACIERS                               | 35 |
| I-5-1 - RUPTURE FRAGILE PAR CLIVAGE                       | 35 |
| I-5-2 - RUPTURE DUCTILE                                   | 35 |
| I-5-3 - RUPTURE INTERGRANULAIRE                           | 35 |
| INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA DUCTILITE              | 36 |
| II-1-1 - MATERIAU A L'ETAT BRUT                           | 38 |
| II-1-2 - COMPOSITION CHIMIQUE                             | 38 |
| II-1-3 Analyse par microscope électronique à balayage     | 39 |
| II-2 - TRAITEMENT THERMIQUE                               | 41 |

|   |    |
|---|----|
| II - 3 - PREPARATION DES ECHANTILLONS METALLIQUES                     | 42 |
| II - 4 - ATTAQUE CHIMIQUE   | 42 |
| II - 5 - MICROSCOPIE OPTIQUE  | 42 |
| II - 6 ESSAIS MECANIQUES.   | 43 |
| II-6-1 - ESSAI DE DURETE  | 43 |
| II-6-2 - ESSAI DE RESILIENCE  | 43 |
| a) Caractéristique de la machine                                      | 43 |
| b) Eprouvette de résilience utilisée                                  | 43 |
| c) Facteurs Influençants la résilience                                | 44 |
| d) Notion de Fragilité et Choix de la Résilience                      | 44 |
| II-6-3 - ESSAI DE TRACTION  | 45 |
| III - 2 ESSAI DE DURETE.  | 54 |
| III - 3 - ESSAI DE RESILIENCE   | 57 |
| III - 4 - CHOIX PREALABLE D'UN TRAITEMENT D'OPTIMISATION              | 61 |
| III-5-FACIES DE RUPTURE OBSERVE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE | 61 |
| III - 6 - GAMME DE TRAITEMENTS THERMIQUES PROPOSEE.                   | 68 |
| III - 7 - ESSAI DE TRACTION   | 68 |



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# CHAPITRE -I-

## **INTRODUCTION**

Le développement des applications des aciers industriels de type "35CD4" s'explique par le fait qu'ils sont utilisés en construction mécanique et aéronautique, deux domaines qui font partie des pôles du développement **technologique** actuel.

Dans cette perspective, de tels aciers doivent répondre aux exigences de divers milieux d'emploi. Ils doivent se distinguer par leur qualité de résistance à des efforts mécaniques et thermiques importants.

Parmi les nombreuses applications on peut citer :

La fabrication des bielles, vilebrequins, engrenages à pivot, crochets de traction pour tracteurs, arbres, etc... C'est dans ce cadre que nous avons cherché à orienter notre sujet, dans le but de se rapprocher d'une solution nous permettant d'optimiser une gamme de traitement thermique pour **notre** matériau.

Cet objectif une fois atteint, ne pourra qu'assurer un bon compromis entre les propriétés mécaniques de résistance et de ductilité. Pour mener à bien notre étude, nous avons partagé notre travail en trois parties :

- une première partie consacrée à l'étude bibliographique,
- une deuxième partie réservée aux matériaux et techniques expérimentales
- une troisième partie où nous résumons les résultats obtenus, suivis de leur interprétations.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et les références bibliographiques.

# CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## I-1- DESIGNATION CONVENTIONNELLE:

L'acier de nuance 35 CD4 fait partie de la famille des aciers faiblement alliés au chrome - Molybdène.

Il est classé comme un acier de construction à traitement thermique, trempant ordinaire, caractérisé par une résistance à chaud élevée [2].

### I-1-1- COMPOSITION CHIMIQUE

La composition chimique se présente de la manière suivante :

- L'acier 35 CD4 : % C = 0,35 , % Cr = 1,00, % Mo = 0,2

### I-1-2 TRAITEMENT THERMIQUE ET CARACTERISTIQUES DE REFERENCE [05]

| Traitement de référence |        | Caracteristiques mécaniques |                     |                   |                     |                    |                         |
|-------------------------|--------|-----------------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|
| Trempé                  | Revenu | R <sub>0,002 min</sub>      |                     | R                 |                     | A% (min)           | K <sub>cu</sub> à +20°C |
| H:Huile                 |        | N/mm <sup>2</sup>           | Kgf/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | Kgf/mm <sup>2</sup> | L <sub>0</sub> =5d | Min DaJ/cm <sup>2</sup> |
| H850                    | 550    | 930                         | 95                  | 1080-1320         | 110-135             | 10                 | 5                       |

## I-2- TRAITEMENT THERMIQUE DES ACIERS :

Sur le plan technologique, les aciers et les alliages à base de fer sont toujours d'une importance capitale, puisqu'on les retrouve sous une forme ou sous une autre dans presque tous les domaines.

Cette importance technologique repose sur plusieurs facteurs. Les alliages à base de fer se prêtent facilement à une production de masse. Ils sont bon marché et, surtout on peut leur faire acquérir des propriétés très variées notamment en recourant au traitement thermique. Ce qui permet de les adapter aux exigences d'utilisation les plus diverses [1].

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage et de maintien, suivies d'un refroidissement, et qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables, pour son emploi ou sa mise en forme.

Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les propriétés de résistance et de réduire les défauts, en particulier la fragilité.

Toute utilisation rationnelle d'un alliage implique, dans la plupart des cas, un traitement thermique approprié. D'une manière générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique, mais apporte des modifications du point de vue :

- - constitution (état du carbone, forme allotropique du fer);
- - structure (taille du grain, répartition des constituants);
- - état des contraintes (à cause des gradients de température).

Les paramètres des traitements thermiques dépendent :

- - du produit à traiter (composition chimique, forme et volume des pièces, état structural...)
- - de la qualité du produit que l'on veut obtenir en vue de l'application (propriétés structure) on distingue :
  - ◆ - les recuits
  - ◆ - les traitements thermiques dans la masse.

### ***1-2-1- RECUITS :***

Les recuits ont pour but d'adoucir les aciers en éliminant les effets des étapes antérieures de leur fabrication, ainsi que les hétérogénéités de structures pendant leur élaboration.

Le cycle thermique de traitement comprend :

- un chauffage jusqu'à une température dite de recuit
- un maintien isotherme à cette température
- un refroidissement à l'air calme ou suivant une loi imposée, selon les buts visés et les modifications structurales obtenues [1].

### ***1-2-2- TRAITEMENTS THERMIQUES DANS LA MASSE***

Les traitements thermiques dans la masse ont pour but d'améliorer les propriétés mécaniques des aciers. Ces traitements thermiques comportent en général les étapes suivantes : austénitisation , trempe et revenu [1]

#### ***1.AUSTENITISATION [4]:***

L'austénitisation a deux objets :

- - provoquer la transformation du fer  $\alpha$  en fer  $\gamma$ ;
- - permettre la mise en solution du carbone et des éléments d'alliages précipités sous forme de carbures.

Dans le cadre des traitements thermiques dans la masse, l'austénitisation va comporter deux opérations :

- - le chauffage jusqu'à la température choisie, dite température d'austénitisation.
- - le maintien à cette température.

La durée du maintien doit être choisie de façon à assurer un bon compromis entre une austénite plus aux moins homogène et une taille de grains acceptable.

## **2- TREMPE [1]**

On veille à ce que le refroidissement soit suffisamment rapide afin d'éviter la transformation de l'austénite en constituants d'équilibre (ferrite et perlite), et d'obtenir plutôt une structure martensitique, la vitesse de refroidissement est fonction de la composition chimique de l'acier et de son histoire antérieure (taille des grains austénitique, conditions d'austénitisation, etc...).

Les milieux de trempe les plus utilisés par ordre décroissant de sévérité de trempe sont :

- - bain de sel
- - l'eau
- - les huiles de trempe
- - les brouillards (courants d'air, contenant des gouttelettes d'eau en suspension).
- - les bains fluidisés (courants gazeux).
- - l'air et les gaz;

Les divers types de trempe peuvent trouver une explication graphique, en utilisant les courbes T.R.C.

### **TREMPE A L'HUILE :**

Il existe une très grande variété d'huile de trempe qui peuvent différer par l'huile de base (minérale ou synthétique) ; ou par les additifs qu'elles contiennent, Additifs qui ont pour objet soit de modifier le pouvoir refroidissant, soit d'améliorer certaines propriétés (notamment la résistance à l'oxydation).

Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante, elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée. La viscosité de l'huile, diminue quand sa température augmente, ce phénomène provoque une augmentation du pouvoir refroidissant, il est donc nécessaire de contrôler en permanence la température du bain.

Enfin l'utilisation de la trempe à l'huile impose la mise en oeuvre des moyens de prévention et de lutte contre les incendies, après trempe à l'huile il est nécessaire de dégraisser les pièces.

## REVENU

L'acier trempé présente souvent une dureté supérieure à celle demandée par les cahiers de charge, ce qui engendre naturellement une grande fragilité.

Cependant pour répondre aux exigences de la mise en oeuvre du matériau, le remède le plus classique consiste à faire subir à l'acier un revenu à une température inférieure à AC1 [1].

La température de revenu est choisie en fonction de la composition chimique et plus particulièrement en fonction des propriétés chimiques exigées par le lieu d'emploi du matériau.

Ainsi à AC1, c'est la réussite d'un compromis entre les caractéristiques de résistance, de ductilité et de plasticité. [12]

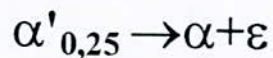
La fig (1) montre l'influence de la température de revenu sur les propriétés de l'acier à 0,44 % C

### Revenu 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 :

#### - Premier stade ( $\theta_R : 20 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Le carbone a tendance à quitter le réseau quadratique de la martensite, sursaturée en carbone. Cette migration du carbone n'est manifestée d'aucune précipitation décelable.



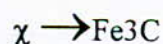
Pendant ce stade, se produit une relaxation des contraintes qui engendre une baisse de la résistance à la traction et une remontée très sensible de la limite d'élasticité.

#### - Deuxième stade ( $\theta_R : 200 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$ )

On assiste à la précipitation du carbure  $\chi$  de HAGG de formule  $\text{Fe}_3\text{C}_2$  ; la martensite se transforme en ferrite, les propriétés de la martensite continuent à évoluer.

#### - Troisième stade ( $\theta_R : 300 - 450 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Les carbures  $\epsilon$  et  $\chi$  se transforment en cémentite



La structure est donc constituée de ferrite et de cémentite. Cette dernière est sous forme de plaquettes au cours de cette étape du revenu, on constate que les caractéristiques de résistance de la martensite décroissent sensiblement, tandis que les caractéristiques de ductilité s'améliorent généralement.

#### **- Quatrième stade ( $\theta_R \geq 450$ °c).**

Le revenu de la martensite d'un acier au carbone n'engendre plus qu'un grossissement des particules de cémentite, mais lorsqu'un acier contient des éléments carburigènes tels que Cr et Mo, une nouvelle évolution va apparaître à des températures supérieures à 450 °c, évolution dont la manifestation la plus sensible est le durcissement secondaire.

En effet, à ces températures la diffusion des éléments carburigènes dans la cémentite la transforme en un carbure particulier. D'autre part une globulisation suivie d'une coalescence de la cémentite se produit, la structure finale est constituée de cémentite alliée coalescée dans une matrice ferritique. [1].

### **INFLUENCE DES CONDITIONS DE REVENU**

Les travaux de VILLETA *et al* [5] ont montré les effets des paramètres  $\theta_r$  et  $t_r$  dans un acier à 0,35 % c faiblement allié au chrome et au molybdène.

La fig (2) montre que la dureté suit une loi quasi-logarithmique lorsque  $t_r$  augmente.

L'adoucissement de l'acier est d'autant plus important que  $\theta_r$  et  $t_r$  sont élevés.

### **I-2-3- PHENOMENES LIES AUX TRAITEMENTS THERMIQUES**

Les traitements thermiques peuvent entraîner divers incidents parfois indésirables dont les plus connus sont :

- surchauffe : un chauffage effectué à de très hautes températures ou pendant des durées prolongées engendre un grossissement exagéré du grain, appelé surchauffe.

Ce phénomène est généralement accompagné d'une dégradation des propriétés mécaniques.

- contraintes propres provoquées par les gradients de température au chauffage et au refroidissement, entre les divers points de la pièce.

- tapures (fissures) : elles se forment le plus souvent au cours de la trempe. Pour parer à ce défaut, on recommande lors du projet des pièces, d'éviter les saillies, les angles vifs, les raccords brusques etc.

- déformation et gauchissements : concernent surtout les pièces trempées à cause du refroidissement qui n'est pas homogène.

Au début, seules les couches externes se refroidissent et donc se transforment en martensite, ce qui provoque des contraintes de traction sur le coeur de la pièce qui est encore plastique, puis les couches internes se transforment à leur tour. La dilatation correspondante, peut exercer sur les couches superficielles plus froides donc peu plastiques, un effort de traction de coeur étant en état de compression. Les contraintes propres peuvent dépasser la limite élastique et induire des déformations permanentes qui se traduisent par les déformations externes des pièces.



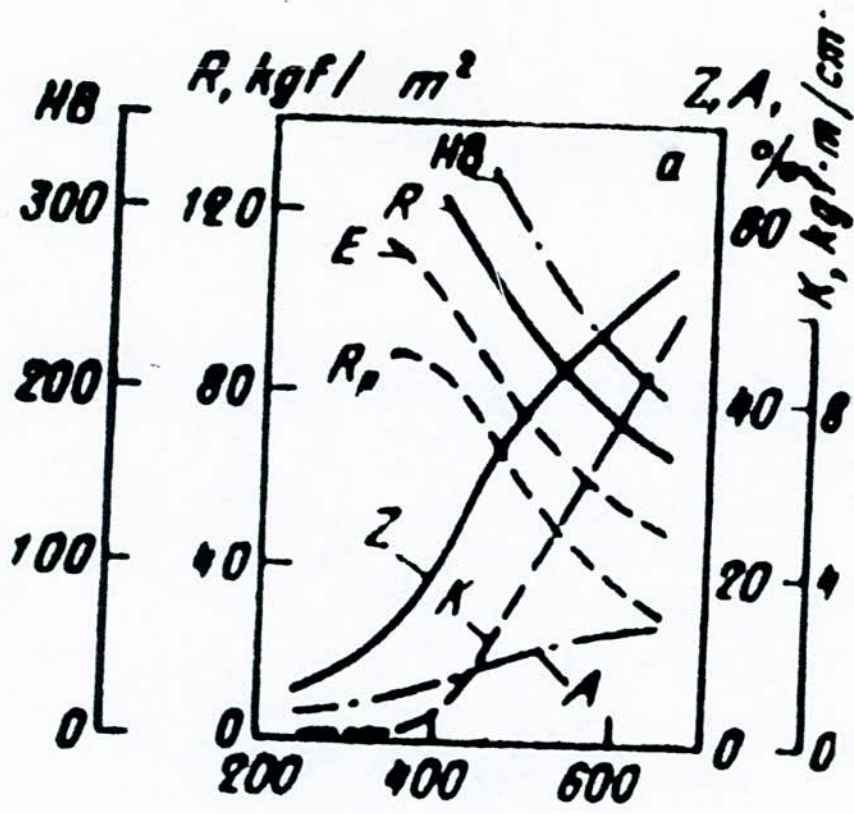


Fig 1 : Influence de la température de revenu sur les propriétés de l'acier à 0,44 %[8]

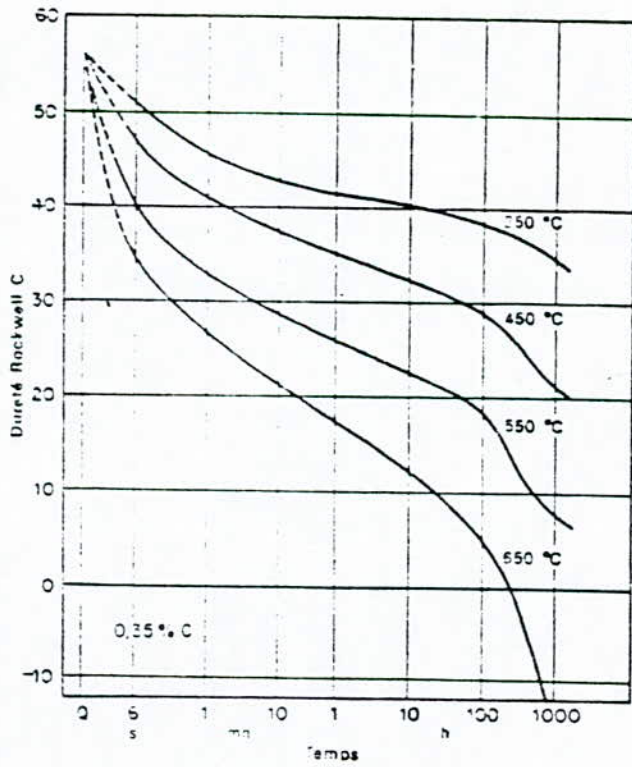
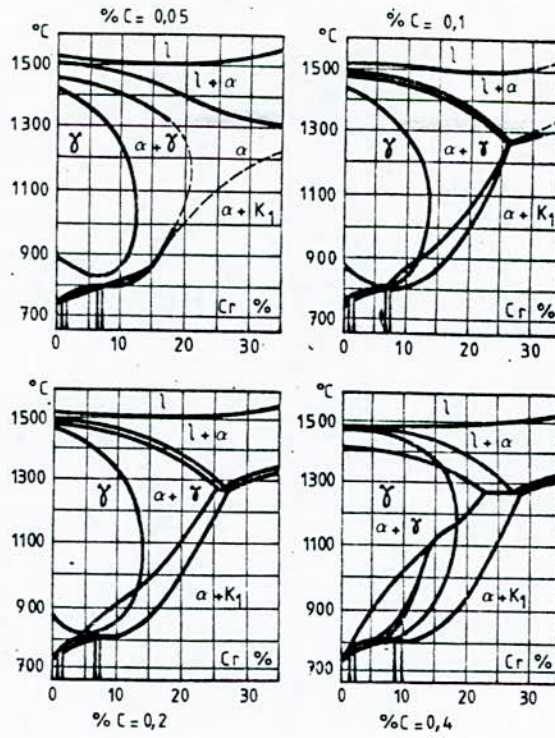
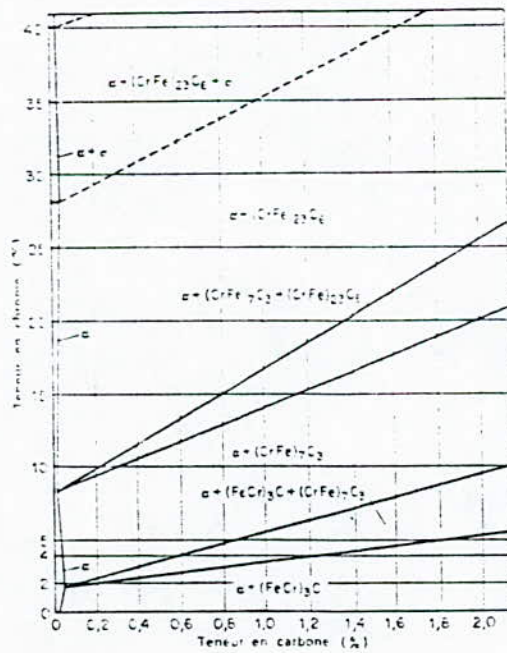


Fig 2: Influence du temps et de la température de revenu sur la dureté d'un acier à 0,35 %[2]



**Fig 3: courbes pseudo-binaires de Fe-c-cr pour différents pourcentages de carbone [3]**



**Fig 4 : diagramme d'équilibre des alliages Fe-c-cr à l'état recuit.**

## ***1-3- LES ACIERS FAIBLEMENT ALLIES ET L'INFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGES DANS L'ACIER***

Pour améliorer la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion (outils) ainsi que les caractéristiques magnétiques, divers éléments sont ajoutés à l'acier. Ce sont là, en quelque sorte, des rôles particuliers correspondant à des problèmes bien spéciaux.

Pour la plupart des applications industrielles prévues, l'essentiel du tonnage d'acier allié fabriqué, comporte des aciers dont la teneur en carbone varie de 0,25 à 0,55 % de carbone, ce sont des aciers qui sont traités thermiquement, pour la construction mécanique, l'automobile, les chemins de fer, etc.

