

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique  
*Ecole nationale Polytechnique*



وزارة التعليم العالي  
و البحث العلمي  
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

## DEPARTEMENT DE METALLURGIE

**En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en métallurgie**

### Thème

Etude de l'influence des éléments  
d'alliage dans le traitement  
thermomécanique des aciers  
XC10 et P22

Encadre par :  
Mr M.djeghlal

Réalisé par :  
Mr F. Lamraoui

Promotion 2007

## ملخص :

الاهتمام يكون منصب على الفولاذ المستخدم في الإنشاءات لان المجال المخصص للإنشاءات المدنية يحتاج إلى مواد ذي جودة عالية للتثبيت على الجودة المستخدمة في تحقيق المشاريع لتفادي الكوارث مثل الزلازل (خسائر بشرية ومادية) باستعمال الخرسانة المسلحة بالفولاذ الذي يكسب نهاية مرنة عالية من جهتنا لأننا ندرس علم المواد.

قبل ما يقرب الثلاثين عاما كنا نعتقد أننا نستطيع في بعض الحالات استخدام المفعول المزدوج للتشويه المرن والمعالجة الحرارية لتحسين نوعية المواد والآن يمكننا القول بالاستفادة من الطريقة التشكيلية في درجة حرارية عالية لنيل هيئة مرغوب فيها والوصول إلى خصائص ميكانيكية عالية بقدر المستطاع يعني الاسم التالي **المعالجة التارموميكانيكية في درجة حرارية عالية.**

## الكلمات المفتاحية :

المعالجة التارموميكانيكية, التشويه على الساخن.

## Résumé :

On se base sur la nuance des aciers de construction car le domaine de la construction civile a besoin de matériaux de haute qualité, pour assurer la bonne réalisation des projets et on essaye d'éviter de notre part en tant que Métallurgiste des catastrophes, comme celle de séisme de Boumer des (dommages humains et matériels) par l'utilisation du béton précontraint, d'aciers à haute limite élastique,

Il y a une trentaine d'années environ, on a pensé qu'il pouvait être possible, dans certains cas, de tirer partie de l'effet conjugué d'une déformation plastique et d'un traitement thermique, pour améliorer les propriétés du métal, c'est à dire de profiter du procédé de formage à haute température pour obtenir à la fois la forme désirée et les caractéristique mécaniques aussi élevées que possible, d'où le nom de **traitement thermomécanique à haute température.**

## MOTS CLES : traitement thermomécanique, déformation à chaud

## Summarized:

One bases on the nuance of the construction steels because the domain of the civil construction needs materials high-quality, to assure the good realization of the projects and one tried to avoid our part as Metallurgist of the disasters, as the one of earthquake to Aller bien of the (human and material damages) by the use of the prestressed concrete, of steels to high elastic limit.

There is thirty years ago about, one thought that it could be possible, in some cases, to pull left of the effect conjugated of a plastic distortion and a thermal treatment, to improve the properties of metal, that is to say to take advantage of the process of formage to high temperature to get the wanted shape at a time and the feature mechanics as elevated as possible, from where the name of treatment thermomécanique to high temperature.

## KEY-WORDS

treatment thermomécanique, hot deformation.

# Remerciements

Qu'il me soit permis de remercier et d'exprimer ma profonde gratitude en premier lieu à Dieu, mon créateur, de m'avoir donné toute la force nécessaire pour accomplir ce modeste travail ; puis mes chers parents et à Mr. M. Djeghlal mon promoteur chef du département de métallurgie, pour m'avoir confié un travail aussi intéressant et pour ses conseils, ses encouragements et son suivi attentif.

Je tiens également à remercier Mr Belhadeb enseignant à ENP en génie mécanique et Mr Brahimi enseignant dans l'université de Blida pour m'avoir beaucoup aidé.

Mr le président de jury, trouve ici mes remerciements pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Les membres du jury trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Les enseignants qui ont contribué à notre formation.

*fouez*

## Dédicaces

### *Je dédie ce travail*

- *A mes parents qui me sont les plus chers au monde.*
- *A mes frères et mes sœurs.*
- *A Mr djeghlal mon promoteur.*
- *Au fils de ma sœur Zakaria.*
- *A tous mes amis et surtout Mohamed.*
- *A tous mes collègues.*
- *A tous ceux qui me sont chers.*
- *A tous ceux qui m'ont aidé de loin et de près.*
- *A tous ceux qui aiment l'ALGÉRIE, et qui se sacrifient  
pour qu'elle reste toujours forte et solide.*