L'acier au carbone peut prendre la trempe et subir des traitements de revenu. Les aciers alliés permettent d'obtenir des microstructures de même dureté, mais les micro-constituants (martensite revenue ou bainite) sont caractérisés par une plus grande ductilité, et une meilleure aptitude à la déformation, que l'acier au carbone, pour lequel les micro-constituants sont plus souvent la perlite et la bainite supérieure.

De même, il convient de signaler que la martensite qui a subi un traitement de recuit est beaucoup plus ductile à des températures où, en général, les aciers perlitiques sont fragiles, cassants et moins résilients.

Il est possible, par ailleurs, d'éviter les structures fragiles des aciers au carbone, par traitements thermiques mais seulement pour des pièces de faible section.

Dés que la section atteint des valeurs plus importantes, les éléments d'alliages sont nécessaires, pour éliminer les structures fragiles au coeur des pièces et éviter le craquage [6].

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.

### ***1-3-1- INFLUENCE DES ELEMENTS D'ELABORATION***

#### ***1-3-1-1- INFLUENCE DU CARBONE [2]***

Cet élément est présent dans les aciers sous deux formes : en solution solide d'insertion dans la ferrite, dans l'austénite, dans la bainite ou dans la martensite ou sous forme de carbures.

L'action du carbone est complexe, il agit par son caractère nettement gammagène et entre ainsi en compétition avec le chrome élément alphagène, comme le montre les coupes pseudo-binaires des ternaires : Fe - c - cr (fig 3).

Il a également une action stabilisatrice sur l'austénite formée à haute température. En présence des éléments chrome et molybdène, le carbone peut former des carbures voir fig (4) et (5).

Le carbone a une influence pour un acier refroidi lentement comportant la ferrite et ~~cementite~~, car la quantité de cementite est directement proportionnelle à la teneur en carbone (fig - 6b).

Par exemple, lorsqu'un acier contient 0,38 % c, la quantité de cementite est de 5,0 %; pour 0,7 % c elle est de 10 % elle va jusqu'à 30 % pour 2,0 % en carbone. Comme nous le savons, la dureté de la cémentite (Hv 1000) est sensiblement plus grande que celle de la ferrite (hv : 80 à 90).

Il en résulte que l'augmentation de la teneur de l'acier en carbone accroît la dureté, la charge de rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement, la striction et la résilience (fg - 6 A)

Le carbone, exerce une influence sur les températures des points Ms et M.F., elles sont d'autant plus basses que la teneur de l'austénite en carbone est élevée.

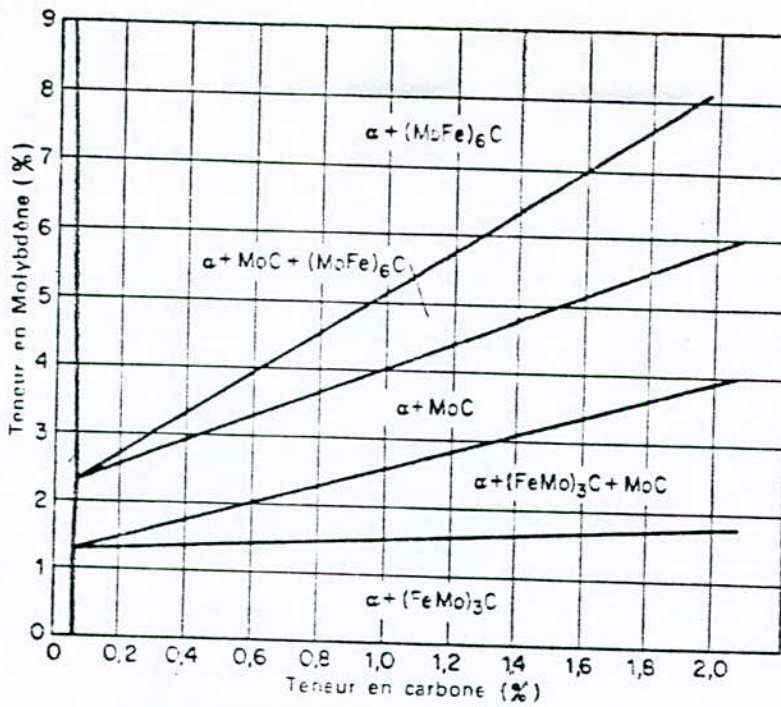


Fig 5: diagramme d'équilibre des alliages Fe-c-mo [2]

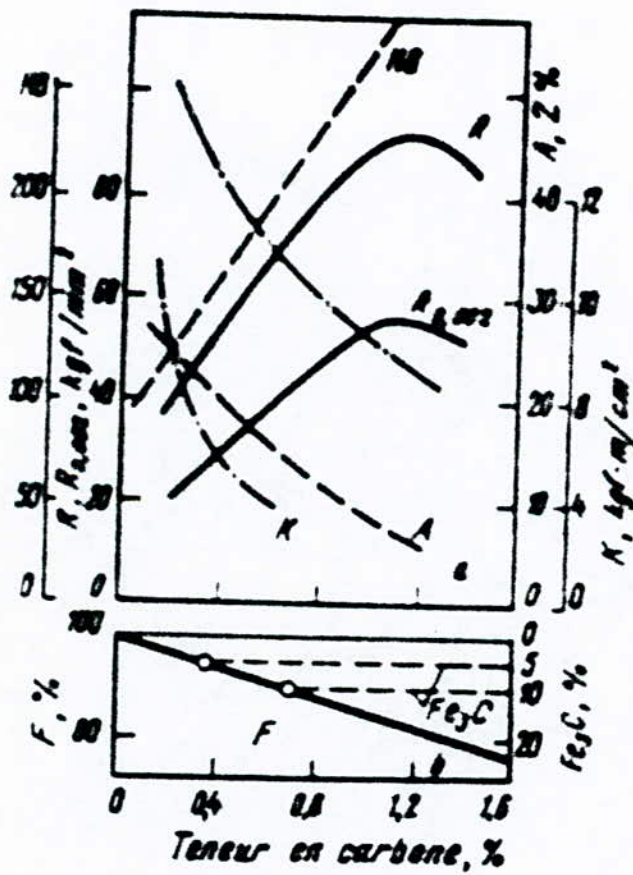
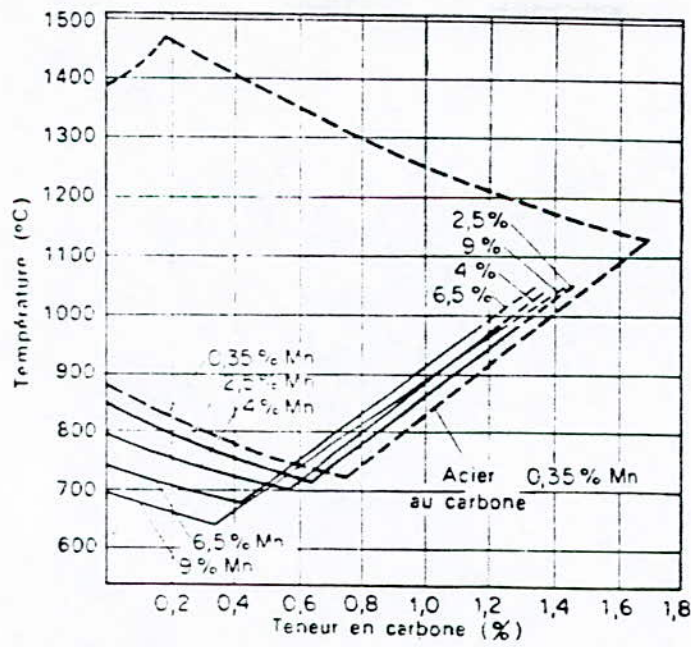
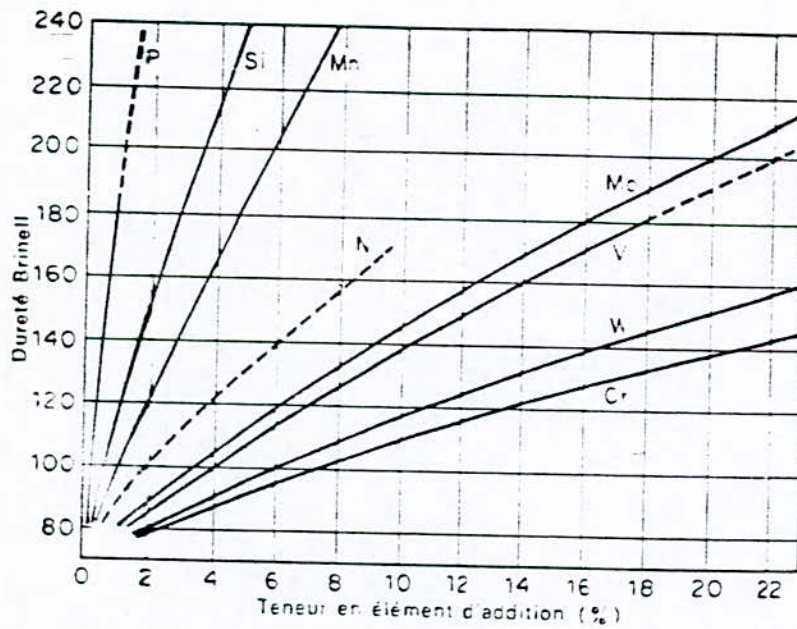


Fig 6 : Influence du carbone

- a - sur les propriétés mécaniques de l'acier
- b - sur le nombre de phases présentés dans l'acier [8]



**Fig 7: Influence du manganèse sur le domaine  $\gamma$  [2]**



**Fig 8: Durcissement de la phase  $\alpha$  par les éléments d'addition [2]**

### ***1-3-1-2- INFLUENCE DU MANGANESE [10]:***

Le manganèse est un élément gamagène et carburigène, il élargit le domaine de stabilité de l'austénite par l'abaissement de la température A3 (transformation  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ ) et le relèvement de la température A4 (transformation  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ ), (fig 7).

Le manganèse est soluble dans l'austénite en toute proportion. Il se dissout partiellement dans la ferrite en provoquant son durcissement. (fig 8).

Le pouvoir carburigène du manganèse est faible mais suffisant pour stabiliser la cémentite et contrecarrer l'effet graphitisant du silicium.

La présence de cet élément agit sur les conditions de la transformation perlitique ; il abaisse la température AC1 et la composition eutectoïde. (fig 9).

Les caractéristiques mécaniques de ténacité sont relevées au dépend de la ductilité.

### ***1-3-1-3- INFLUENCE DU SILICIUM (2)***

Le silicium est un élément alphagène et non carburigène, il rétrécit le domaine austénitique par le relèvement de la température A3 et l'abaissement de la température A4 (fig 10).

La solubilité du silicium dans la cémentite est pratiquement nulle, il se trouve totalement dans la ferrite qui subit un durcissement très important et une chute notable de sa ductilité (fig 8).

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 affectées. (fig 09).

Relèvement de la température AC 1 et abaissement de la composition eutectoïde.

### ***1-3-2- INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION***

#### ***1-3-2-1- INFLUENCE DU CHROME [6]***

Le chrome est un élément alphagène et carburigène, son effet est de diminuer le pourcentage de carbone nécessaire pour obtenir de l'austénite.

Le domaine de formation de l'austénite dû à l'action du chrome est indiqué sur la (fig 11).

Il va jusqu'à 12 % pour un carbone nul, à 19 % de chrome pour un carbone de 0,6 %.

La composition de l'eutectoïde de l'acier (perlite) passe de 0,8 % de carbone pour un acier sans chrome à 0,3 % de carbone pour un acier à 15 % de chrome.

Les aciers au chrome résistent à l'effet généralement adoucissant du revenu.

Les carbures de chrome formés se concentrent en chrome par diffusion, plus en élève la température de revenu, plus on note une résistance à l'adoucissement (fig 12).

L'acier à 12 % cr a un comportement particulier dû au durcissement par précipitation pour des aciers à 0,35 % c.

Le diagramme ternaire Fe - cr - c (fig 4) montre que le carbure le plus stable à basse teneur en chrome est la cémentite alliée au chrome de type  $(Fe, cr)_3 c$ .

Les effets du chrome qui motivent son emploi dans les aciers, sont les suivants :

- amélioration des propriétés mécaniques, de la résistance à l'oxydation, à la corrosion et à l'usure.
- il augmente considérablement la trempabilité. De plus on a recours au chrome pour l'élaboration d'aciers pour nitruration et pour les acier magnétiques (aimants permanents) [6].

### ***1-3-2-2- INFLUENCE DU MOLYBDENE :***

Le molybdene, comme le chrome rétrécit le domaine austénitique (fig 13) ; c'est un élément carburigène et sa tendance à former des carbures est nettement plus élevée que celle du chrome.

La coupe ternaire Fe - MO - C (fig 05) montre qu'à une température inférieure à 700° c, seule la cémentite alliée au molybdène ou cémentite mixte  $(Fe - MO)_3 C$  est présente dans l'acier dont la teneur en molybdène, qu'elle que soit le pourcentage du carbone, n'excède pas 1,2 %.

Dans les aciers de traitement thermique, sa concentration ne dépasse pas 1% , mais elle est plus importante dans les aciers inoxydables. Employé avec le chrome, le molybdène augmente la trempabilité et inhibe surtout la transformation perlitique.

Le molybdene améliore la résistance au revenu, et diminue la sensibilité à la fragilisation.

Il apparait comme plus actif que le chrome pour conserver une résistance et une dureté élevées après revenu (fig 14) [1].

Le durcissement maximal s'observe à une température un peu plus élevée que pour les aciers au chrome. La (fig 15) montre la superposition de l'effet du molybdène à celui du chrome (0,5 % cr).

La quantité relativement faible du chrome modifie peu le cours de l'adoucissement mais déplace le durcissement secondaire vers des températures plus faibles. On peut également observer l'influence des éléments d'addition dans l'acier 0,35 % de carbone.

Un grand nombre d'essais sur des aciers 0,35% de carbone et contenant du chrome et du molybdene ont montré que la variation de dureté est comme l'indique la (fig 16).

D'une manière générale, Andrews [09] a établi une relation mettant en évidence les effets des éléments chimique présents sur les températures AC1, AC3 et Ms dans les aciers faiblement alliés.

$$AC_1 (°C) = 727 - 10,7Mn - 16,9 Ni + 29,1 Si + 16,9 Cr + 6,38 w + 290 As.$$

$$AC_3 (°C) = 910 - 203 \sqrt{C} - 15, 2Ni + 44,7 Si + 104 Va + 31,5 Mo + 13,1W - 30Mn - 11 Cr - 20 Cu$$

$$MS (°C) = 539 - 423 C - 30,4 Mn - 17,7 Ni - 12,1 Cr - 11 Si - 7,5 Mo$$

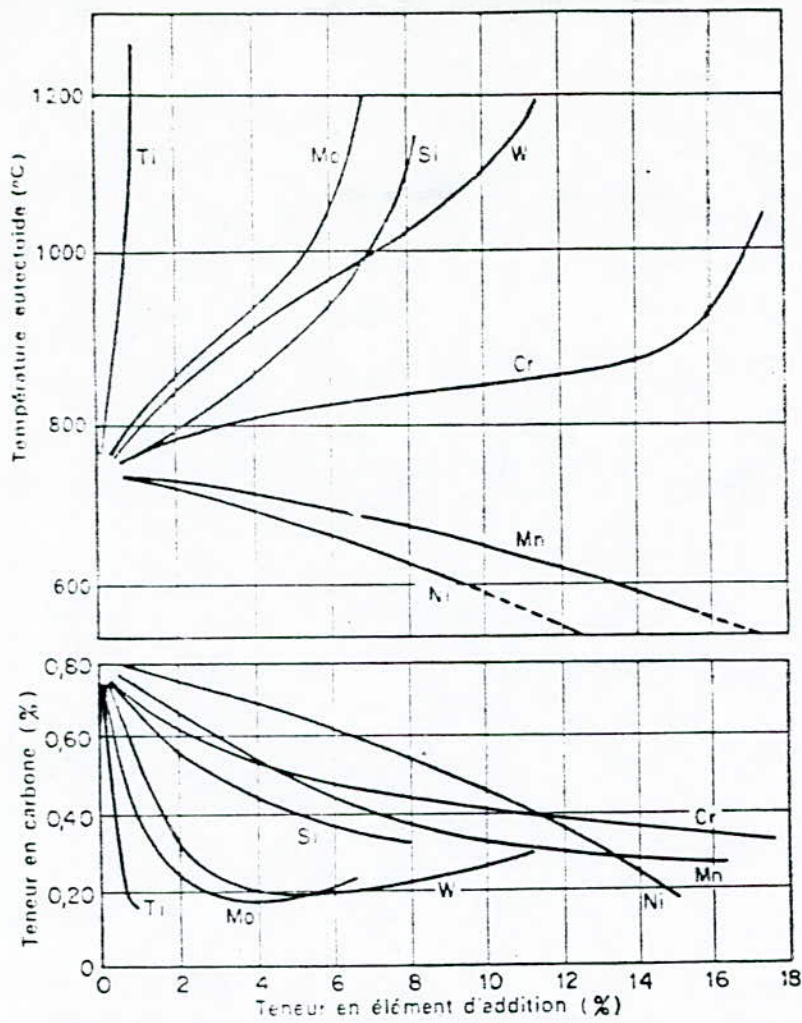
seulement pour les aciers contenant moins de 0,6 % de c et 5 % en éléments d'alliages).



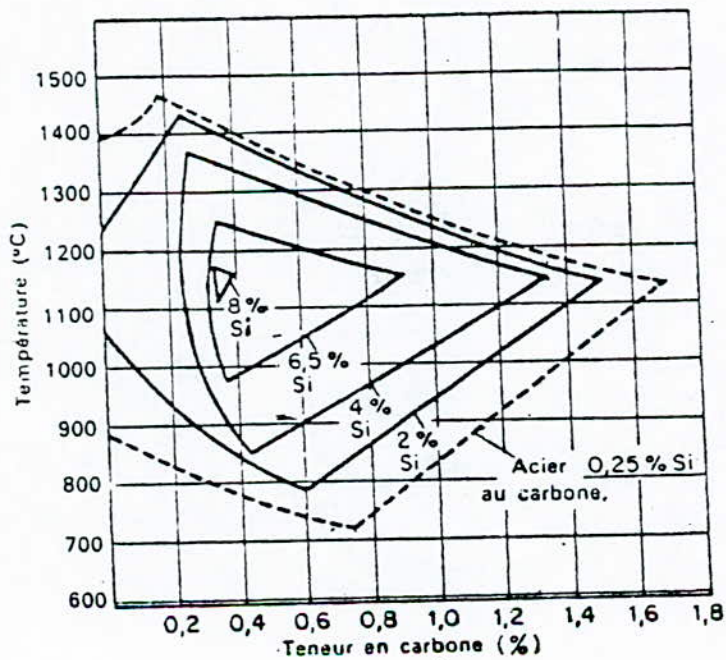
Les taux des éléments sont exprimés en %. Les éléments gamagènes abaissent le point AC3 et relèvent AC1. Les éléments alphas ont un effet inverse le chrome a un effet complexe. Tous les éléments alliés a part l'aluminium et le cobalt abaissent Ms. [09]. Les effets des éléments C, Mn, Si, Cr, Mo sur les propriétés des aciers sont relatés dans le tableau (2).

| Propriétés                           | C  | Cr | Mo | Mn | Si |
|--------------------------------------|----|----|----|----|----|
| Charge de rupture                    | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ |
| dureté                               | ++ | ++ | ++ | ++ | +  |
| ductilité                            | -  | +  | +  | +  |    |
| résistance à la chaleur et corrosion | .  | ++ | +  | -  | -  |
| soudabilité                          | -  |    | +  | +  | -  |
| usinage                              | -  | -  | -  | -  | -  |
| élasticité                           | +  | +  | +  | +  | ++ |
| résilience                           | +  | +  | +  |    |    |
| magnétisme                           |    | +  |    |    | -  |
| forgeabilité                         |    |    | +  | +  |    |