*fouez.*

# Sommaire

## Introduction général

### Chapitre I : Les aciers de construction

I.1. Introduction.....	1
I.2. Définition des aciers.....	1
I.3. Facteurs influençant la structure des aciers .....	1
I.3.1. La composition de l'acier .....	2
I.3.2. L'influence de l'histoire de l'acier .....	2
I.4. Classification des aciers .....	2
I.4.1. Les aciers non alliés .....	2
I.4.2. Les aciers alliés .....	2
I.4.2.1. Diverses catégories d'aciers alliés .....	3
I.5. Aciers de construction .....	3
I.5.1 Définition.....	3
I.5.2 Propriétés générales .....	4
I.5.3 Principales nuances d'acier de construction .....	4
I.5.3.1. Aciers de construction soudables .....	4
I.5.3.2. Acier au carbone et manganèse à structure ferrite perlite .....	5
I.5.3.3. Les aciers à haute limite d'élasticité .....	5
I.5.3.4. Les aciers à haute résistance à structure ferrite / bainite .....	5
I.5.3.5. Aciers double phase à structure ferrite / martensite .....	6
I.5.3.6. Les aciers à très haute résistance à structure bainitique à très bas carbone .....	6
I.5.4. Désignation.....	6
I.5.5. Comparaison entre les aciers de construction .....	6

### Chapitre II : La déformation à chaud

II.1 .Introduction .....	9
II.2. Déformation .....	9
II.3. Mécanisme de la Déformation .....	9
II.4. Texture .....	10
II.5. Effet de la structure sur les modes de déformation .....	10
II.6. Les étapes de la Déformation .....	10
II.6.1. Déformation élastique .....	10
1) Définition.....	10
2) Mécanisme de la Déformation élastique .....	10
II.6.2. Limite élastique .....	11
II.6.3. Déformation plastique .....	11
1) Définition.....	11
2) Description microscopique de la déformation plastique .....	12
3) Changement de structure au cours d'une déformation plastique .....	12
4) Ecrouissage.....	12

II.7. Déformation à chaud .....	13
II.7.1. Définition .....	13
II.7.2. Déformation à chaud incomplète .....	13
II.7.3. Restauration et recristallisation .....	13
1) Restauration.....	13
1.1) Définition.....	13
1.2) Les étapes de la restauration .....	14
a) la détente .....	14
b) la polygonisation .....	14
1.3) Mécanisme de la Restauration .....	14
2) Recristallisation.....	14
2.1) Définition.....	14
2.2) Mécanisme de recristallisation.....	14
2.3) La recristallisation et le recuit .....	15
2.4) Les étapes de la recristallisation .....	15
a) Germination.....	15
b) La croissance .....	15
2.5) Types de recristallisation.....	15
a) La recristallisation primaire .....	15
b) La recristallisation cumulative .....	15
c) Recristallisation secondaire .....	15
II.7.4. Recristallisation et Restauration au cours de la déformation à chaud .....	16
Introduction.....	16
II.7.4.1. Comportement des métaux lors d'une déformation à chaud .....	16
1) Métaux à forte énergie défaut d'empilement .....	16
1.1) Restauration dynamique .....	17
2) Les métaux à faible ou moyenne énergie de défaut d'empilement « $\gamma_s$ ».....	17
2.1) Recristallisation dynamique .....	18
a) Processus conduisant à un affinement des grains (si $D_0 > 2D_s$ ).....	18
b) Processus conduisant à un grossissement du grain ( $D_0 < 2D_s$ ) .....	19
II.7.4.2. Limite élastique lors de la déformation à chaud .....	20
Conclusion.....	21

### Chapitre III : Le durcissement

III.1 .Introduction .....	22
III.2. Intérêt de l'affinement du grain .....	23
III.3. Méthodes pour affiner le grain .....	25
III.4. Relation entre la taille de grain et l'élasticité .....	25

### Chapitre IV : Traitement Thermomécanique

Introduction.....	26
IV.1. Définitions sur le Traitement Thermomécanique .....	27
IV.2. Etapes générales du traitement thermomécanique .....	27
IV.3. But du Traitement Thermomécanique .....	27
1) L'austénitisation.....	27
2) Procédé d'écrouissage au cours de l'austénitisation.....	28

3) Traitement thermique après la déformation .....	28
IV.4. Les types du Traitement Thermomécanique.....	28
IV.4.1. Traitements Thermomécaniques avant un changement de phase .....	30
1. Laminage contrôlé .....	30
1.1.Introduction.....	30
1.2.Définition.....	30
1.3.Modes de laminage contrôlé .....	30
1) Laminage contrôlé des plaques sur quarto .....	30
2) Laminage contrôlé sur train à bande .....	31
3) Laminage Normalisant .....	31
1.4.Quelques applications des cycles de laminage contrôlé .....	31
1.5.Microstructure après le laminage contrôlé .....	32
1.6.Les étapes de laminage contrôlé .....	32
1.7.Laminage contrôlé et les aciers de construction soudable .....	33
1.8.Laminage contrôlé et les aciers au C-Mn .....	33
1.9.Laminage contrôlé et les aciers à structures bainitiques et martensitiques..	34
1.10. Le Laminage contrôlé et les aciers à haute limité élastique .....	34
Conclusion.....	34
2. Traitement Thermomécanique à haute température(TTMHT).....	35
3. Traitement Thermomécanique à basse température TTMBT (L'austénitiformage).....	35
3.1.Définition .....	35
3.2.Types.....	35
a) Austinitiformage à haute température .....	35
b) Austénitiformage à basse température .....	35
3.3.L'influence de la composition chimique du traitement d'austénitiformage .	36
Conclusion.....	40
IV.4.2.Traitement Thermomécanique en cours de changement de phase .....	40
1. L'iso-formage .....	40
2. Le marformage .....	40
IV.4.3. Traitement thermomécanique après un changement de phase .....	41
1. Le traitement de perlitoformage .....	41
2. Marstraining.....	41
IV.5.Amélioration des propriétés mécaniques par les Traitements Thermomécaniques .....	43
Conclusion.....	44

## Chapitre V : Partie pratique

V.1. Introduction.....	45
V.1.2. Matériaux .....	45
V.1.3. Définition et choix des matériaux .....	45
V.1.4. Composition chimique.....	46
V.1.5. Propriétés mécaniques .....	46
V.1.6. Domaines d'utilisation .....	46
V 1.7. Traitement thermomécanique appliqué .....	46
a) But du traitement .....	46
b) Etapes Pratiques .....	46
V.1.8. L'examen métallographique.....	47
a) Technique de la métallographie .....	48

b) Préparation micrographique des échantillons .....	49
c) L'attaque chimique .....	49
d) Durée d'attaque .....	50
V.1.9. Essai de dureté .....	50
V.2. Partie expérimentale .....	50
V.2.1. Préparation de l'échantillon .....	51
V.2.2. Résultats d'essais de torsion et dureté .....	51
V.2.3. les graphe de la dureté en fonction de déformation .....	54
V.3. Interprétation des examens métallographie .....	57
V.4.Résultats de l'examen métallographique .....	58
V.5.Interprétations.....	60

# Introduction générale

## Introduction générale :

Les techniques les plus récentes nécessitent aujourd'hui des matériaux sûrs et doués de propriétés aussi élevées que possible.

La construction aéronautique, l'automobile, l'industrie des chemins de fer, les industries mécaniques, ne sont pas les seules à mettre en œuvre des aciers à haute résistance, l'industrie électrique est dominée par les nouveaux alliages à caractéristiques électriques ou magnétique très élevées de même que les industries chimiques le sont par les aciers résistants aux réactifs les plus agressifs [1].

On se base sur la nuance des aciers de construction car le domaine de la construction civile a besoin de matériaux de haute qualité, pour assurer la bonne réalisation des projets et on essaye d'éviter de notre part en tant que métallurgiste des catastrophes, comme celle de séisme de Boumer des dommages humains et matériels par l'utilisation du béton précontraint, d'aciers à haute limite élastique, Sachant que : Trois problèmes se posent dans la pratique pour l'utilisation des aciers de construction:

- ❖ La recherche des hautes caractéristiques de résistance ou d'une haute dureté, on les obtient généralement par trempe suivi d'un revenu limité en température ou par traitement différé (bainite inférieur), effectué sur un acier de nuance demi dur ou dur.
- ❖ La recherche de haute caractéristique de ductilité (A%, I, K) réalisées par les mêmes méthodes, le revenu ou les traitements isothermes étant effectuée à température plus haute.
- ❖ La recherche d'une grande facilité d'usinage soit par un traitement dérivé des précédents, soit par un simple recuit [3].

Donc, accroître les propriétés dans le sens le plus favorable, et faciliter en même temps la mise en œuvre, en recherchant pour ces mêmes matériaux des propriétés très différentes destinées à faciliter les opérations de fabrication [5].

En bref, produire des alliages pouvant subir des changements très profonds en fonction **des traitements** qui leurs sont appliqués, semble être la tendance essentiel de la métallurgie moderne. Ces traitements sont d'ailleurs d'espèces très différentes :

- Les traitements thermiques (recuit, trempe, revenu) et les traitements superficiels modifient généralement à la fois la constitution et la structure des alliages.
- Les traitements mécaniques agissent principalement sur la structure en produisant un écrouissage du métal déterminent une variation des propriétés [3].
- L'association d'un traitement thermique et simultanément d'une déformation plastique mécanique a conduit au développement des **traitements thermomécaniques** principalement pour les aciers et les alliages [14].

Grâce à ce dernier type de traitement, on a été conduit à élaborer un assez grand nombre d'aciers de construction qui permettent de couvrir un large éventail de caractéristiques mécaniques et de répondre à des utilisations très diverses [5].

En plus ce procédé n'exige pas une transformation allotropique, et des résultats intéressants ont été obtenus sur des alliages présentant la même phase stable à basse et à haute température (les aciers inoxydables austénitiques) [12].

On démarre donc de la problématique suivante  
Pourquoi procède-t-on souvent au traitement thermomécanique ?  
Quelle est son influence sur les propriétés mécaniques ?

A partir de cette problématique nous avons développé une partie théorique, qui englobe les connaissances de base de notre thème : L'étude de l'influence des éléments d'alliage dans le traitement thermomécanique des aciers de construction, et une partie pratique où nous avons appliqué ce traitement sur deux nuances d'aciers XC10, P22.