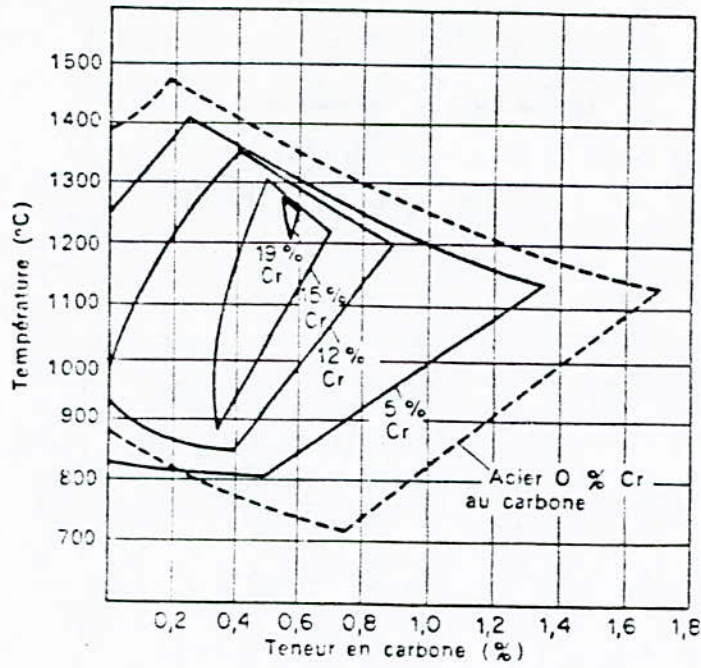
**++ Recommandé ,+ bon, - médiocre**



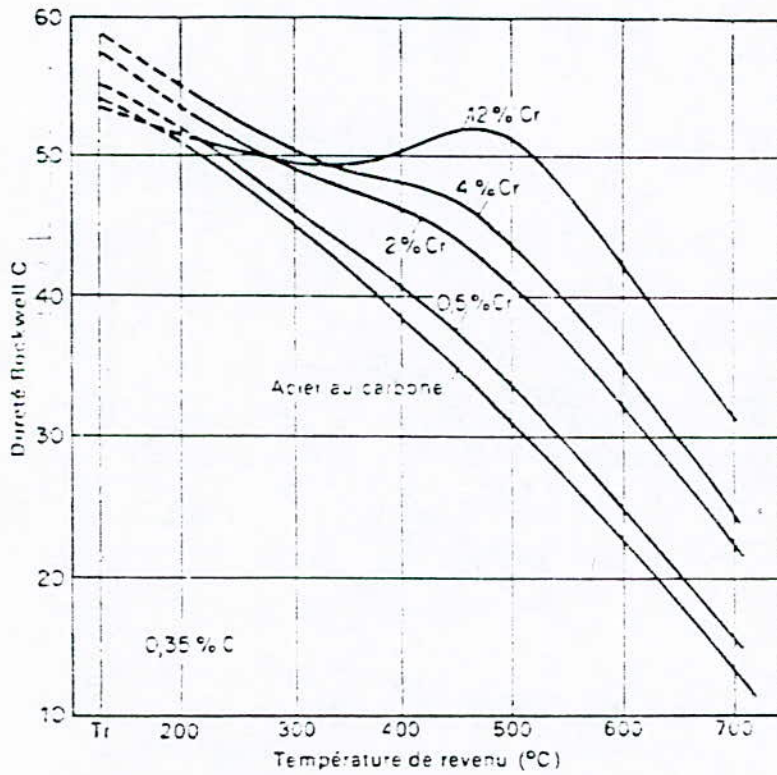
**Fig 9: Influence des éléments d'addition sur la composition et la température eutectoides [2]**



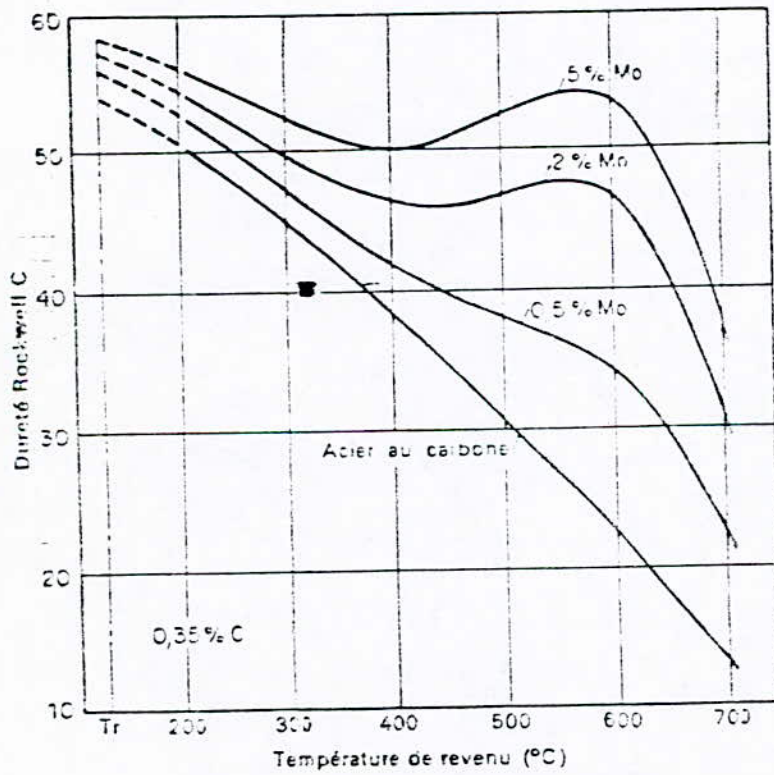
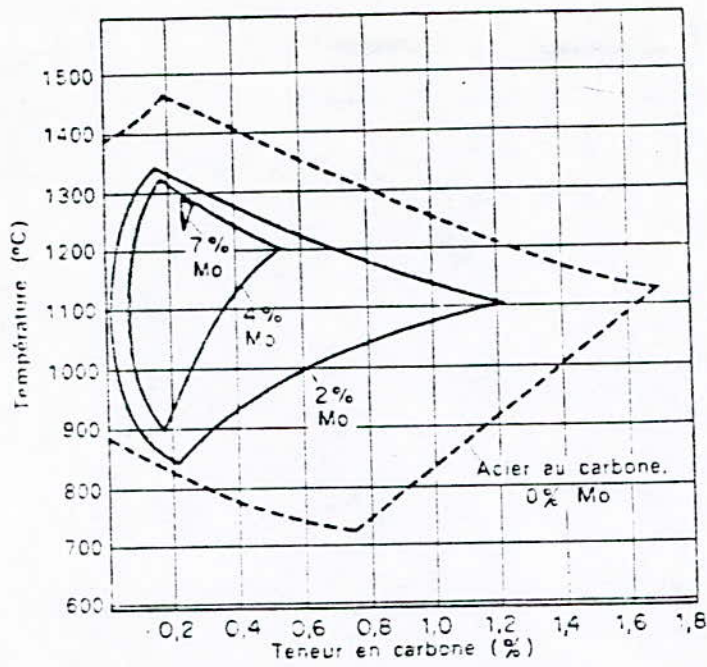
**Fig 10: Influence du silicium sur le domaine  $\delta$  [2]**

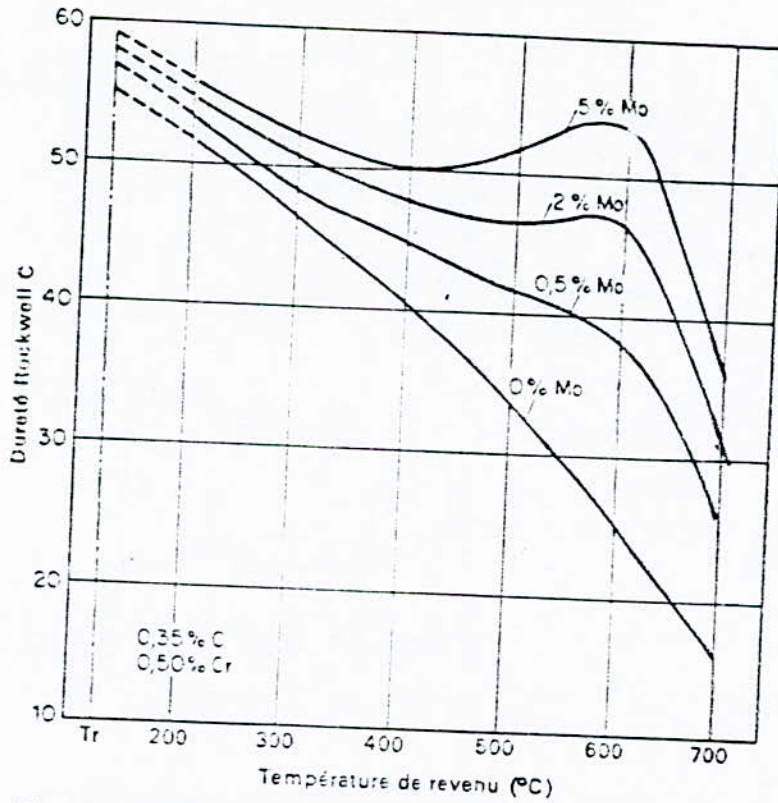


**Fig 11: influence du chrome sur le domaine  $\gamma$  [2]**

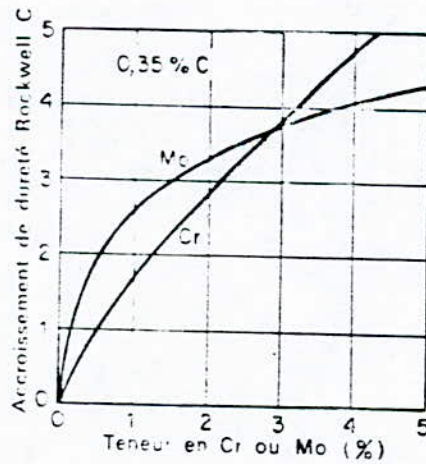


**Fig 12: influence du chrome sur le revenu après trempe d'aciers à 0.35% C [2]**





**Fig 15: influence du molybdene sur le revenu après trempe d'aciers à 0,35% C et 0,5 % Cr [2]**



**Fig 16: influence du molybdene et du chrome sur la dureté maximale d'aciers à 0,35% c [2]**

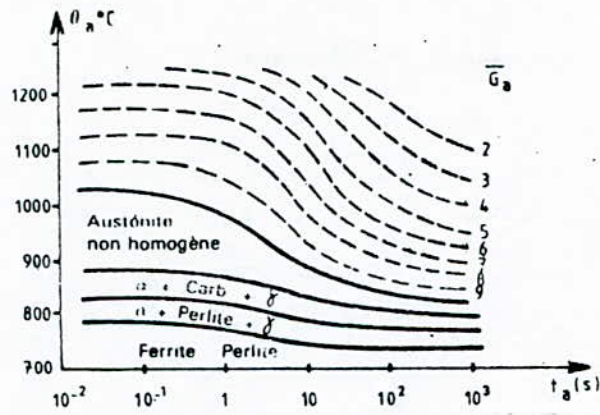


Fig 17 : Austénitisation équivalente de l'acier 35 CD4 [3]

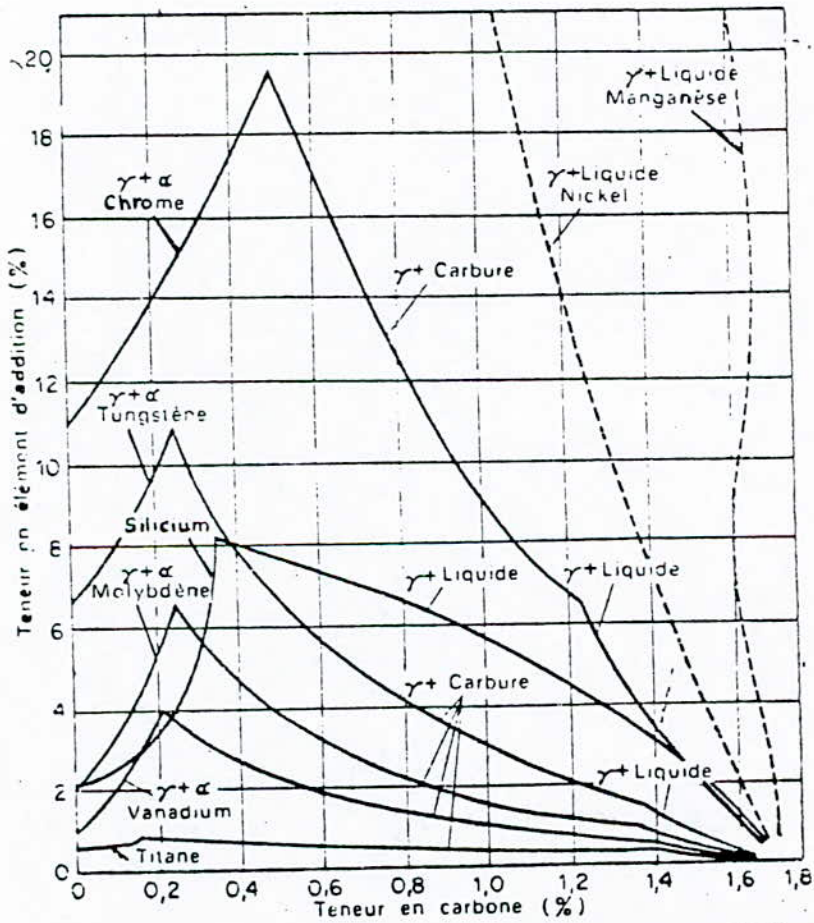


Fig 18 : Limite de solubilité de l'austénite pour différents éléments d'addition [2]

## **I-4- TRANSFORMATION DE PHASES :**

L'acier 35 CD4 subit les traitements thermiques de recuit et de trempe revenu. La structure et les propriétés sont inhérentes aux conditions de l'austénitisation, de refroidissement et à la composition chimique.

### **I-4-1- AUSTENITISATION [03]**

La possibilité d'austénitiser un acier est une condition absolument nécessaire pour pouvoir obtenir un durcissement par trempe.

Les paramètres d'austénitisation sont :

- - la température d'austénitisation  $\theta_a$ ,
- - la durée d'austénitisation :  $t_a$ .

L'austénite, solution solide polycristalline C.F.C., contient en solution la totalité des éléments alliés si l'austénitisation est complète ou une partie si l'austénitisation est partielle (existence de phases non dissoutes : très souvent des carbures).

L'état austénitisé (à la fin du temps  $t_a$ ) est caractérisé par : (fig 17) ; la composition chimique et la grosseur moyenne du grain austénitique  $G_a$  (fig 20).

#### **I-3-1-1- COMPOSITION CHIMIQUE**

La présence du chrome dans l'acier a un effet négatif sur l'austénitisation, 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 de grains.

Dans le cas de l'acier 35 CD4, 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 (fig 18).

#### **I-4-1-1- GROSSEUR DU GRAIN**

Le grossissement du grain austénitique est un phénomène thermiquement activé lié au paramètre d'équivalence temps - température d'austénitisation.

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

où  $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1} \text{ mole}^{-1}$  et  $\Delta H_q$  est l'enthalpie d'activation du grossissement du grain austénitique qui pour les aciers faiblement alliés a une valeur moyenne de 460 KJ. Mole<sup>-1</sup>.

Ainsi, dans des conditions d'austénitisation équivalente. ( $\theta_a$ ,  $t_a$ ) correspondante à la même valeur de  $P_a$ , l'acier a la même taille des grains  $G_a$ .

Une augmentation de  $\theta_a$  ou de  $t_a$  (ou les deux à la fois) entraîne une augmentation du  $P_a$  et donc de la grosseur du grain  $G_a$ .

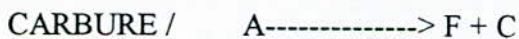
## ***I-4-2- TRANSFORMATION ISOTHERME DE L'AUSTENITE [15]***

L'emploi des traitements isothermes permet d'étudier séparément l'influence des facteurs : temps et température sur les transformations de l'austénite.

On chauffe l'acier jusqu'à un état austénitique puis on le refroidit très rapidement à une température inférieure à A1. Ce refroidissement très brusque ne permet pas aux transformations de se produire selon le diagramme de phase et conduit l'austénite à évoluer dans des conditions hors d'équilibre.

### ***I-4-2-1- TRANSFORMATION ISOTHERME AVEC DIFFUSION***

Lorsque la température de maintien est supérieure au point Ms, les transformations isothermes de l'austénite conduisent à la formation d'agrégats ferrite-carbure.



Cette formation met en jeu des phénomènes de diffusion qui régissent la cinétique de ce type de transformations.

### ***I-4-2-2- TRANSFORMATION SANS DIFFUSION (OU MARTENSITIQUE)***

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

En dessous du point Ms la diffusion du carbone n'intervient plus et la transformation martensitique se produit sans diffusion par glissement, et ne modifie pas la composition de la solution solide.

Pour décrire l'allure cinétique des transformations on utilise les courbes de transformation température - temps dites courbes T.T.T déterminées expérimentalement et qui caractérisent les transformations isothermes de l'austénite.



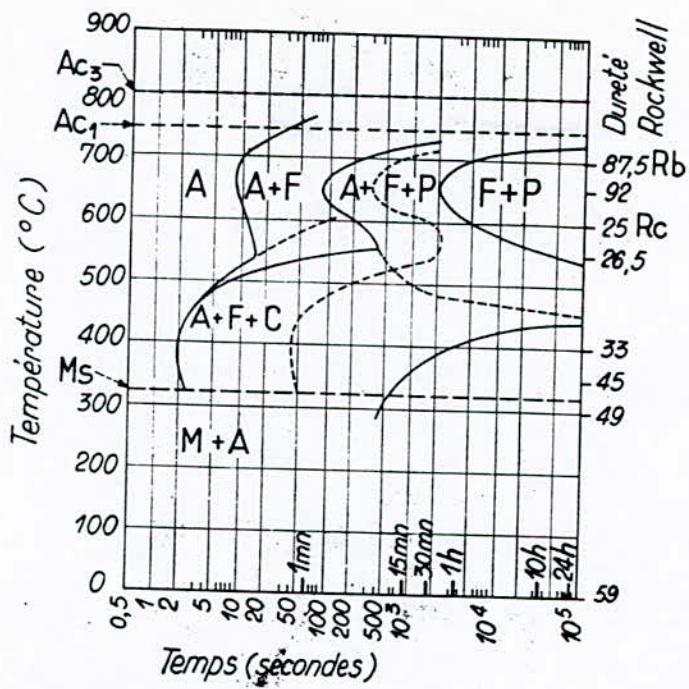


Fig 19 : diagramme T.T.T de l'acier 35CD4 [3]

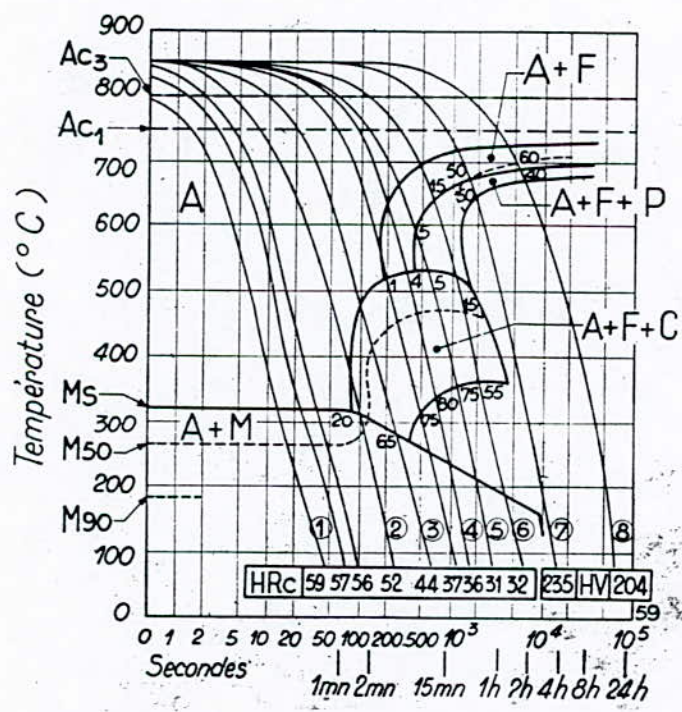


Fig 20: Courbe T.R.C de l'acier 35CD4 [3]

## **DIAGRAMME T.T.T. DE L'ACIER 35 CD4**

L'étude du diagramme T.T.T. de l'acier 35 CD4 (fig 14) 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 soit 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 aciculaire.

La ferrite ne précipite pas au dessous de 425 °c.

La perlite précipite pour des températures supérieures à 525 °c.

La bainite se forme dans l'intervalle Bs - Ms avec Bs = 525 °c et Ms = 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 pour par leur nature carburigène, retardent la transformation perlitique et changent la cinétique de la transformation bainitique.

### **I-4-3- TRANSFORMATION ANISOTHERME DE L'AUSTENITE**

A la différence des transformations isothermes, les transformations anisothermes de l'austénite ne donnent aucune possibilité pour étudier séparément l'effet de la température et du temps, parce qu'elles se développent au cours des refroidissements continus.

Le diagramme T.R.C. permet pour chaque loi de refroidissement de préciser les limites des divers domaines de transformation de l'austénite ainsi que son taux de transformation en divers constituants

### **DIAGRAMME T.R.C. DE L'ACIER 35 CD4 [4]**

L'étude du diagramme T.R.C de l'acier 35 CD4 (fig 20) permet de faire les observations suivantes :

Pour le refroidissement 1, qui est le plus rapide, la transformation se produit entièrement dans le domaine martensitique. Lorsque la vitesse de refroidissement diminue, la transformation débute à plus haute température ; il y a formation de bainite (domaine marqué A + F + C) qui se distingue nettement de la martensite formée ultérieurement. (Courbes 2 et 3).

Pour les courbes 5 et 6, il y a d'abord apparition de quelques traces de ferrite et de perlite à haute température, puis la majeure partie de la transformation a lieu dans le domaine bainitique et quelques petits grains d'austénite non transformés en bainite donnent de la martensite à basse température.

Enfin, pour les refroidissements les plus lents (courbes 7 et 8), la transformation se fait entièrement dans le domaine supérieur et donne une structure ferrite - perlite.

#### **I-4-4 - INFLUENCE DE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT**

L'augmentation de la vitesse de refroidissement conduit à des structures de plus en plus fines, donc le meilleur refroidissement est celui qui se fait à grande vitesse, pour assurer l'obtention de la martensite sans produire de défauts tels que tapures ou déformations.

L'étude du diagramme T.R.C. permet de faire l'observation suivante :

- selon l'ordre des vitesses de refroidissement la structure finale de l'acier est :

- martensite  $V_r > 35 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
- martensite + Bainite  $5,4 < V_r < 35 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
- Ferrite + perlite + Bainite + martensite  $0,45 < V_r < 5,4 \text{ } ^\circ\text{C/s}$
- Ferrite + perlite  $V_r < 0,45$  [17].

D'après les travaux de BRISSON *et al.* (16) 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 :

$$H_{VF+P} = A + B \log V_r$$

A et B sont fonction de la composition.

La fraction de la martensite formée à une température inférieure à  $M_s$  pour un acier faiblement allié est : [03]

$$Y = 1 - \exp [- 0,011 [M_s - \theta]]$$

#### **I-4-5 - TREMPABILITE**

La trempabilité d'une nuance est en général représentée par une bande - jominy qui tient compte de la dispersion des compositions.

La (fig 21) donne l'exemple d'une telle bande pour la nuance 35 CD4 [03].

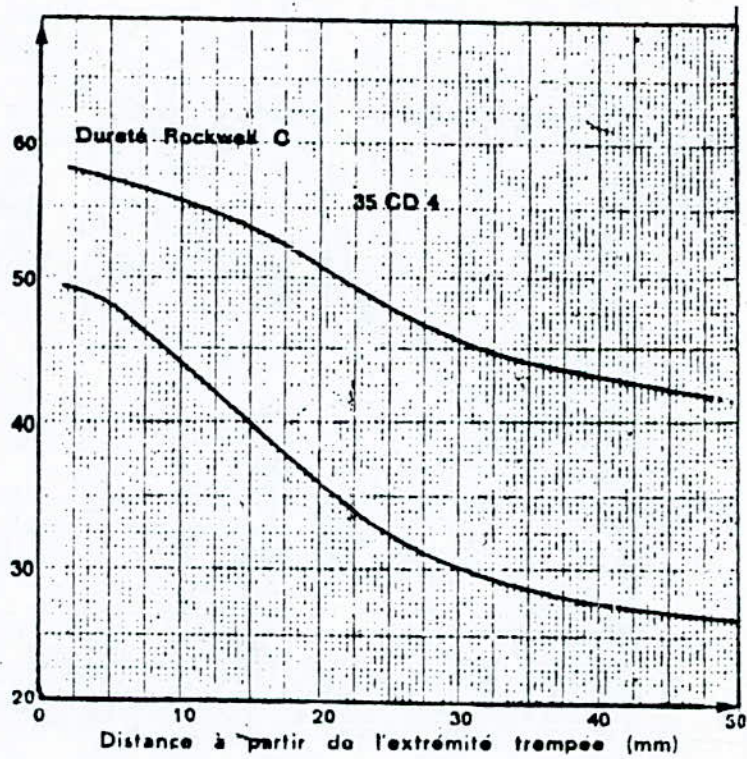
L'intérêt de cette méthode est de renseigner sur la pénétration de tremp de l'acier. (Fig 22).

L'expérience a montré que deux aciers de même composition chimique peuvent donner des diagrammes jominy différents. Cette différence est en relation avec la grosseur du grain.

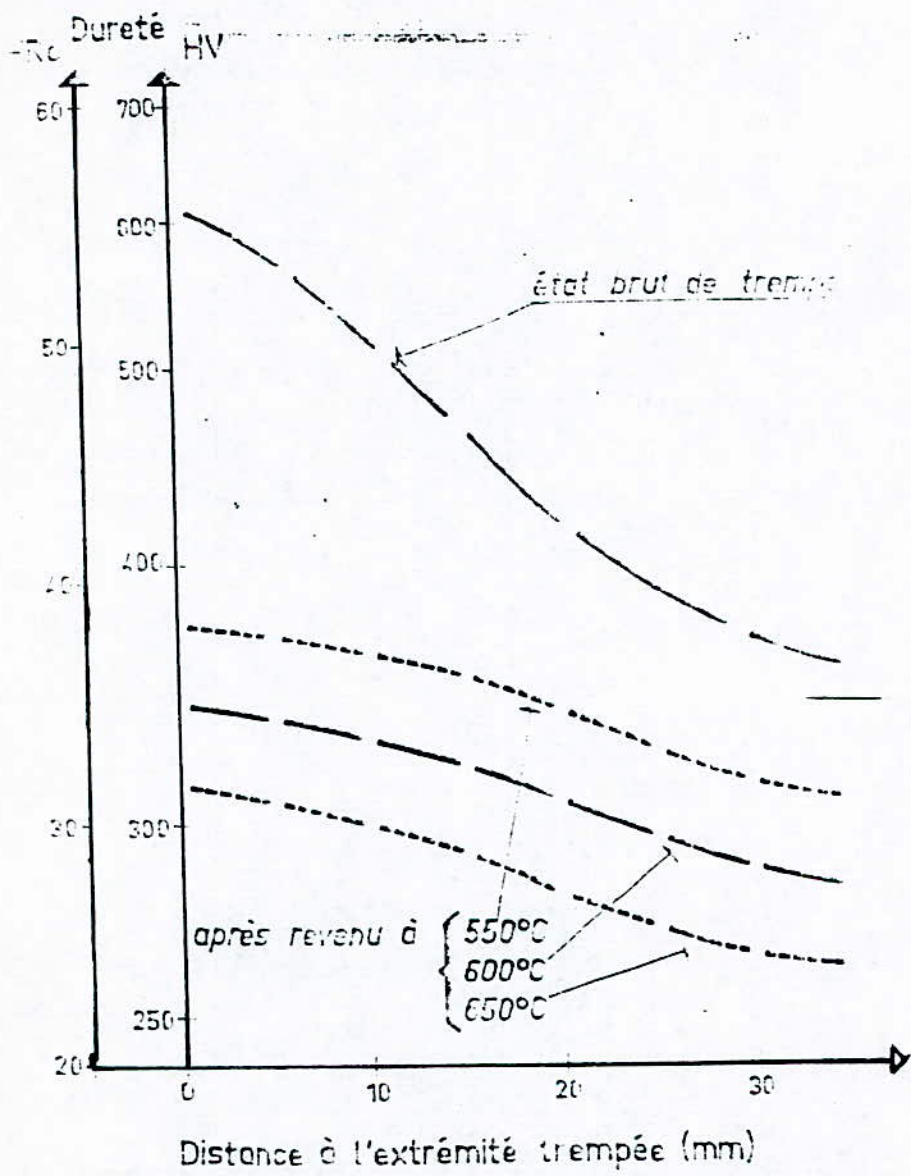
Il est donc nécessaire de procéder à l'essai de trempabilité pour qualifier les aciers de point de vue de leur aptitude aux traitements thermiques [13].

**.35 CD 4**

| Distance | Dureté Rockwell C |      |
|----------|-------------------|------|
|          | min.              | max. |
| mm       |                   |      |
| 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   |



**Fig 21: Courbes Jominy de l'acier 35CD4 [3]**



**Fig 22: Courbe Jominy de l'acier 35CD4 à différentes températures de revenu [11]**

## ***I-5 - LA RUPTURE DES ACIERS***

La rupture est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties, sous l'action d'une contrainte. Cette séparation se produit plus ou moins à grande vitesse par propagation des fissures existantes dans le matériau.

La rupture est donc fortement influencée par la présence de microfissures, de pores, d'inclusions de particules fragiles (défauts internes) et par la présence d'entailles (macrofissures) résultant de défauts de fabrication ou de conception.

Il existe des matériaux fragiles qui se rompent sans déformation plastique, et des matériaux ductiles dont la rupture n'intervient qu'après une déformation plastique plus ou moins importante. [14]

Les matériaux ductiles sont intéressants par rapport aux matériaux fragiles. En effet si la limite d'élasticité constitue le seul paramètre important pour l'ingénieur chargé de la conception d'une structure, la ductilité due au déplacement des dislocations lui est par contre un atout important quant il doit mettre un matériau en forme, par déformation plastique, et cela sans qu'il ait rupture au cours des opérations de mise en forme. Par contre un matériau peut se rompre dès que la contrainte atteint la valeur de sa résistance à la traction, c'est la rupture. [12]

### ***I-5-1 - RUPTURE FRAGILE PAR CLIVAGE***

La rupture fragile se fait par décohésion, et chaque grain rompu présente une facette lisse et brillante. [12]

La déformation plastique est faible, le cristal se sépare brusquement en deux parties, avec le même aspect sur toute la surface granuleux et brillant, la direction de propagation de la rupture est souvent révélée par des tracés caractéristique en forme de rivières qui convergent dans cette direction. [1]

### ***I-5-2 - RUPTURE DUCTILE***

La rupture ductile s'accompagne de déformation plastique importante qui fini par se localiser en une partie de l'éprouvette, qui s'amincit progressivement jusqu'à la rupture.

Le faciès de rupture ductile, est constitué de trous ou cupules qui sont la conséquence de la rupture de chaque grain par cisaillement pur, suite à une déformation plastique avec striction. [(12)]

Les courbes de traction peuvent nous renseigner sur le comportement des matériaux, représentés schématiquement par la (fig 23).

### ***I-5-3 - RUPTURE INTERGRANULAIRE***

Microscopiquement, elle peut prendre la valeur et l'allure d'un clivage ou d'un faciès ductile. Donc les critères de rupture se rattachent aux deux critères précédents : contrainte critique et allongement critique.

## ***INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA DUCTILITE***

Lorsqu'on effectue des essais de traction sur un acier à des températures de plus en plus basses, on constate que plus la température diminue, plus la limite d'élasticité  $R_{0,02}$  du matériau et sa résistance à la traction  $R_m$  augmentent, mais que la différence  $(R_m - R_{0,02})$  et l'allongement à la rupture  $A$  décroissent, un tel phénomène est représenté graphiquement par la (fig 24).

Si l'essai de traction est effectué à des températures égales ou inférieures à  $\theta_1$ , on remarque que la limite d'élasticité et la résistance à la traction  $R_m$  ont la même valeur, et que l'allongement à la rupture est nul.

Ce qui signifie, que le matériau, est devenu parfaitement fragile. Cette température est appelée température de transition ductile-fragile. [1].

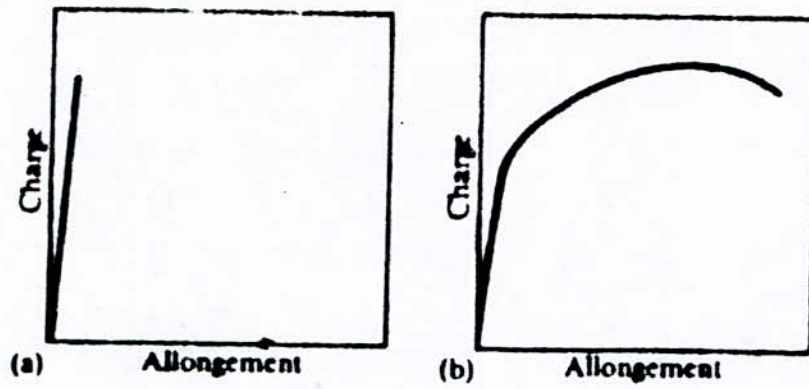


Fig 23: comportements caractéristiques en traction [1]

a - Comportement fragile

b - Comportement ductile

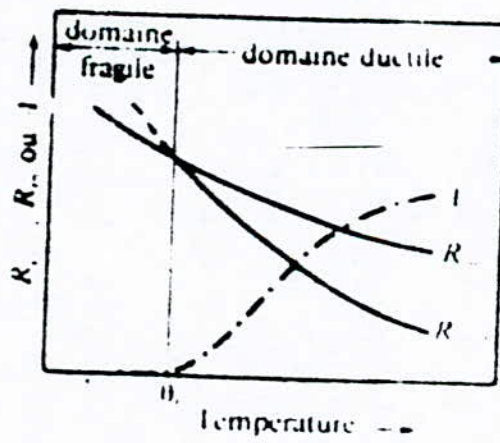


Fig 24: -variation de la limite d'élasticité de la résistance à la traction et de l'allongement en fonction de la température de l'essai [1].



## **CHAPITRE -II-**

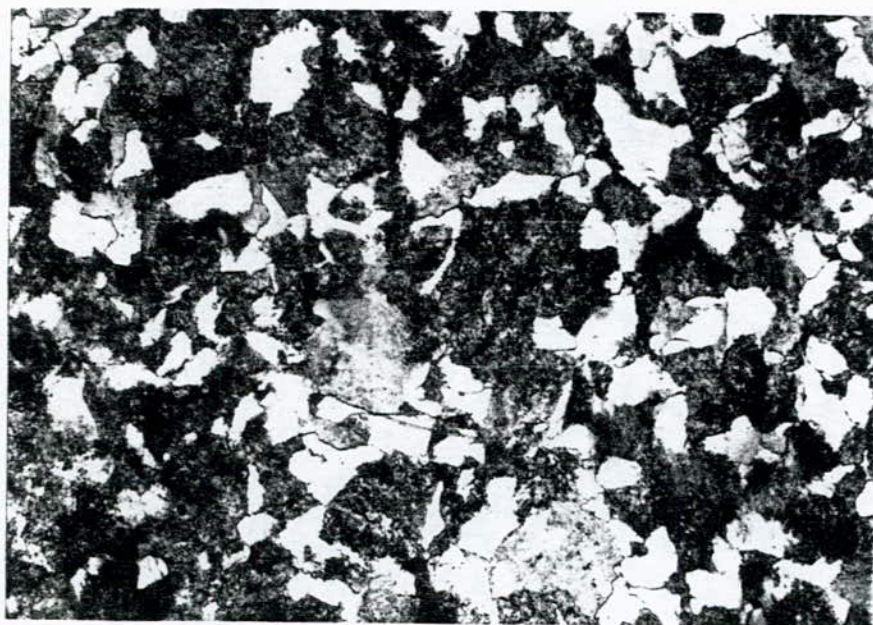
## II - 1 - MATERIAU ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

### II-1-1 - MATERIAU A L'ETAT BRUT

Le matériau utilisé dans cette étude est l'acier faiblement allié au chrome et molybdène de nuance "35 CD4" fourni gracieusement par la S.N.V.I (C.V.I) de ROUIBA.

L'acier est livré sous forme de barreaux de diamètre 22 mm, et 200 mm de longueur.

La structure à l'état brut est ferrito-perlitique régulière avec des grains de ferrite de forme polyédrique et des îlots de perlite (fig.25).



G . 500

figure 25 : Structure du 35CD4 brut

### II-1-2 - COMPOSITION CHIMIQUE

La composition chimique, selon la norme AFNOR (NF A35 -551) et ces équivalences selon les normes allemandes et américaines sont définies de la manière suivante :

| Norme             | Pays      | Élément | C         | Mn        | Si        | Cr        | Mo        |
|-------------------|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Afnor NF A 35 559 | France    | 35CD4   | 0,33-0,39 | 0,60-0,90 | 0,10-0,40 | 0,85-1,11 |           |
| Din 17200         | Allemagne | 34CrMo4 | 0,30-0,37 | 0,50-0,80 | 0,15-0,40 | 0,90-1,20 | 0,15-0,30 |
| SAE ATSI          | USA       | 4135    | 0,30-0,37 | 0,70-0,90 | 0,20-0,35 | 0,80-1,00 | 0,15-0,25 |

Tableau 3: Composition chimique de l'acier 35CD4

L'analyse chimique de notre acier dont les résultats sont les suivants a été réalisée par voie spectrale

| élément     | C%    | Mn %  | Si %  | Cr %  | MO %  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| composition | 0,380 | 0,746 | 0,200 | 0,988 | 0,187 |

Tableau 4 : Analyse spectrochimique de l'acier utilisé

### II-1-3 Analyse par microscope électronique à balayage

La microstructure est examinée plus profondément au microscope électronique à balayage équipé du système microanalyseur à dispersion d'énergie par rayons X (EDAX). Ce système permet d'observer la morphologie des échantillons, de caractériser les différents éléments existants. L'analyse EDAX confirme la composition obtenue par l'analyse spectrochimique (fig.26).

Suite aux inclusions observées, nous avons jugé bon d'identifier ces dernières par le biais de l'EDAX. Le profil obtenu au niveau de ces inclusions (fig.27) révèle l'existence de l'oxygène pique (OK $\alpha$ ) témoignent de la présence certaine d'une oxydation. Retenons donc que les inclusions sont des oxydes.