# Chapitre I : Les aciers de construction

### I.1. Introduction :

Les domaines de la construction mécanique et construction métallique sont d'importants utilisateurs d'acier dans une gamme très large de qualité, ces domaines concernent des produits très divers, parmi lesquelles nous pouvons citer

- Le matériel roulant lourd (semi remorque).
- Le matériel ferroviaire (wagon).
- L'automobile
- Le matériel de travaux publics (bulldozer)
- Les profilés à froid et les profilés reconstitués soudés pour les marchés de construction métallique [1].

### I.2. Définition des aciers :

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% et à structure homogène [6]. (fig 01)

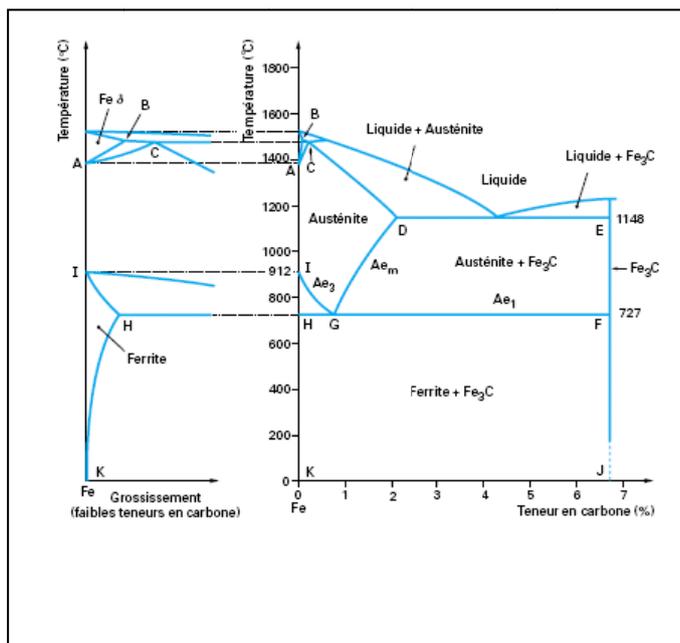


Figure 1 : diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C.

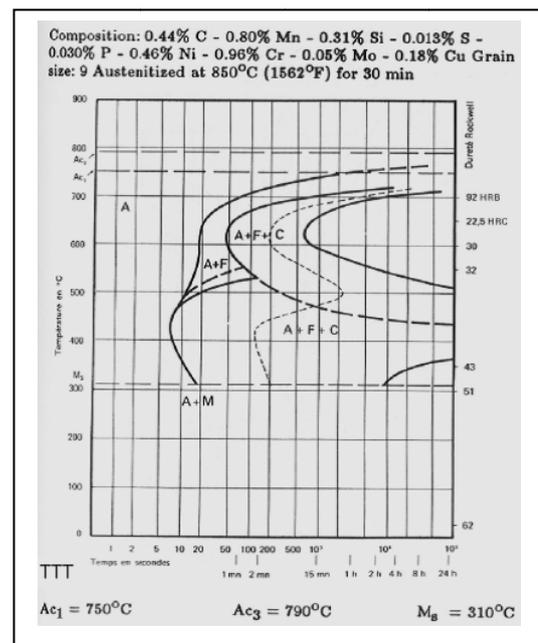


Figure 2 : diagramme TTT.

### I.3. Facteurs influençant la structure des aciers [5] :

Les conditions de la transformation de l'austénite et, par conséquent, la structure d'un acier à la température ordinaire ne dépendent pas uniquement de la vitesse de refroidissement, de multiples facteurs agissent sur la vitesse de transformation de l'austénite sur la structure et les propriétés de l'acier.

**Elles sont fonction de :**

### **I.3.1. La composition de l'acier :**

Un acier, même non allié, n'est pas seulement un alliage de fer et de carbone. Il contient une certaine quantité d'autres éléments, ajoutés volontairement au cours de l'élaboration pour répondre à certaines nécessités, ou provenant d'impuretés apportées par les matières premières et qui n'ont pas pu être entièrement éliminées. Il n'est pas rare que la teneur totale en ces éléments dépasse la teneur en carbone de l'acier.

Les éléments ajoutés volontairement sont essentiellement des désoxydants manganèse, silicium, aluminium, etc. dont le rôle est de fixer l'oxygène dissous dans le métal liquide sous une forme qu'on a cru longtemps inactive. D'autres éléments proviennent des matières premières ou de l'atmosphère des fours: azote, hydrogène, soufre, phosphore etc. et, éventuellement, nickel, chrome ou autres éléments apportés par les riblons ou les ferrailles.

Tous ces éléments, qu'on appelle souvent "oligo-éléments" (à cause de leur faible concentration dans le mélange final), jouent, à côté du carbone, un rôle important lors de la transformation de l'austénite et agissent donc sur les propriétés de l'acier. Ils modifient les vitesses de transformation, dans un sens ou dans l'autre, mais généralement en les diminuant, c'est-à-dire que les courbes du diagramme TTT sont plus ou moins reportées vers la droite. Fig(2)

**Exemple :** Le *manganèse* intervient également dans tous les aciers comme désoxydant. Dans les aciers alliés, il se comporte, dans un certain sens, comme le nickel; il augmente la trempabilité, permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable. Mais il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite, où il remplace une partie du fer.

### **I.3.2. L'influence de l'histoire de l'acier :**

Celle des matières premières dont il provient, des détails du processus d'élaboration et des déformations et traitements qu'il a subis. Cela explique la complexité des phénomènes et le fait qu'ils ne soient connus que depuis peu de temps.

## **I.4. Classification des aciers [6] :**

Il y a plusieurs critères pour les quelles on peut classer les aciers : leur structure, l'emploi, la teneur en carbone, le mode de préparation.

### **I.4.1. Les aciers non alliés :**

Se sont des alliages de teneur en carbone inférieur à 2% ; les teneurs en éléments normaux d'élaboration (Mn, Si, P, Cu) sont relativement faibles.

### **I.4.2. Les aciers alliés :**

L'insuffisance des propriétés des aciers non alliés pour certaines applications a conduit à la mise au point d'aciers alliés.

### I.4.2.1. Diverses catégories d'aciers alliés :

On peut les classer en quelques groupes suivant leurs utilisations principales, a des aciers pour :

➤ **Emploi dans un milieu agressif :**

- ✓ Aciers inoxydables : résistant aux attaques chimiques par l'atmosphère ou par les différents réactifs, auxquels ils se rattachent.

➤ **Emploi à la température extrême :**

- ✓ Des aciers dits réfractaires : ayant une bonne résistance chimique et mécanique aux températures élevées.
- ✓ Aciers à propriétés particulières : parmi lesquels nous classerons les aciers à aimants
- ✓ Aciers résistants au fluage.
- ✓ Acier pour emplois cryogéniques.

➤ **Amélioration de la trempabilité :**

- ✓ acier alliés pour traitement thermiques.

➤ **Des aciers à outils :**

- ✓ qui se distinguent par une grande dureté et une bonne résistance à l'usure; ils sont utilisés pour des outillages de toute espèce et pour l'usinage;

➤ **Usage générale :**

- ✓ Les aciers de construction.

## I.5. Aciers de construction : [1] [2] [5]

### I.5.1 Définition

On désigne par *aciers de construction* tous ceux qui sont utilisés dans l'construction mécanique et métallique (employés dans la fabrication des éléments de la machine, dans la construction des ouvrages d'art et des édifices). C'est essentiellement en raison de leur résistance mécanique que ces aciers sont choisis ;

Le choix dépend à la fois de la dimension des pièces envisagées et des sollicitations auxquelles elles sont soumises.

#### **Les aciers de construction**

- Peuvent être des aciers au carbone alliés, le plus souvent, la teneur en carbone de ce groupe d'aciers ne dépasse pas 0,5 à 0,6 %.
- Doivent posséder également de bonnes propriétés technologiques, se prêtent bien au formage (laminage, forgeage, emboutissage, etc.), à l'usinage, au soudage, avoir une

pénétration de trempe élevée, une faible aptitude aux déformations et à la production des tapures de trempe...

Les aciers de construction sont élaborés dans des fours martin acides et basiques, dans des fours électriques ouverts ainsi que dans des convertisseurs à soufflage supérieur [23].

### **I.5.2 Propriétés générales :**

Un acier de construction sera défini par sa composition chimique, par ses caractéristiques mécaniques et par sa trempabilité. Les caractéristiques obtenues dans la réalité dépendent à la fois de la dimension des pièces et de la trempabilité de l'acier.

### **I.5.3 Principales nuances d'acier de construction :**

La très grande variété des pièces et des conditions de travail auxquelles elles sont soumises, entraîne l'existence d'un grand nombre de nuances d'aciers de construction.

#### **I.5.3.1. Aciers de construction soudables :**

Ce sont des aciers à teneur en carbone assez faible, inférieur à 0.25%, et du silicium de 0.15 à 0.55 % et du manganèse de 0.30 à 1.8%, ainsi que les éléments micro-alliages (le niobium).

La microstructure de ces aciers à l'état d'emploi est généralement constituée d'un mélange de Ferrite et Perlite. Figure3

ils sont utilisés sous forme de produits plats (tôles) ou longs (poutrelles) dans de nombreuses industries, (la construction métallique, la construction navale, l'industrie du tube, la construction de gros équipements..).

Doivent présenter les niveaux de :

- caractéristiques mécaniques élevées.
- soudabilité dans des conditions techniquement et économiquement satisfaisantes.

Grâce au développement des traitements thermomécaniques à haute température et à l'emploi des éléments micro-alliages, les premiers aciers à haute limite élastique A52, à 350 MPa de limite élastique et une résilience élevée à 20°C, ils sont obtenus vers le début des années soixante, à partir des **aciers de construction soudables** à structure ferritoperlitique, ils ont subi après le laminage un chauffage à 925°C environ, suivi d'un refroidissement à l'air.

### **I.5.3.2. Acier au carbone et manganèse à structure ferrite perlite :**

Les aciers de construction les plus simples sont les aciers dont les seuls éléments d'alliages sont le carbone et le manganèse, et la microstructure est voisine de la structure d'équilibre (ferritoperlitique).