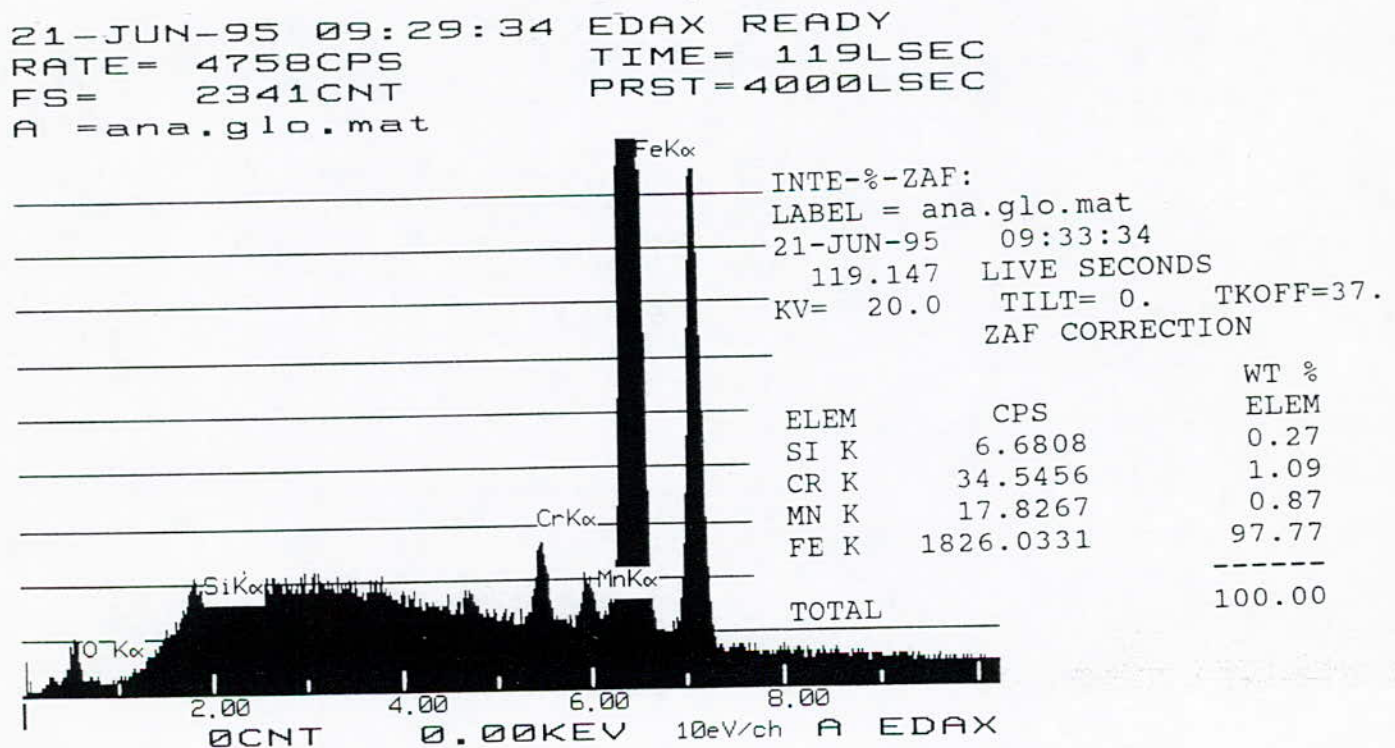
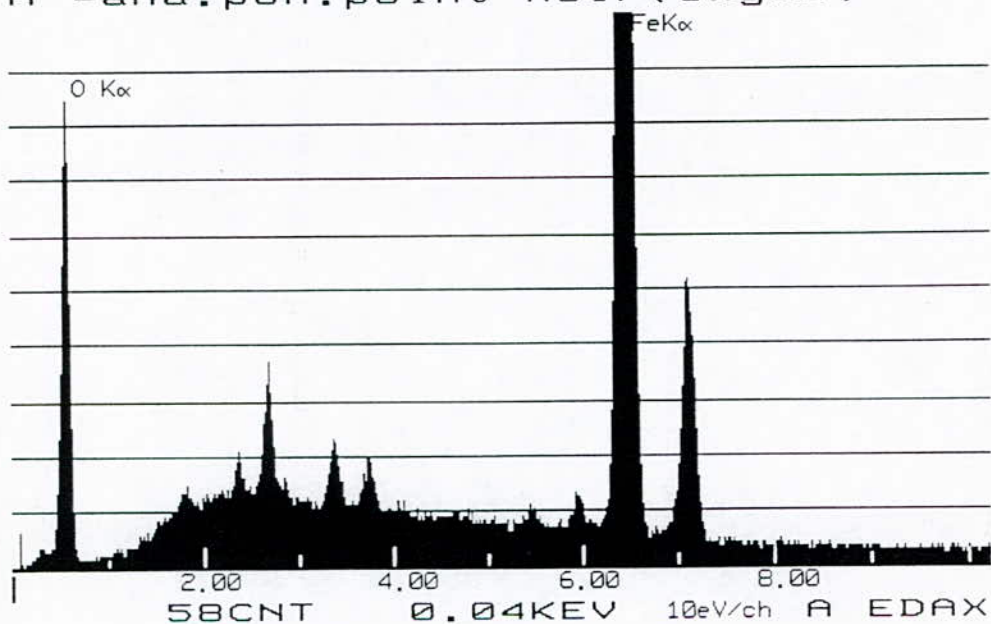


Fig 26 : Analyse de la matrice par EDAX

21-JUN-95 09:18:38 EDAX READY  
 RATE= 3172CPS TIME= 128LSEC  
 FS= 2867CNT PRST=4000LSEC  
 A =ana.pon.point noir(oxyde)



INTE-% :  
 LABEL = ana.pon.point noir(oxyde)  
 21-JUN-95 09:23:20  
 128.263 LIVE SECONDS

| ELEM  | CPS      | AT %    |
|-------|----------|---------|
| O K   | 136.704  | 99.812  |
| FE K  | 1038.440 | 0.188   |
| TOTAL |          | 100.000 |

USED PEIF: EDAX

**Fig 27 Analyse des précipités par EDAX**

## II-2 - TRAITEMENT THERMIQUE

La mise au point de cycles de traitements thermiques industriels permettant l'obtention des propriétés usuelles d'emploi des aciers spéciaux a été effectuée depuis fort longtemps alors que les processus métallurgiques accompagnant ces différents traitements n'étaient pas tous élucidés.

L'acier étudié appartient à la classe des aciers de construction par traitements thermiques ; c'est à dire qu'il est généralement utilisé à l'état trempé et revenu.

Nous nous sommes proposés d'étudier l'influence de la température d'austénitisation  $\theta_a$  sur les évolutions structurales de l'acier 35 CD4 - choisi pour sa fréquente utilisation actuelle (aéronautique, construction automobile) non seulement au cours de la trempe qui suit l'austénitisation mais également lors de revenus. Ainsi notre travail consiste à :

Rassembler les échantillons en 5 lots, chaque lot contenait 5 éprouvettes de dureté et 5 éprouvettes de résilience, ensuite chaque lot a été trempé à l'huile à partir des températures d'austénitisation suivantes :

800 ; 820 ; 850 ; 880 ; 900 °c

Le maintien à chaque température est de 30 minutes. Il est à noter que les tapures sont un défaut incorrigible, c'est pour cela qu'il faut éviter des trempes à l'eau.

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

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 Cet inconvénient lui faire subir un revenu.

De chaque lot sus-cité, nous avons pris un échantillon de dureté et de résilience et nous leurs avons fait subir des revenus à :

- 25 °c pour le 1er lot, ( à l'ambiante )
- 200 °c pour le 2ème lot,
- 300 °c pour le 3ème lot,
- 400 °c pour le 4ème lot,
- 500 °c pour le 5ème lot.

Chaque lot avait subi un maintien de 2h à sa température de revenu, suivi d'un refroidissement à l'air libre (voir tableau 5).

| Traitement utilisé | Température | Temps (min) | Traitement utilisé | température °C | Temps (min) |
|--------------------|-------------|-------------|--------------------|----------------|-------------|
| TREMPE             | 800         | 30          | REVENU             | 25             | 120         |
|                    | 820         | 30          |                    | 200            | 120         |
|                    | 850         | 30          |                    | 300            | 120         |
| HUILE              | 880         | 30          |                    | 400            | 120         |
|                    | 900         | 30          |                    | 500            | 120         |

Tableau 5 : Gamme de traitements thermiques utilisés

### **II - 3 - PREPARATION DES ECHANTILLONS METALLIQUES**

Dans cette partie, nous faisons la connaissance des différentes techniques utilisées pour observer la morphologie des échantillons et pour déterminer la nature et la localisation de chaque phase.

Les échantillons découpés minutieusement à la tronçonneuse à disque, munie d'un système de lubrification adéquat nécessaire pour éviter tout échauffement possible, subissent un prépolissage mécanique aux papiers abrasifs (120-320-600 et 1200).

La finition de l'état de surface a été effectuée sur feutre à l'aide de la pâte diamantée.

### **II - 4 - ATTAQUE CHIMIQUE**

Pour donner un potentiel de dissolution uniforme sur toute la surface de l'échantillon, nous avons fait appel à l'effet des réactifs qui vont donner une coloration à la surface polie.

Et pour voir une bonne microstructure, nous avons utilisé les réactifs suivants :

| Métal                  | Réactif (composition)   | Durée          | effet          |
|------------------------|---|----------------|----------------|
| Acier faiblement allié | Nital HNO <sub>3</sub> 3 ml<br>C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH 97 ml | 5- 10 secondes | microstructure |

Tableau 6 : réactif et durée d'attaque

### **II - 5 - MICROSCOPIE OPTIQUE**

L'observation des structures micrographiques des échantillons a été faite à l'aide d'un microscope optique de type AXIOPLAN "Karl ZEISS" (D 7082).

Le grossissement utilisé pendant la prise de microphotographie est  $G = 500 X$ .

## **II - 6 ESSAIS MECANIQUES.**

### **II-6-1 - ESSAI DE DURETE**

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

Par essais de dureté, nous avons suivi l'évolution structurale après divers traitements thermiques choisis.

Les essais sont réalisés sur un duromètre de type (LORT 240) au laboratoire du département de métallurgie de l'E.N.P. La charge appliquée est de 150 Kgf.

### **II-6-2 - ESSAI DE RESILIENCE**

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent le métal fragile.

Un des moyens, le plus classique et le plus ancien pour caractériser la fragilisation du métal sous l'action d'un choc est l'essai de résilience sur éprouvette entaillée.

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie  $W$  absorbée.

La résilience ( $K$ ) est l'énergie exprimée en joules par  $cm^2$  nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.

$$K = \frac{W}{S_0} \text{ (daj/cm}^2\text{)}$$

So

où " $W$ " est le travail dépensé pour rompre l'éprouvette et " $S_0$ " désigne l'aire initiale de la section de l'éprouvette au droit de l'entaille, c'est une grandeur qui varie en sens inverse de la fragilité.

Notre essai a été effectué conformément aux dispositions de la norme AFNOR NF 6 A 036 101 sur une machine de résilience "CHARPY" de marque "TRAYVOU" qui donnait directement les valeurs des résiliences en joules.

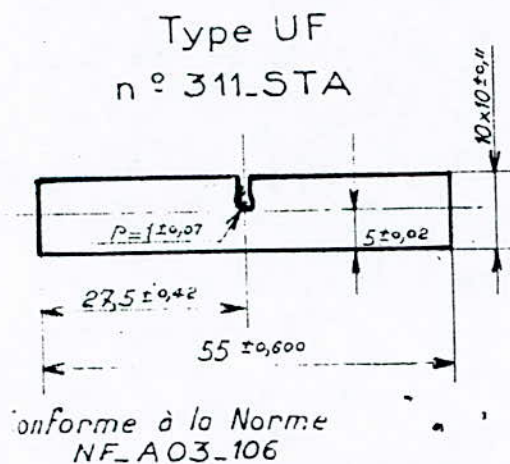
#### **a) Caractéristique de la machine**

- Angle au sommet du couteau du mouton..... $30^\circ \pm 1$
- bras du levier.....80 cm
- masse de la roue.....15 kg
- angle de chute..... $160^\circ$

## b) Eprouvette de résilience utilisée

L'éprouvette est entaillée en U (fig 28) conformément à la norme NF - A 03 - 106

- longueur de l'éprouvette..... 55 mm + 0,6
- hauteur et largeur à fond d'entaille..... 10 mm + 0,11
- hauteur restant à fond d'entaille..... 5 mm + 0,02
- rayon à fond d'entaille..... 1 mm + 0,07



(fig 28) éprouvette de résilience

## c) Facteurs Influençants la résilience

### Eprouvette, caractéristiques

- forme de l'entaille de la section rompue,
- importance et sens de la section rompue,
- état de surface à fond d'entaillé.

### Mouton

- distance entre appuis et vitesse

### Température d'essai

D'une manière générale la résilience augmente avec la température de l'essai

### Grain

La résilience augmente avec la finesse du grain.



## d) Notion de Fragilité et Choix de la Résilience

Deux métaux différents à duretés égales font toujours intervenir la propriété d'élasticité.

Donc en partant d'un métal qui a une certaine valeur de la résistance à la rupture, il faudrait lui attribuer un traitement thermique qui lui permettra de se rompre après avoir pris un certain allongement élastique.

### Conversion

|                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| W (décajoule) ----- | K (daj/cm <sup>2</sup> ). |
| daJ -----           | daj/0,5                   |

## II-6-3 - ESSAI DE TRACTION

L'essai de traction définit un ensemble de caractéristiques dont les principales sont :

- la limite d'élasticité qui correspond à la transition entre le comportement élastique et le comportement plastique ;
- la résistance ou charge de rupture,
- l'allongement plastique que peut supporter l'acier avant l'apparition d'instabilités ou de rupture.

### Eprouvette de traction choisie

Nous avons utilisé dans notre étude une machine universelle de traction de marque WOLPERT (H.C.R). La forme et les dimensions de l'éprouvette sont celles définies par la norme NF A 03 -101 (fig 29).

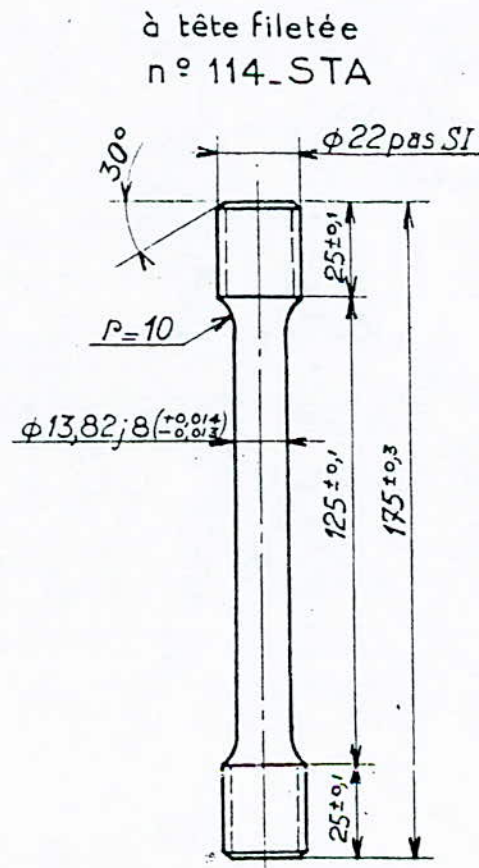


fig 29 Eprouvette de traction

## **II-7 - ESSAI DE RUPTURE**

Le mécanisme de rupture permet d'étudier la fragilité d'aciers ou d'alliages d'une façon très précise.

Pour mettre en évidence le mode de rupture, nous avons eu recours au microscope électronique à balayage "M.E.B" de type "PHILIPS - SEM 505".

Nous nous sommes limité au mécanisme de rupture brutale à température ambiante. Ces mécanismes appartiennent à 3 catégories :

- les ruptures par clivage,
- les ruptures ductiles
- les ruptures intergranulaires.

# CHAPITRE -III-

## CHAPITRE III

### III-1 - RESULTATS DE L'OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE

L'évolution de la structure métallographique de l'acier 35 CD4, en fonction des différentes températures d'austénitisation et de revenu est illustrée par la planche I (a jusqu'à O).

La structure (a) obtenue après trempe à 800 °c, met en évidence une structure martensitique sous forme d'aiguilles avec la présence d'une certaine phase en claire, qui nous semble être de la ferrite non transformée, après refroidissement à partir d'un domaine biphasé ( $\alpha+\gamma$ ).

La figure (b) montre une structure martensitique de revenu plus fine, accompagnée aussi par une structure de ferrite non transformée.

En augmentant la température de revenu (fig c), la structure décelée semble très proche de celle de la bainite.

Pour les structures d, e, f on obtient les mêmes résultats qu'auparavant mais avec un taux de ferrite inférieur au précédent;

La présence de cette phase ferritique qui correspond à une structure douce dégrade énormément les caractéristiques de résistance, en l'occurrence la dureté.

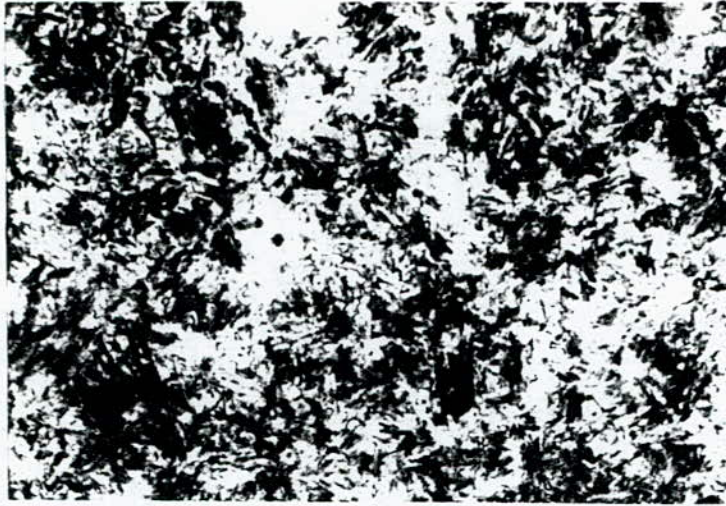
Dés que la température d'austénitisation atteint 850 °c, on constate la disparition de la ferrite, tout en remarquant une bonne homogénéisation de la structure qui est due à la transformation quasitotale de l'austénite surfusionnée.

Le traitement thermique de trempe à l'huile à partir de 880 °c, suivi de différents revenus, a mis en évidence après l'observation microscopique, une structure martensitique caractérisée par la présence de certaines plages d'austénite résiduelle (fig j, k).

En poussant plus la température jusqu'à 900 °c (fig M.N.O), l'observation au microscope optique montre la même structure martensitique, mais cette fois avec l'augmentation de la quantité d'austénite résiduelle en claire.

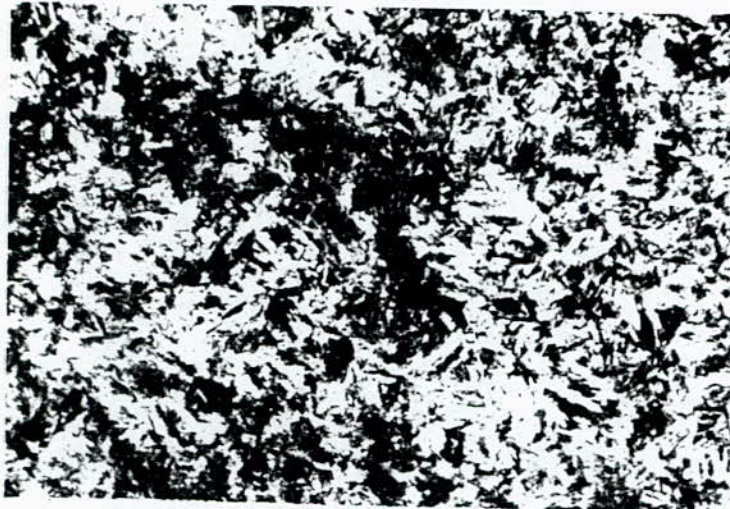
La présence de cette dernière peut avoir comme origine la grande stabilité de l'austénite surfusionnée à des hautes températures, une telle stabilité peut être expliquée par le grossissement du grain austénitique, donc la diminution de l'énergie libre du système.

L'hétérogénéité structurale provoque naturellement la dégradation de certaines propriétés mécaniques, des plus importantes à savoir la dureté, la limite élastique et l'allongement etc... .



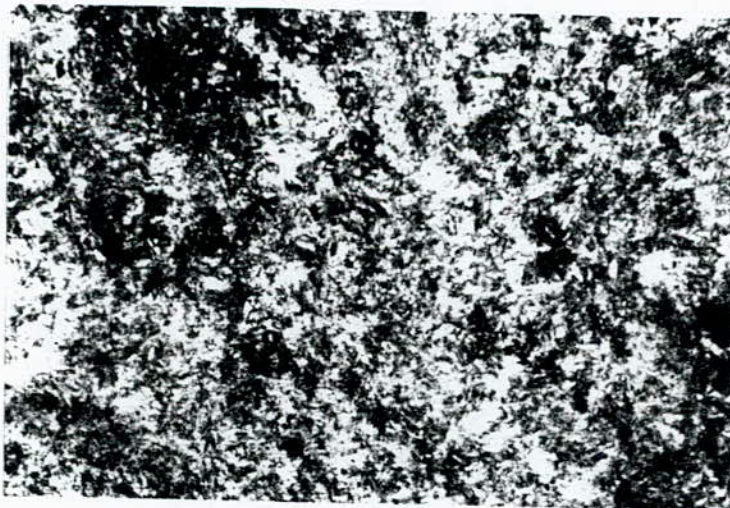
- a -Trempe 800°C  
revenu 25°C

G.500



- b -Trempe 800°C  
revenu 300°C

G.500

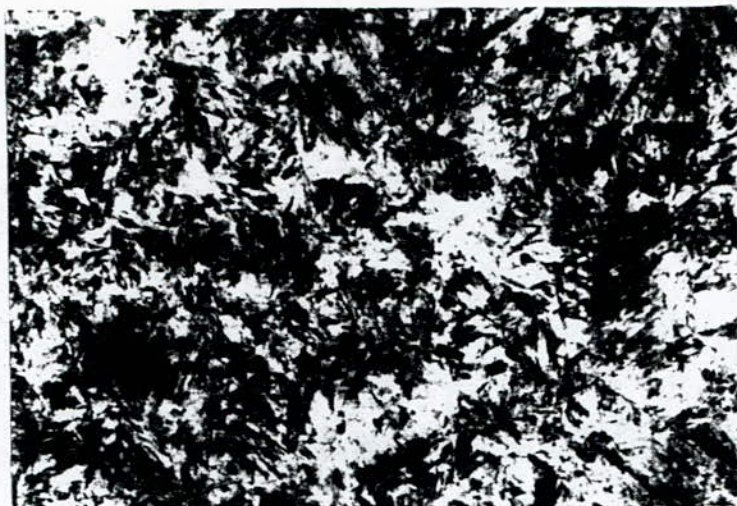


- c -Trempe 800°C  
revenu 500°C

G.500

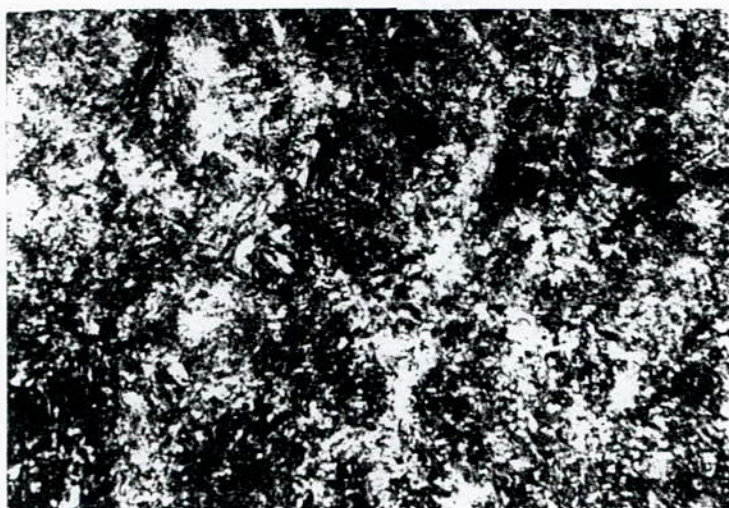
Planche (I) (de a jusqu'à o)

Evolution structurale de l'acier 35CD4 après trempe + revenu (M.O).



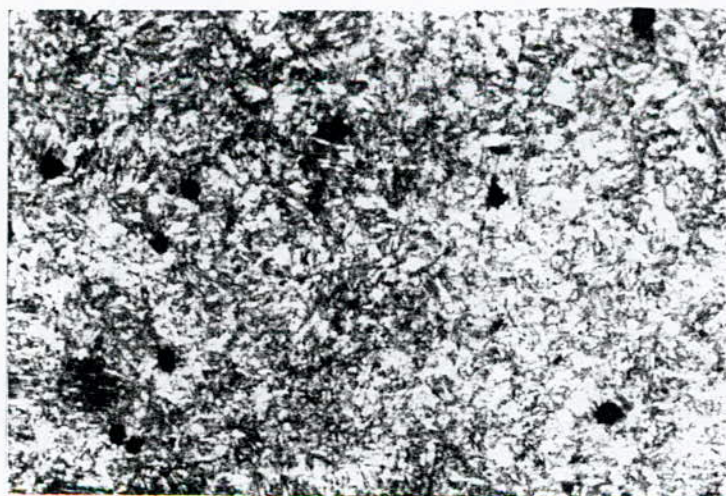
- d -Trempe 820°c  
revenu 25°c

G.500



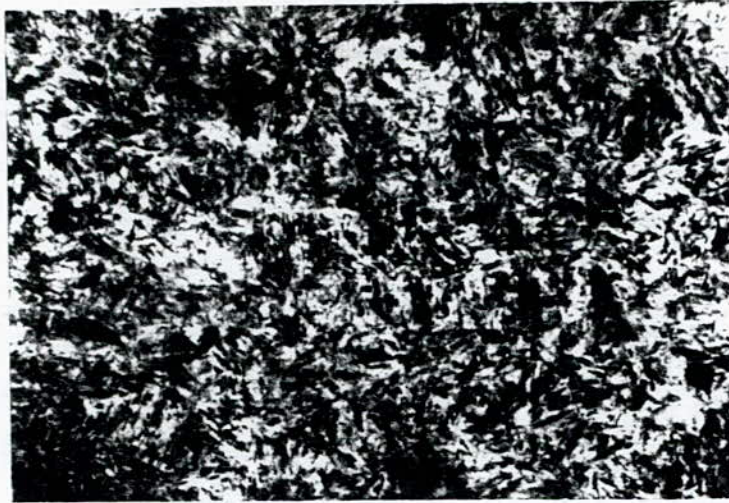
- e -Trempe 820°c  
revenu 300°c

G.500



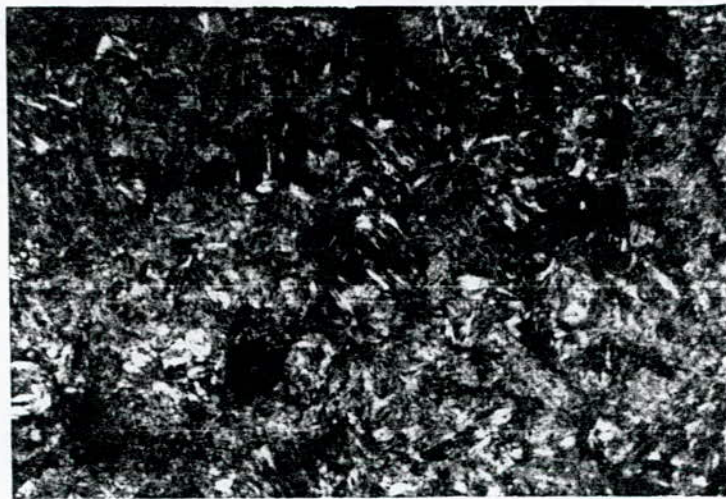
- f -Trempe 820°c  
revenu 500°c

G.500



- g - Trempe 850°C  
revenu 25°C

G. 500



- h - Trempe 850°C  
revenu 300°C

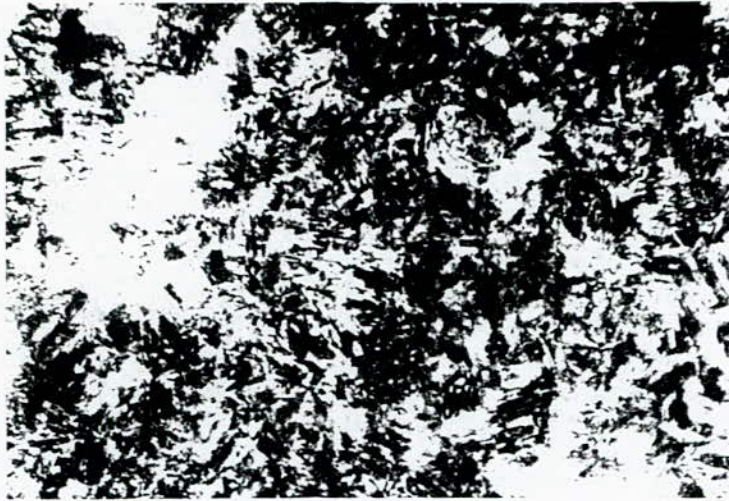
G. 500



- i - Trempe 850°C  
revenu 500°C

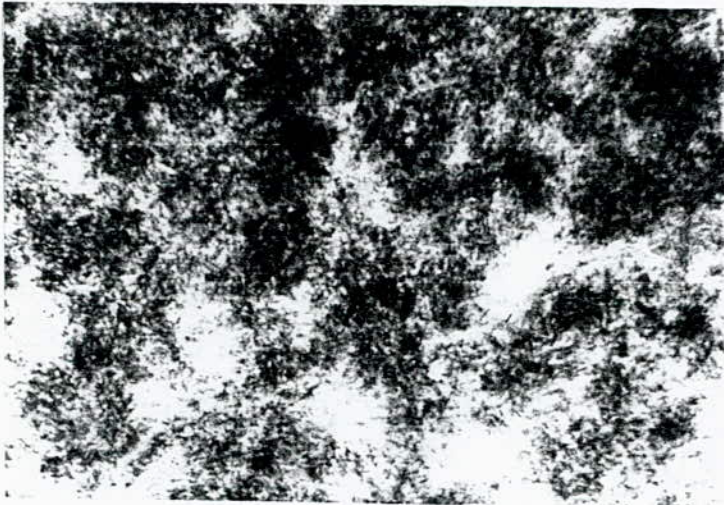
G. 500





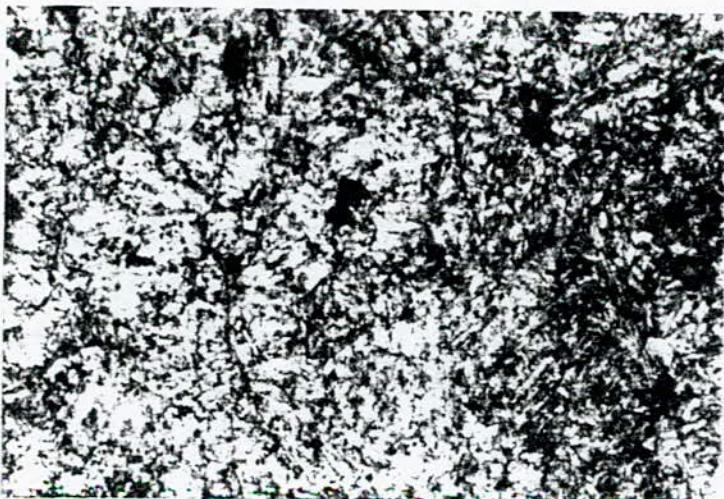
- j -Trempe 880°C  
revenu 25°C

G. 500



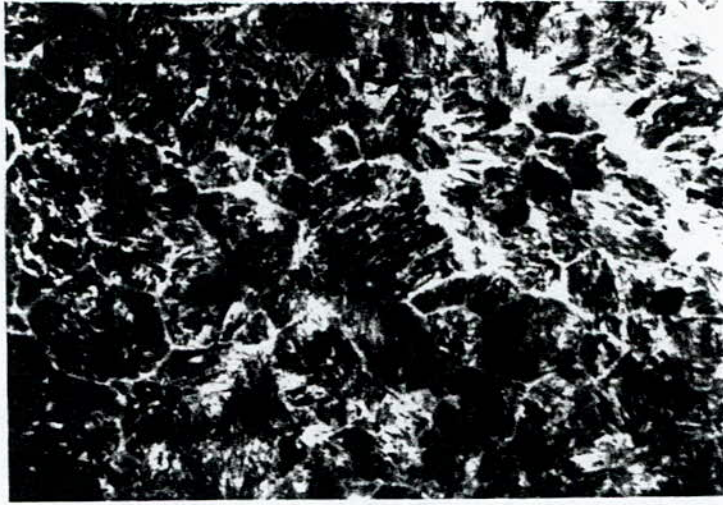
- k -Trempe 880°C  
revenu 300°C

G. 500



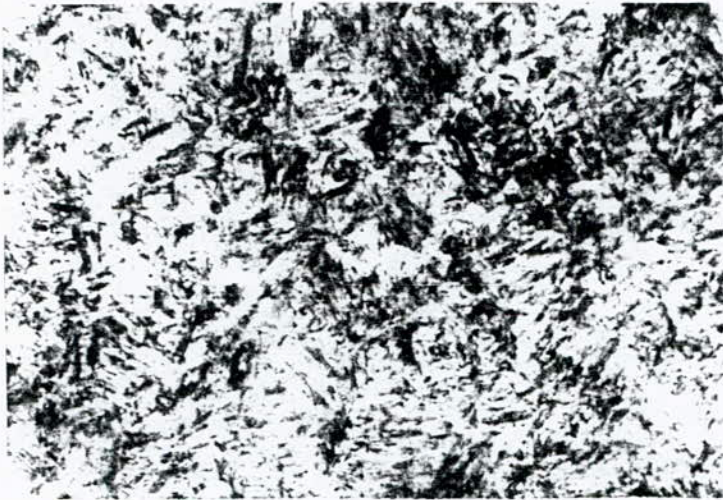
- l -Trempe 880°C  
revenu 500°C

G. 500



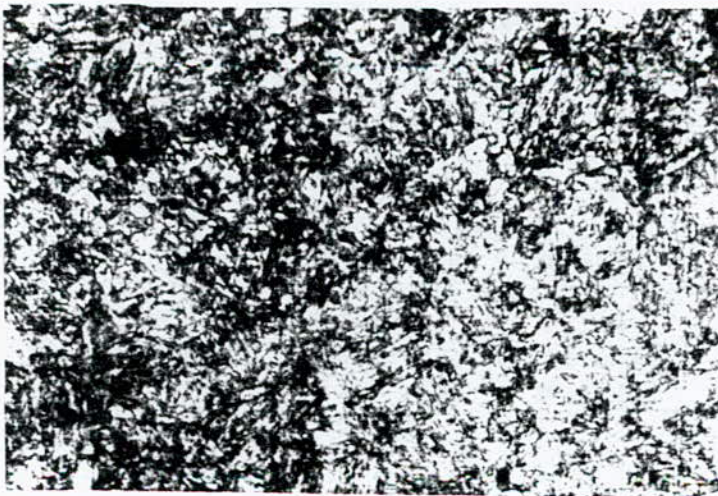
- m - Trempe 900°C  
revenu 25°C

G. 500



- n - Trempe 900°C  
revenu 300°C

G. 500



- o - Trempe 900°C  
revenu 500°C

G. 500

### **III -2 ESSAI DE DURETE.**

Dans le but d'optimiser une gamme de traitement thermique pour l'acier étudié, nous avons suivi l'évolution structural par des essais de dureté HRC en utilisant 5 séries d'échantillons pour 5 températures d'austénitisation et de revenu.

Les résultats obtenus sont résumés par les 5 courbes (fig 30).

L'analyse de ces courbes montre que la dureté varie énormément en fonction de la température d'austénitisation, tout en oscillant entre 60 et 70 HRC, ce qui répond parfaitement aux exigences du cahier de charge du matériau (tableau 9).

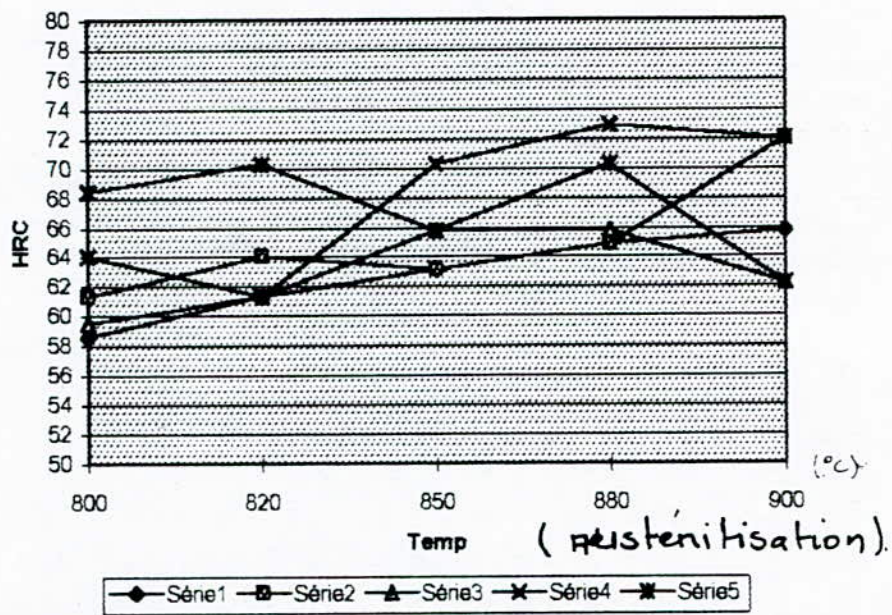
A partir des courbes (fig • 30) nous constatons que la dureté augmente de 2 à 3 HRC, en allant d'une température d'austénitisation de 800 à 820 °c, ce qui peut être expliquer par la diminution de la quantité de ferrite. En montant en température la dureté évolue dans le même sens concernant les températures de revenu.

Pour les températures d'austénitisation allant de 820 °c, la dureté demeure presque constante, mise à part le revenu à 400 °c, où on constate un gain de dureté de 7 HRC.

A partir de 850 jusqu'à 880°c, le phénomène inverse se produit, c'est à dire, une diminution de la dureté est enregistrée pour un revenu à 500 °c tout en signalant la même évolution en hausse de cette dureté pour les autres températures de revenu.

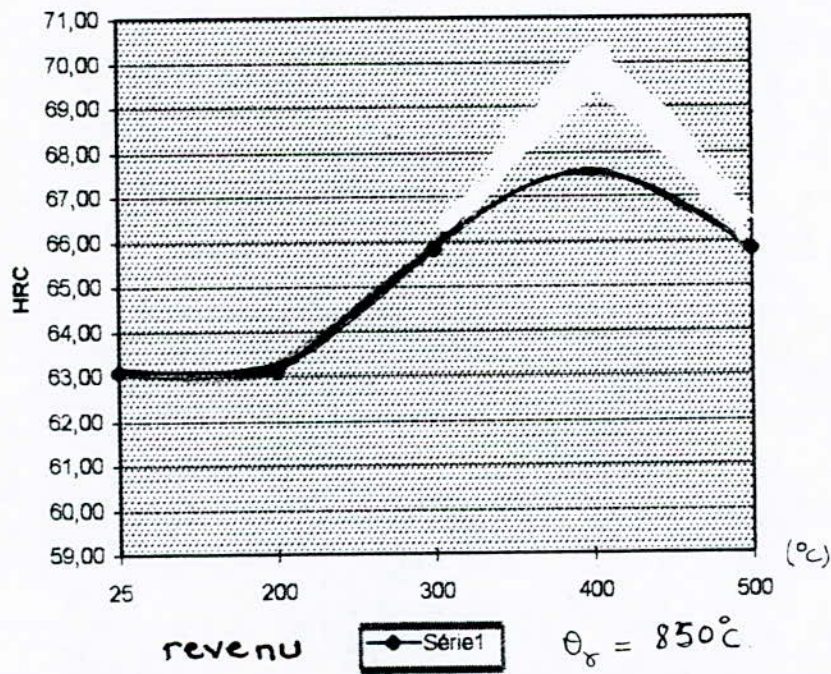
Enfin de 800 à 900°c et mise à part le revenu à 200°c qui témoigne toujours une augmentation, on enregistre la diminution de la dureté pour les autres températures de revenu.

Pour être proche de la fourchette de dureté présentée par le cahier de charge de l'acier 35CD4 (tableau 9) nous constatons que l'acier trempé à partir de 850°c à l'huile suivi d'un revenu à 400°c, présente une meilleure dureté. Les résultats obtenus sont résumés par la courbe de la figure 31.



- Série1 revenu à 25 °C
- Série2 revenu à 200°C
- ▲ Série3 revenu à 300°C
- ✕ Série4 revenu à 400°C
- ✱ Série5 revenu à 500°C

Figure 30 : Courbes de dureté



**Figure 31 : Courbe de dureté proposée**

### III - 3 - ESSAI DE RESILIENCE

Après avoir répondu à l'une des exigences des cahiers de charge qui consiste à maintenir ou d'améliorer la dureté; nous avons cherché à améliorer l'autre volet des caractéristiques mécaniques en l'occurrence la résistance et l'allongement, pour cela les mêmes distributions en nombre d'éprouvettes <sup>ont</sup> été faite pour toutes les températures d'austénitisation et de revenu.

Les résultats obtenus par les essais de résilience sont résumés par les courbes de la figure 32.

L'évolution de ces courbes montre une brusque augmentation pour les températures de revenu 300, 400 et 500°C. Ainsi pour la structure sans revenu, tout en allant de 800 à 820°C, cette augmentation de la résilience pour les température 300, 400, 500 peut avoir comme explication la suppression des tensions internes dues à la trempe. L'effet est plus marqué pour la température de revenu 500°C où on remarque une valeur de résilience élevée, ceci est due à l'élimination de tous les défauts, la relaxation des contraintes et surtout la décomposition de la martensite de revenu.

Par contre pour un revenu à 200°C nous enregistrons une diminution de la résilience de 6,6 à 2,6 daj/cm<sup>2</sup> ; cette diminution de la résilience peut avoir comme origine la diminution de la quantité de ferrite sans transformation et la précipitation de certains carbures de revenu.