La teneur en carbone est limitée à 0.2% environ pour éviter de dégrader la résistance et obtenir une bonne soudabilité.

Le manganèse apporte un durcissement par soluté, sa teneur est limitée à 1,7% afin d'éviter d'éventuel phénomène de ségrégation.

La résistance mécanique de ces aciers à structure ferrite perlite est gouvernée par la taille du grain ferritique, les teneurs en manganèse et azote en solution solide, les proportions relatives de ferrite et de perlite, et par l'espacement interlamellaire de la perlite.

### **I.5.3.3. Les aciers à haute limite d'élasticité :**

Dit HSLA, ils ont été développés à partir des années 60, aussi bien en laminé à chaud qu'en laminé à froid ; l'augmentation des propriétés mécaniques, de la limite d'élasticité en particulier est obtenue par un affinement du grain ferritique et par une fine précipitation durcissant des éléments d'addition (niobium, le titane, vanadium).

On peut aller au-delà de 360MPa en limite d'élasticité pour les aciers au carbone et au manganèse à structure ferritoperlitique, quand on ajoute un élément micro-alliage apportant un fort durcissement par précipitation.

L'ajout de niobium en très faible quantité, permet d'accroître la résistance et la limite d'élasticité sans nuire à la ténacité.

Le Niobium commence à se précipiter au-dessous de  $A_{r3}$ , il se précipite d'abord aux joints de grains austénitiques. La déformation à chaud induit une précipitation homogène lors de la transformation  $\gamma$ - $\alpha$ , ce qui entraîne un affinement du grain ferritique, car le niobium bloque la recristallisation de l'austénite lors du laminage, et se précipite dans la ferrite lors de la transformation austénite-ferrite, d'où il se produit un fort durcissement.

Même sans précipitation induite il y aura un affinement du grain car cet élément en solution solide retarde la recristallisation de l'austénite écrouie à chaud [1].

Ces aciers sont élaborés par les procédés suivants : oxygène pur, four électrique [23].

Ces aciers ont permis d'obtenir des limites élastiques allant jusqu'à 700MPa, avec d'excellentes propriétés de ténacité et d'aptitude à la soudabilité [1].

### **I.5.3.4. Les aciers à haute résistance à structure ferrite / bainite :**

Dits aciers à haute résistance pour lequel les charges de rupture, à l'état d'emploi, peuvent atteindre et dépasser 2 500MPa, ces résistances élevées sont obtenues soit par :

- Le traitement de trempe et de revenu habituel [11].
- Des traitements spéciaux comportant un " durcissement structural" provoqué par la

précipitation de certains constituants, carbures ou composés intermétalliques

La structure est constituée d'une ferrite polygonale et aciculaire, et la deuxième phase se présente sous forme de bainite en lattes, elle peut être aussi sous forme de perlite dégénérée et même de perlite extrêmement fine. Cette structure possède une très grande capacité de déformation à froid.

#### **I.5.3.5. Aciers double phase à structure (ferrite / martensite) :**

Appelés également dual phase. Ils sont récents, car les premiers développements datent de 1978, ils sont obtenus également par le laminage à chaud à condition d'ajuster la composition de l'acier et de contrôler les paramètres thermomécaniques de ce traitement.

La structure de l'acier double phase est constituée d'une matrice ferritique à grains équiaxes environ 80% et d'îlots de martensite répartis dans la matrice (20%). Fig3-e

#### **I.5.3.6. Les aciers à très haute résistance à structure bainitique à très bas carbone**

Ils sont dits ULCB, ils ont été développés pour les tubes de transport de pétrole dans les régions arctiques, tubes pour lesquels on cherche une haute résistance mécanique avec une bonne température de transition, ainsi qu'une bonne soudabilité.

La bainite à très bas carbone a une structure extrêmement fine ; elle est composée de ferrite et de carbures, la ferrite est sous forme de latte. La formation de bainite à très bas carbone nécessite la transformation bainitique. Le niobium et le bore présentent un effet de synergie qui diminue fortement la vitesse de germination de la ferrite, ils donnent un grain austénitique très fin et relèvent la température de non recristallisation.

Le bore agit également en accélérant la précipitation de niobium à haute température. Le retard à la recristallisation de l'austénite est ainsi augmenté. Fig3-d

#### **I.5.4. Désignation :**

La désignation normalisée française des aciers se fait suivant plusieurs modes et selon la catégorie d'acier.

La désignation conventionnelle des *aciers d'usage général* ne nécessitant pas de traitement thermique est fondée sur les caractéristiques mécaniques (résistance à la traction ou limite élastique) ou sur des caractéristiques particulières.

#### **Exemple :**

L'acier de construction d'usage général, de limite élastique minimale de 240 Mpa et de qualité 1 est désigné E24-1 d'après la norme NF A 35-501.

La désignation des *aciers non alliés spéciaux pour traitement thermique* est fondée sur leur teneur en carbone. On distingue:

**1. La série CC :** dans laquelle le symbole CC est suivi d'un nombre de 2 ou 3 chiffres égal à cent fois la teneur moyenne centésimale en carbone; un acier non allié pour traitement thermique dont la teneur en carbone est comprise entre 0,05% et 0,15 sera désigné par CC10.