La même évolution en perte de résilience en allant de 820 °c jusqu'à 880°C pour les températures de revenu 400, 500 °c est constatée

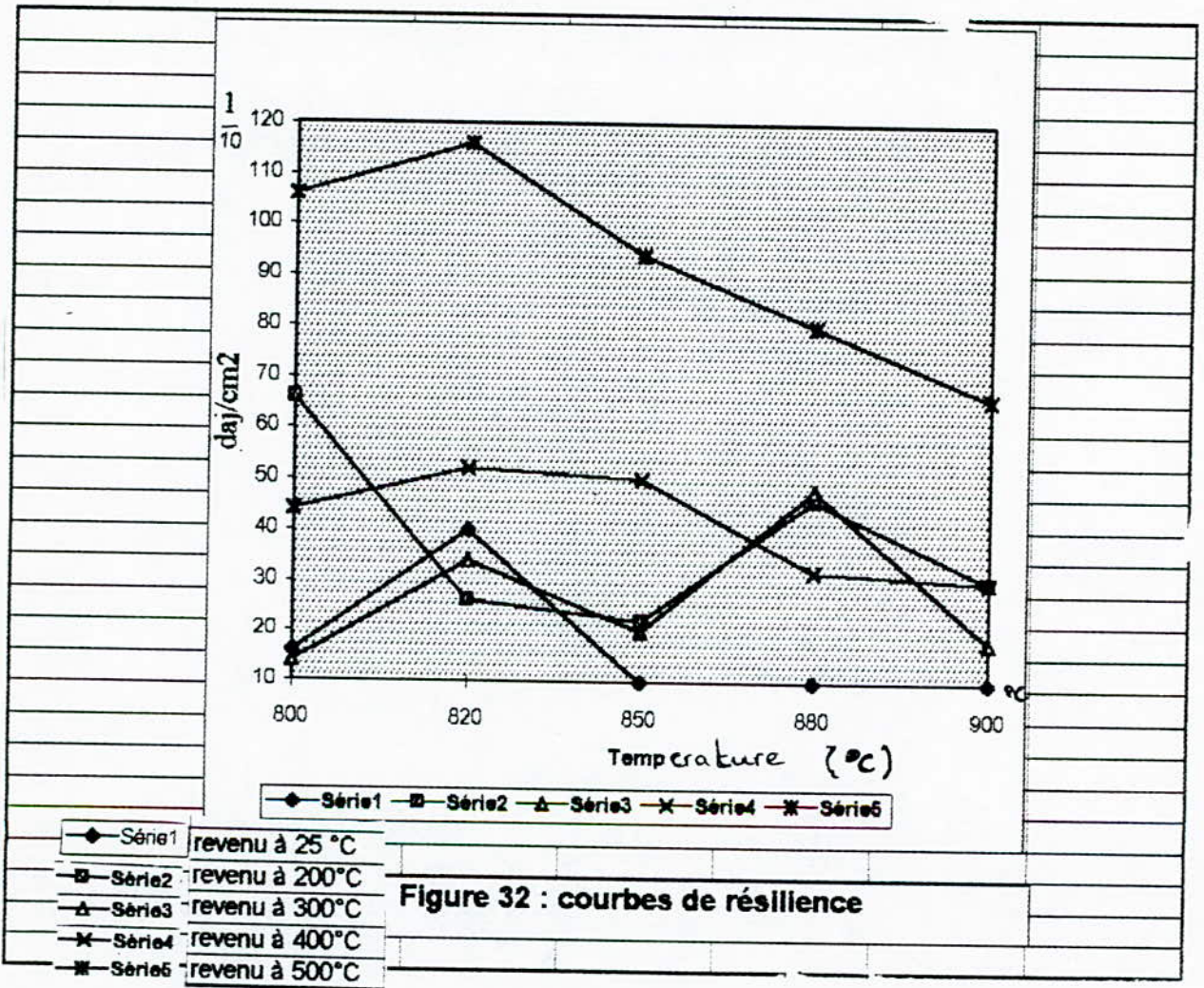
Cette baisse observée peut être liée à la formation de plaquettes de cémentite alliée.

Pour les autres températures de revenu (200 et 300°C les courbes ont montrés que le maximum de résilience est atteint pour une température d'austénitisation 880°C, et coïncide avec la présence de carbures  $\epsilon$

A partir de 880°C jusqu'à 900°C on constate une diminution de la résilience pour toutes les températures de revenu, ce qui peut être dû particulièrement au grossissement du grain austénitique et la précipitation des carbures pour des températures allant de 200 à 400°C.

A la lumière de cette analyse, et pour se rapprocher du compromis visé entre les caractéristiques de résilience et de ductilité, nous avons choisi une trempe à partir de 880°C<sup>a</sup> l'huile suivie d'un revenu à 300°C.

L'évolution de la résilience en fonction de la température de revenu pour la température d'austénisation choisie est illustrée par la courbe de la figure 33.





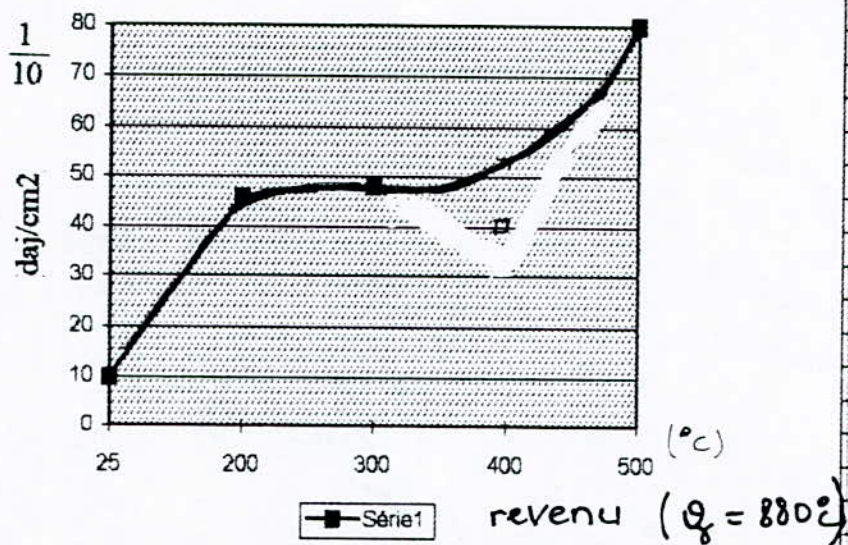


figure 33: Courbe de résilience proposée

### **III - 4 - CHOIX PREALABLE D'UN TRAITEMENT D'OPTIMISATION**

Après l'analyse des résultats de l'étude métallographique, et des essais mécaniques à savoir l'essai de dureté, et de résilience, et afin de donner un élément de réponse à notre étude, nous avons choisi un traitement thermique pour l'essai mécanique ultérieure en l'occurrence l'essai de traction, qui nous semble meilleur pour assurer un bon compromis entre les caractéristiques de résistance et de ductilité.

Ce traitement consiste à tremper l'acier à partir de 880°C à l'huile suivi d'un revenu à 300°C.

Ce choix est justifié par l'obtention d'une structure caractérisée par une dureté située dans une fourchette très acceptable et une amélioration remarquable en résilience.

### **III-5-FACIES DE RUPTURE OBSERVE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE**

Pour aller loin dans notre interprétation et confirmer les résultats des essais de résilience, nous avons procédé à l'observation des faciès de rupture au microscope électronique à balayage.

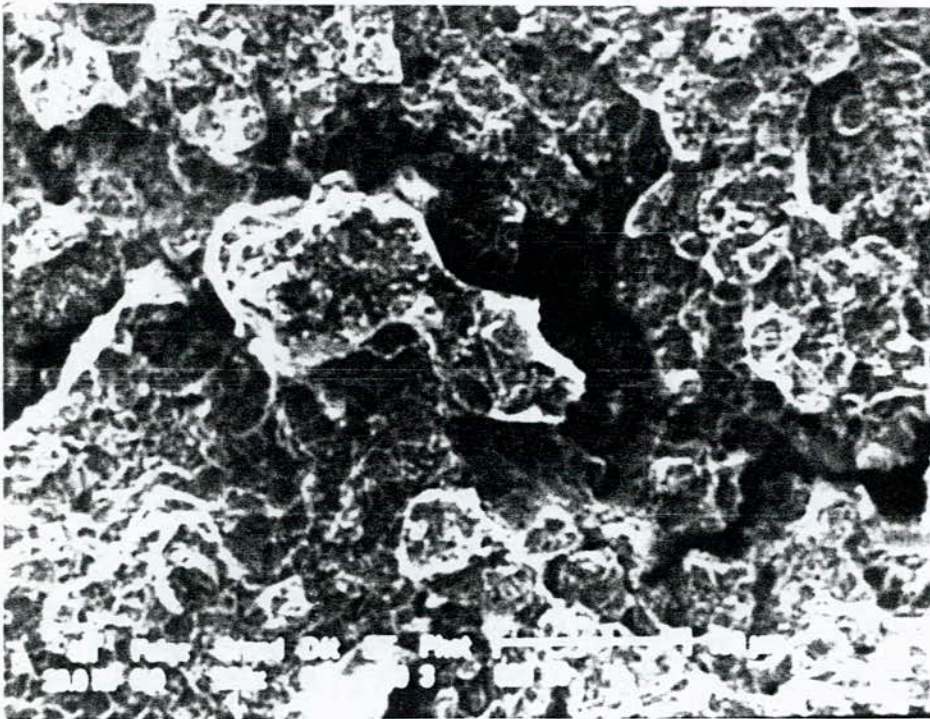
Pour les structures obtenues après trempe à l'huile à partir des températures d'austénitisation de 820, 850, 880, 900 °C suivies de revenus à des températures allant de 200 jusqu'à 400<sup>°C</sup>, les résultats des observations de faciès de rupture au MEB, sont représentés sur la planche II (a jusqu'à k).

Le traitement thermique de trempe à l'huile à partir de 850°C suivi d'un revenu à 400 °c a mis en évidence après observation au MEB des faciès de rupture granuleux et brillants avec la présence de zones de cassures lisses, *caractérisant la rupture fragile* .

L'observation microscopique après augmentation de la température d'austénitisation jusqu'à 880°C pour un même revenu (400°C) met en évidence la présence des cupules caractéristiques d'une rupture ductile, et la diminution de plus en plus de zones de cassures lisse, caractérisant une rupture fragile.

En baissant la température de revenu à 300°C pour une même température d'austénitisation, on constate que les régions caractérisant la rupture ductile au niveau du faciès sont prédominantes.

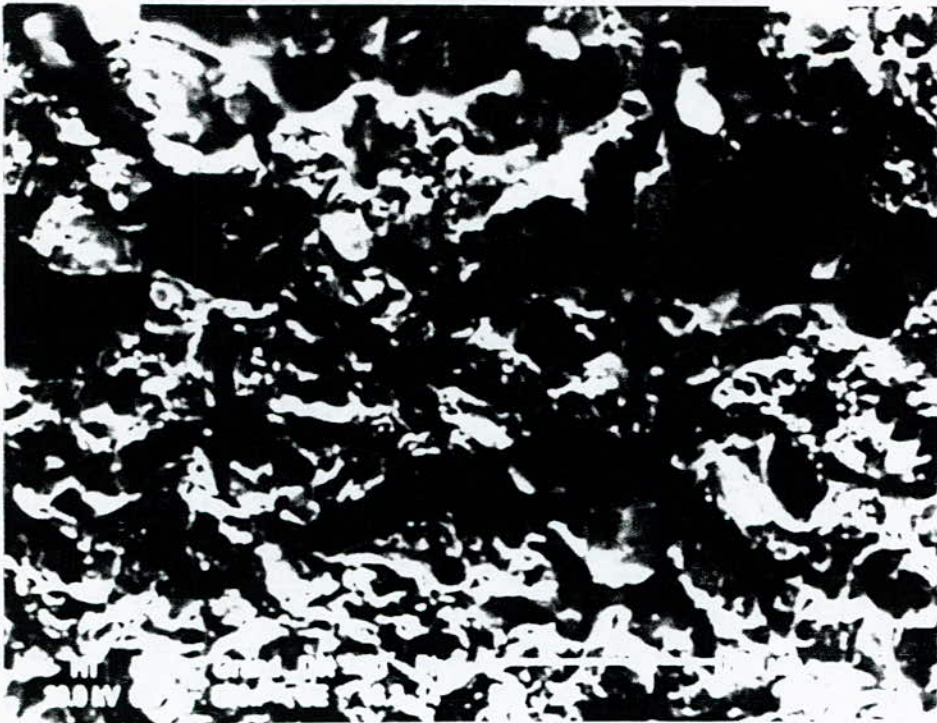
Les résultats de l'observation des faciès de rupture au MEB sont d'une bonne compatibilité avec ceux obtenus au cours des essais mécaniques.



- a - Trempe 820°C revenu 25°C

Planche (II) ( de a jusqu'à 1 )

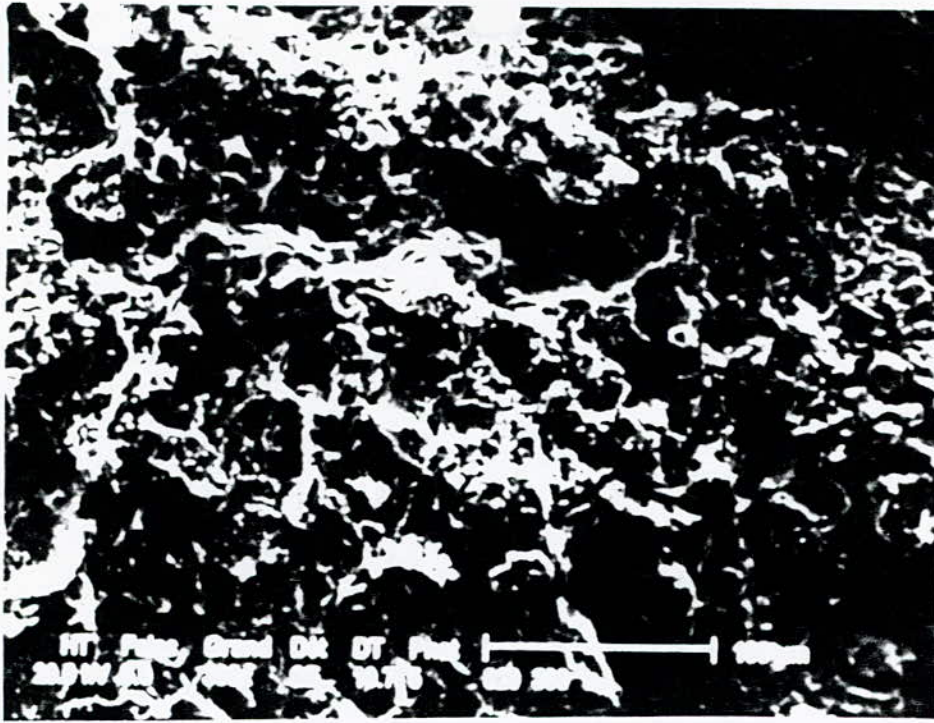
Evolution de la rupture de l'acier 35CD4  
après trempe + revenu (MEB).