**2. La série XC** : réservée aux aciers dont l'étendue de la teneur en carbone est plus étroite; le symbole XC est suivi d'un nombre égal à cent fois la teneur moyenne centésimale en carbone, EX : XC10. [5]

### I.5.5.Comparaison entre les aciers de construction [12]

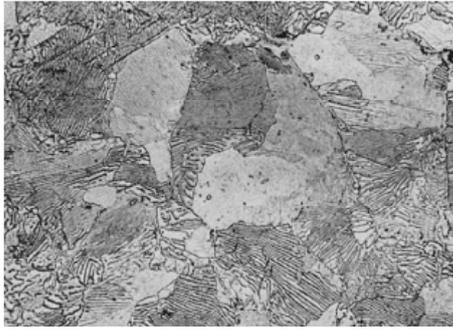
Le tableau numéro (1) donne une comparaison entre les différents types d'aciers de construction : (1)

Type d'acier	Performances (1)			Types d'utilisation
	Mises-en forme	Soudage	Résiliences	
Ferrite - Perlite				Aciers d'utilisation courante, profilés, petite chaudronnerie
Ferrite - Bainite	4	3	3	Emboutissage de pièces devant résister à la fatigue. Pièces avec relevage de collerette important. Ex : bras de roues - voiles de roues.
Ferrite - Martensite	5	3	4	Emboutissage très difficile de pièces résistant à la fatigue. L'utilisation privilégiée de la double phase est le voile de roues.
HLE Dispersoïdes	4	5	4	Les HLE se prêtent aux divers types de mise en forme. Les utilisateurs concernant le matériel roulant lourd, les longerons et traverses, les profilés....
HLE ULCB HR	*	* *	*	Le marché du SOLDUR 700 Hi-Ten est un marché de feuilles mises en œuvre par pliage, découpage chalumeau, soudage. Marché du MTPS. Bras de grues, longerons... Le SOLFORM 800 supporte des mises en forme sévères comme l'emboutissage. Utilisation en tubes, profilés...

**Tableau(1) : Comparaison entre les aciers de construction**

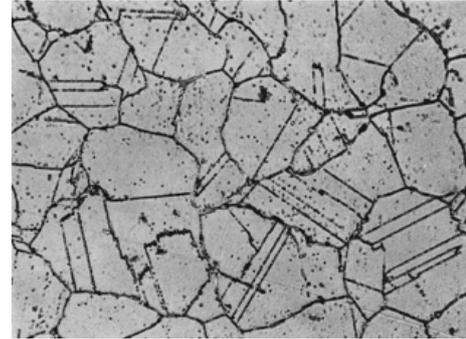
(1) : Les aciers F-B, F-M, HLE sont comparés aux aciers au carbone F-P de résistance équivalente, '3' signifie équivalent, '5' nettement meilleur, '4' nettement moins bon.

\* : Les aciers ULCB comparent le ULCB -HLE au ULCB-HR l'astérisque indiquent que l'acier possède la meilleure performance.



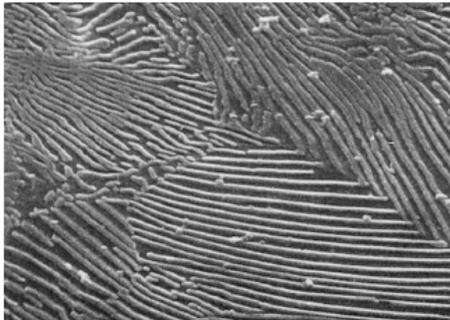
Acier à 0,8 % C - 0,21 % Mn - 0,22 % Si  
 Traitement : 800 °C (30 min) - four  
 Attaque Nital (3 %)

*a) structure perlitique*



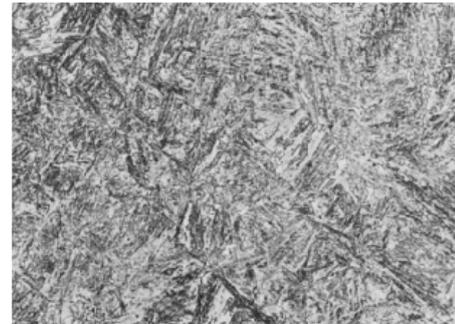
Acier à 0,12 % C - 25 % Cr - 20 % Ni - 1,5 % Mn - 1,5 % Si  
 Traitement : 1 125 °C (1 h) - eau - 800 °C (30 min)

*b) structure austinitique*



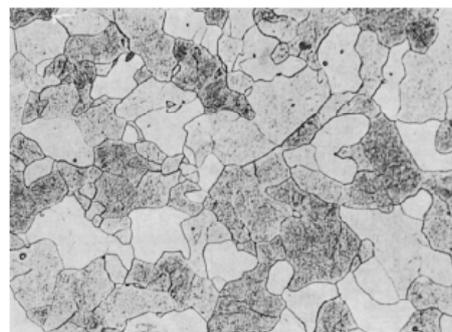
Lamelles claires : Fe<sub>3</sub>C  
 Fond sombre : ferrite