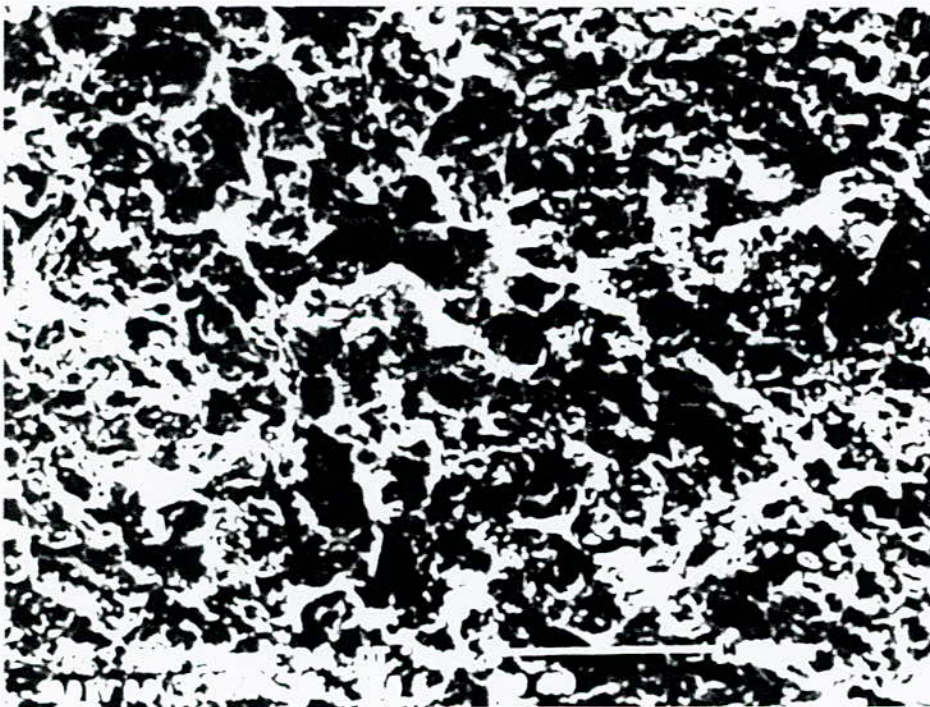
- b - Trempe 850°C revenu 25°C



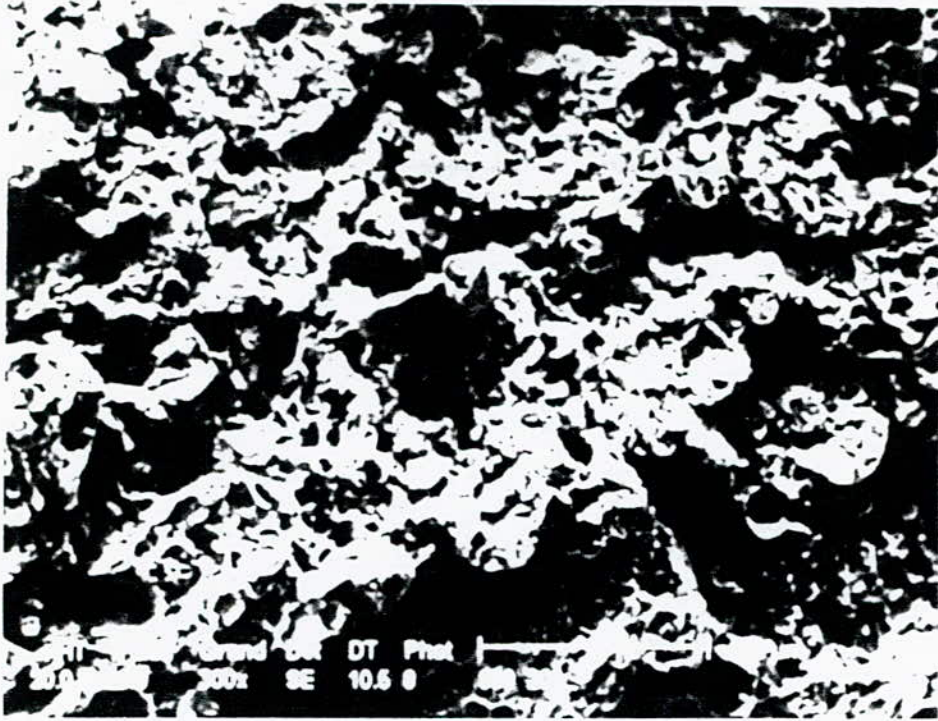
- c - Trempe 900°C revenu 25°C



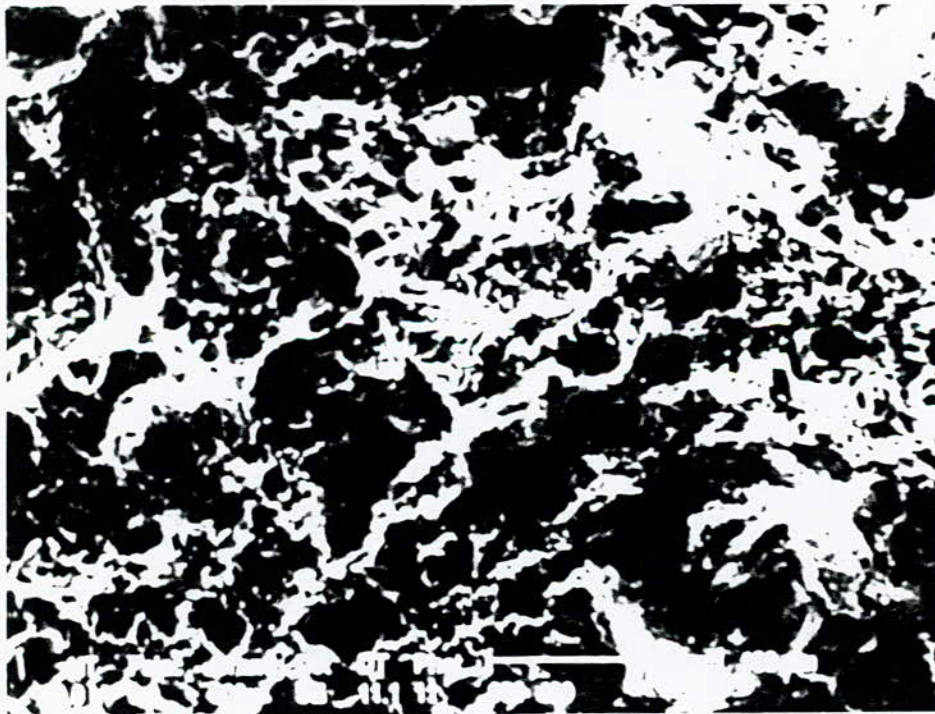
- d - Trempe 820°C revenu 300°C



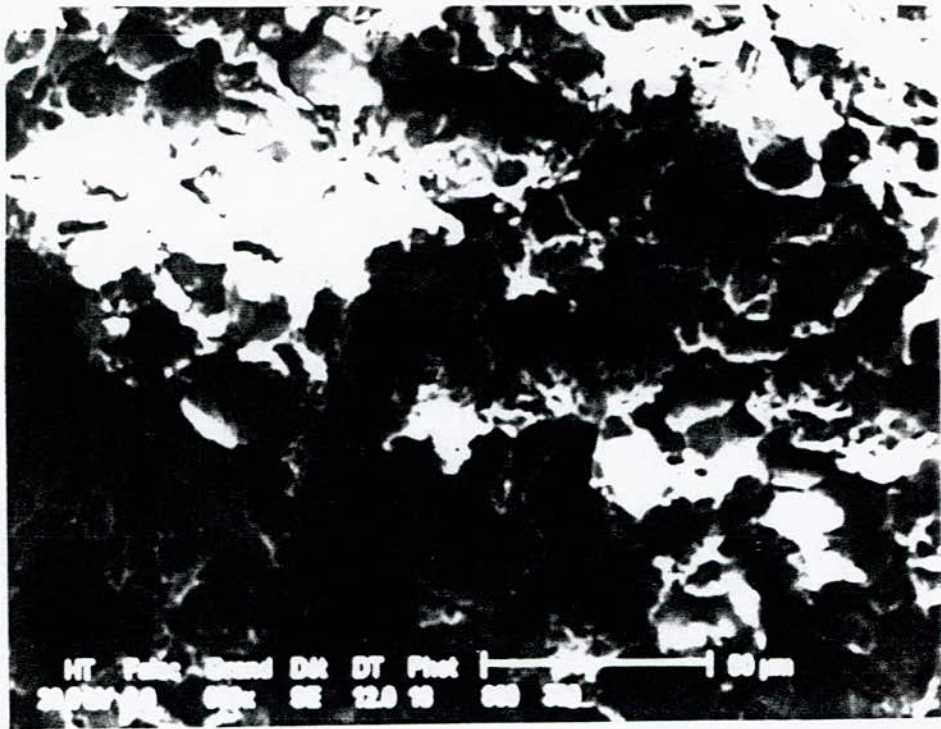
- e - Trempe 820°C revenu 400°C



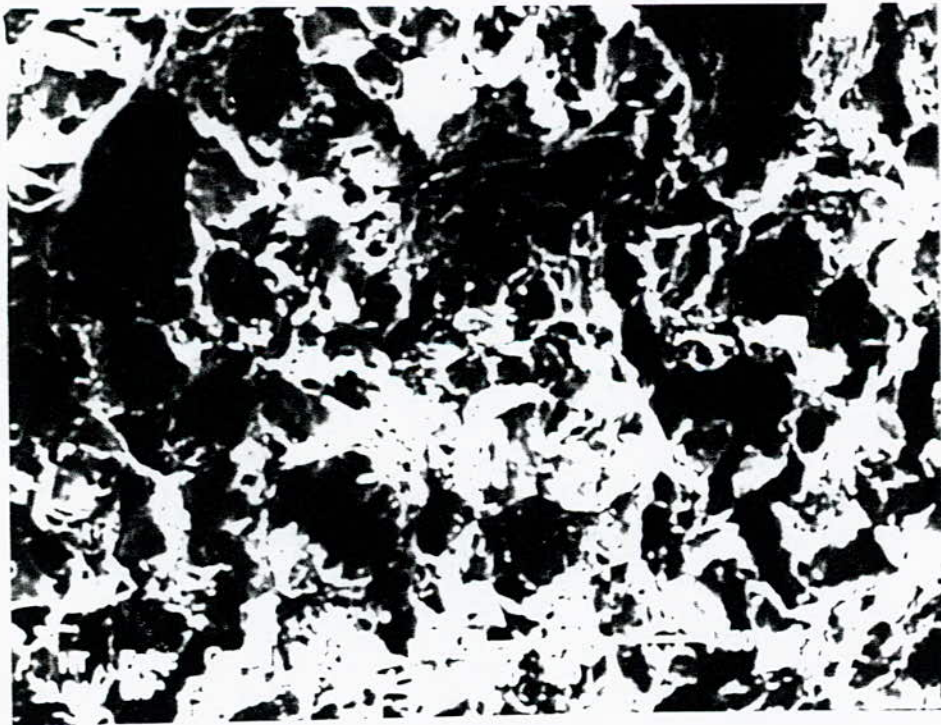
- f - - h - Trempe 850°C    revenu 200°C



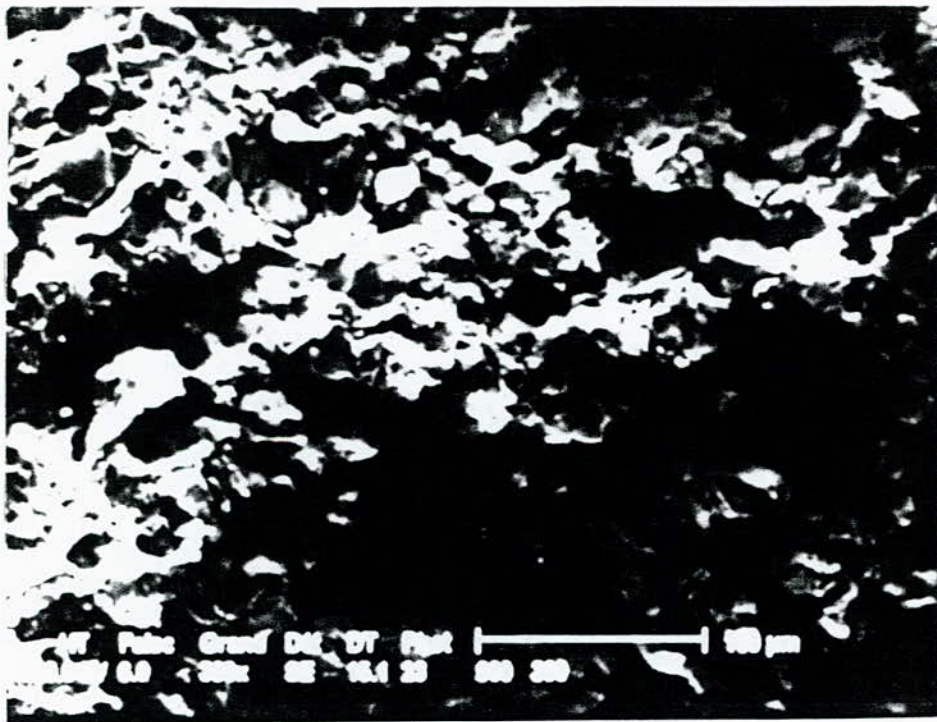
- g -    Trempe 850°C    revenu 400°C



- h - Trempe 880°C revenu 300°C



- i - Trempe 880°C revenu 400°C



- j - Trempe 900°C revenu 300°C



- k - Trempe 900°C revenu 400°C



### III - 6 - GAMME DE TRAITEMENTS THERMIQUES PROPOSEE.

Après l'analyse des résultats précédents, nous avons opté pour une proposition d'une gamme de traitements thermiques, que nous jugeons optimale.

Le traitement pour lequel on a opté après analyse et discussions des résultats précédents est résumé dans le graphe de la figure (34).

### III - 7 - ESSAI DE TRACTION

Les résultats des essais de traction des éprouvettes déjà traitées (06) selon la gamme de traitements thermiques proposée, sont résumées dans le tableau (7).

| ESSAI DE TRACTION          |                           |                              |      |
|----------------------------|---------------------------|------------------------------|------|
| traitement thermique       | Re (DaN/mm <sup>2</sup> ) | Rm<br>(DaN/mm <sup>2</sup> ) | A(%) |
| Trempe 880°C Revenu 300 °C | 140                       | 153                          | 6    |

Tableau 7 : Résultats de l'essai de traction

On note que les allongements présentés sur la courbe de traction (figure 35), représentent les déplacements de la traverse, pour calculer l'allongement total on doit calculer la variation de la longueur utile ( $L_0 = 69,5$  mn) après rupture.

A partir des résultats obtenus on constate que les valeurs de la résistance à la rupture et la limite élastique sont conformes aux valeurs données par le cahier de charge, ainsi qu'un allongement acceptable.

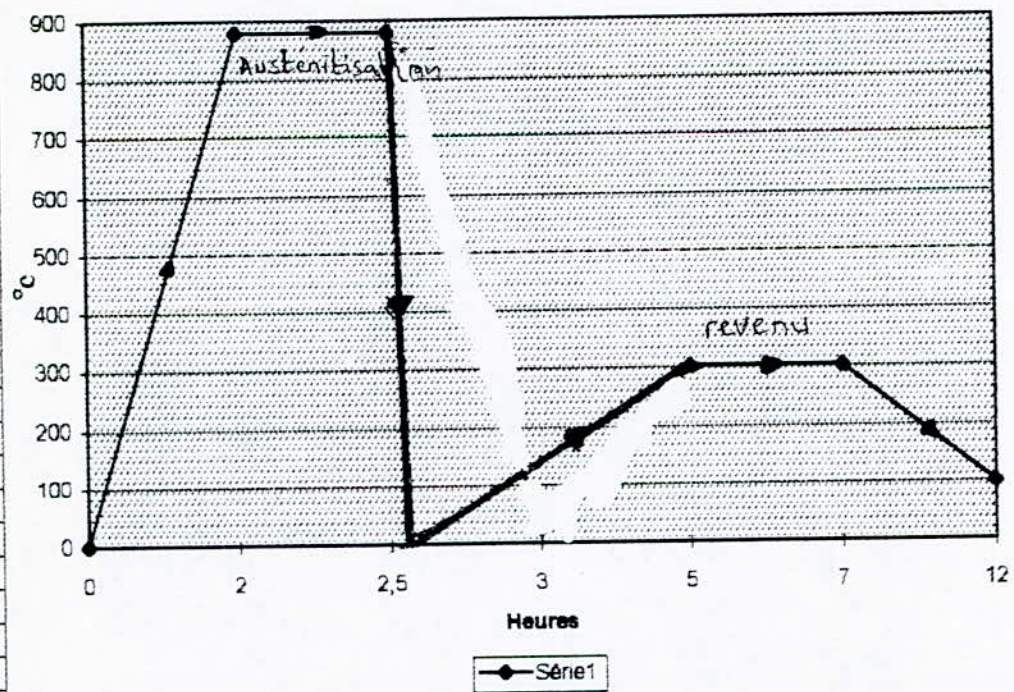


Figure 34 : Gamme proposée (traitements thermiques)

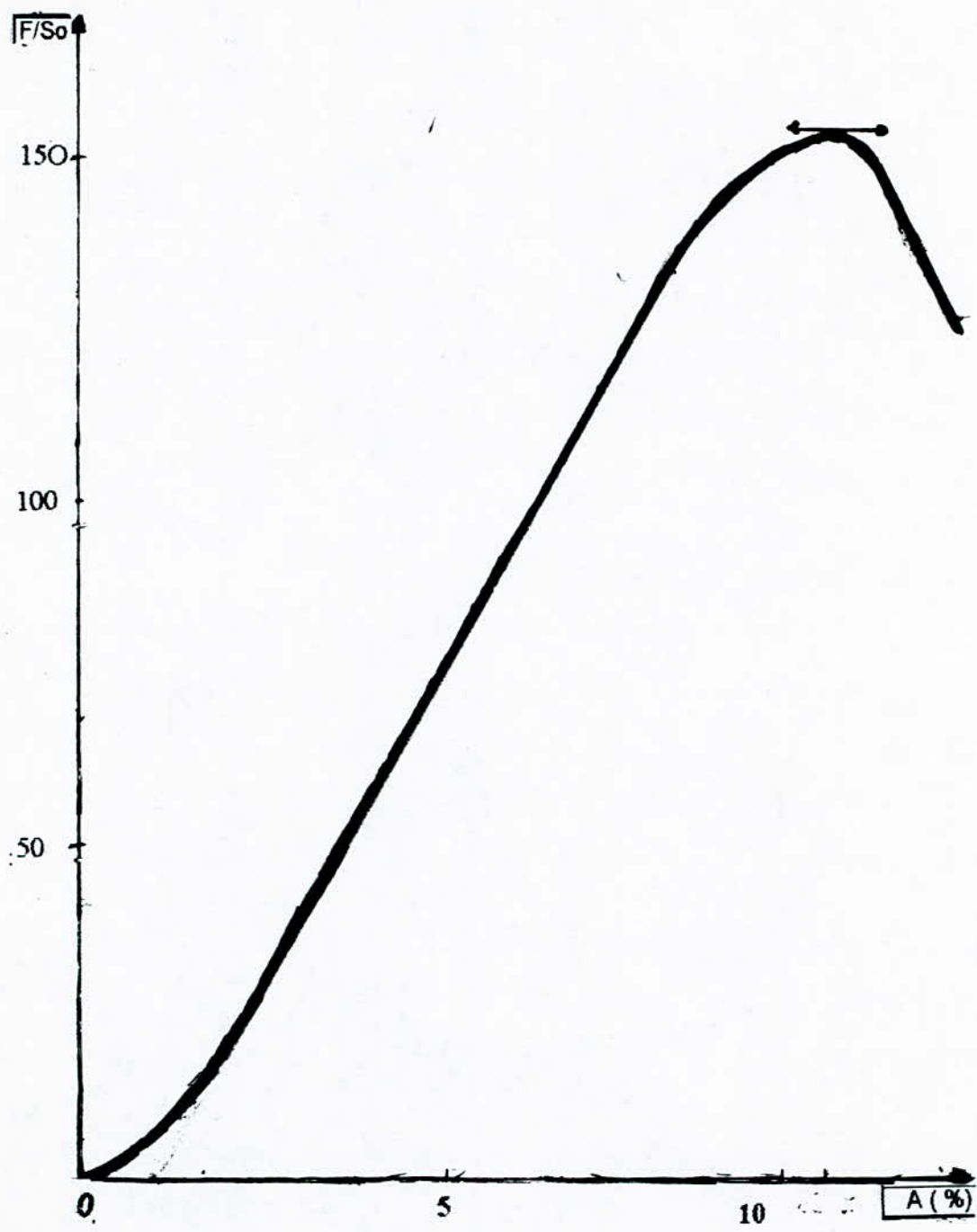


figure 35 : Courbe de traction

| Traitements<br>thermiques        | Traction                     |   |    | Dureté<br>HRC | Résilience<br>(Kgm/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------------------------|------------------------------|---|----|---------------|--------------------------------------|
|                                  | Rm<br>(Kgm/mm <sup>2</sup> ) | R <sub>0.2</sub><br>Kgm/mm <sup>2</sup> ) | A% |               |                                      |
| trempe 840 °C<br>revenu à 200 °C | 150 à 160                    | 140                                       | 4  | 51 à 56       | 2                                    |
| trempe 840 °C<br>revenu à 550 °C | 115 à 135                    | 100                                       | 9  | 410 à 230     | 11                                   |

Tableau 8 Conditions de reception d'après Reglement Air 916

| Traitements<br>thermiques      | R <sub>0.2</sub><br>(daN/mm <sup>2</sup> ) | Rm<br>(daN/mm <sup>2</sup> ) | HRC | A % | Kcu<br>(Kgm/cm <sup>2</sup> ) | Structure     |
|--------------------------------|--|------------------------------|-----|-----|-------------------------------|---------------|
| trempe 880 °C<br>revenu 300 °C | 140  | 153                          | 66  | 6   | 4.8                           | Martensitique |

Tableau 9 : Caractéristiques mécaniques obtenues après traitements thermiques de la gamme proposée

## Conclusion

Après analyse de la composition chimique et dans le but d'optimiser un traitement thermique pour répondre aux exigences du lieu d'emploi, nous avons fait subir à notre matériau une série de traitements thermiques de trempe revenu ( tableau 5 ).

Après étude métallographique des structures obtenues, nous avons testé par le biais des essais mécaniques l'une des propriétés de résistance qui est la dureté et la propriété de ductilité en l'occurrence la résilience.

Après analyse des résultats obtenus nous avons opté pour un choix d'une gamme de traitement thermique pour d'autres essais mécaniques ultérieurs en particulier l'essai de traction . Ce dernier a pour avantage de nous donner une idée sur plusieurs propriétés importantes qui sont, la limite élastique (  $R_e$  ), la résistance mécanique (  $R_m$  ) et l'allongement (  $A$  ) . Notre choix consiste à faire subir au matériau une trempe à l'huile à partir de  $880^\circ\text{C}$  suivie d'un revenu à  $300^\circ\text{C}$  pendant 2h ( fig<sup>34</sup> ) ce choix ne peut être justifié que par la réussite d'un compromis entre les caractéristiques mécaniques à savoir :

- Un maintien de la dureté à un niveau légèrement supérieur à celui donné par le cahier de charge.
- Un gain considérable en résilience.

Cette amélioration en ductilité est mise en évidence par l'observation des faciès de rupture au MEB.

Dans le but d'avoir une idée plus large sur le comportement mécanique du matériau au cours de son emploi nous avons cherché l'influence de cette gamme proposée sur les caractéristiques de traction. En effet les résultats des essais de traction ( fig<sup>35</sup> ) confirment le bon choix de cette gamme proposée , justifié par l'obtention d'un bon résultat (compromis entre toutes les caractéristiques mécaniques de notre matériau).

- L'objectif recherché dans le cadre d'un projet de fin d'étude étant atteint, cependant ce travail reste à approfondir, en utilisant certaines méthodes d'investigation de pointe, telle que la microscopie électronique à transmission ( MET ).

## BIBLIOGRAPHIE

1. J.M.DORIOT , J.R.BAILON , J.MASOUNAVE

DES matériaux

2° édition , Ecole Polytechnique de Montréal . 1985

2. E.C.BAIN, H.W.PAKTON

Les éléments d'addition dans l'acier

2° édition DUNOD Paris 1986

3. J.BARALIS, G.MAEDER

Précis de métallurgie 5°

édition AFNOR 1990

4. GUY MURRY

Technique de l'ingénieur M1117, M1125. , 1980

5. « OTUA »

Produits sidérurgiques français nuances et qualités tome 1

AFNOR 1978

6. A.ROSS

Précis de métallographie appliquée

DUNOD- BORDAS Paris 1963

7. G.LEMASSON L.BLAIN

Matériaux de construction mécanique et électrique

BORDAS Paris 1976

8. LAKHTINE

Métallographie et traitement thermique des métaux

4° édition, MIR , Moscou 1977

9.J.TRIOULEYRE

Procédés de formage

5288<sup>ème</sup> édition Paris 1980

10.LEIRIS

Métaux et alliages

tome 2 édition MASSON et CIE 1971

11.COLLECTION A.T.S OTUA (2)

Propriétés d'emploi des aciers

Dossier technique « ACIER 35 CD4 »

12. CCHAUSSIN G.HILLY

alliage métallique

Tome 1 DUNOD 2<sup>ème</sup> édition 1976

13. R.CAZAUD R LEROUX

Mise en forme et traitements

69<sup>ème</sup> édition DUNOD BORDAS Paris 1974

14. KURZ

Introduction à la science des matériaux

Presses polytechniques romandes 1987

15.N BOUAOUADJ

Matériaux métalliques Tome 1

ALGER 1992

16.J.BRISSON R.BLONDEAU PH.MAYNIER

Mémoires scientifiques de la revue de métallurgie

février 1975 N2 P 85.131.

17. ANDRE CONSTANT GUY HENRY

Les principes de base des traitements thermiques des aciers

Tome 1 édition PUY PARIS 1985