*c) structure perlite lamellaire*



Acier à 0,35 % C - 4,1 % Ni - 1,6 % Cr - 0,4 % Mo .Traitement : 850 °C (30 min) - refroidissement interrompu à 300 °C (16 h) Attaque Nital (3 %)

*d) structure bainitique*



Fer Armco  
 Traitement : 950 °C (30 min) - four  
 Attaque Nital (3 %)

*e) structure ferritique*

**Figure 3 : quelles que structure du l'acier**

# Chapitre II :

# La déformation

# a chaud

### II.1 .Introduction :

Les nombreux procédés de mise en forme des métaux sont reliés par le fait qu'ils font appel à la déformation plastique du matériau, et qu'ils sont soumis aux lois qui régissent cette déformation plastique.

Au cours d'une opération de formage à chaud, il se produit parallèlement d'importantes modifications structurales, car le comportement mécanique que l'on peut décrire en termes de contrainte et de déformation est étroitement lié à l'évolution structurale qu'il reflète [7].

#### Remarque :

La température ambiante peut être pour certains matériaux une température de déformation à chaud.

### II.2. Déformation :

On appelle déformation, un métal qui subi une modification morphologique, une modification des dimensions ou de la forme d'une substance, sous l'action des forces appliquées ou par des processus physiques et mécaniques variés.

Puisque les contraintes sont dues à des causes diverses, il faut distinguer :

- Les contraintes dues à une charge extérieure qui disparaissent avec sa suppression.
- Les contraintes internes apparues et équilibrées au sein du corps considéré sans action d'une charge extérieure [10].

### II.3. Mécanisme de la Déformation :

La plus grande partie du travail absorbé par la déformation d'un métal (jusqu' à 95%) se transforme en chaleur, alors que la partie restante s'accumule sous forme d'énergie potentielle élevée des atomes chassés de leur état d'équilibre.

Cette accumulation est traduite par l'augmentation de la quantité des défauts d'arrangement cristallin (macle, lacune, dislocation etc..) et le renforcement des contraintes résiduelles.

Le métal déformé est caractérisé par une haute densité de dislocations  $10^8$  à  $10^{12}$  *disl.cm*<sup>-2</sup>, ainsi que par une concentration notable de lacunes.

Dans les cristaux, les dislocations sont réparties à peu près uniformément et distantes en moyenne de quelque dizaines de microns, ce qui correspond à une densité de  $10^6$  à  $10^7$  *disl.cm*<sup>-2</sup>[9].

#### II.4. Texture :

Lorsque les déformations sont importantes, elles donnent lieu à une orientation cristallographique préférentielle des grains.

L'orientation régulière (n'est pas aléatoire) des cristaux déterminée par les efforts extérieurs a reçu le nom de texture (texture de déformation).

Plus la déformation est forte, plus le nombre de grains à orientation préférentielle (texture) est grand.

- ✓ La formation d'une texture favorise l'anisotropie des propriétés mécaniques et physiques [8] [9] [20].

#### II.5. Effet de la structure sur les modes de déformation :

En général, la déformation totale d'un échantillon polycristallin est la somme des déformations Intergranulaire et intragranulaire.

- **Déformation intragranulaire :** la déformation s'effectue principalement par glissement.
- **Déformation Intergranulaire :** On la caractérise fréquemment par le rapport  $\varepsilon_j / \varepsilon_i$  de la déformation due au glissement des joints à la déformation totale [9].

#### II.6. Les étapes de la Déformation :

La déformation comporte trois parties

##### II.6.1. Déformation élastique :

###### 1) Définition :

On appelle déformation élastique une déformation dont l'action sur la forme, la structure et les propriétés d'un corps cesse complètement lorsque la charge appliquée est supprimée [17].

###### 2) Mécanisme de la Déformation élastique :

En traction ou bien en compression il y a un éloignement ou bien un rapprochement des atomes par rapport aux autres, un tel écart à partir d'un état d'équilibre compromet le bilan des forces d'attraction et de répulsion électrostatique.

C'est pourquoi après la suppression de la charge les forces d'attraction et de répulsion remettent les atomes déplacés à état d'équilibre de départ.

Donc la déformation élastique d'un matériau est obtenue sous l'effet d'une contrainte inférieure à sa limite d'élasticité, elles n'entraînent pas de déformation permanente après suppression de la contrainte exercée [10]. Fig4

### II.6.2. Limite élastique :

- La limite d'élasticité macroscopique est la contrainte nécessaire pour faire déplacer les dislocations de sorte qu'il en résulte un glissement macroscopique.
- La limite d'élasticité d'un polycristallin correspond à la première déformation permanente mesurable.
- La limite d'élasticité vraie ne dépend pas de la grosseur des grains, alors que la limite conventionnelle la fait intervenir, il se produit un blocage des sources par suite de l'empilement des dislocations sur le joint [7] [18] [19].

### II.6.3. Déformation plastique :

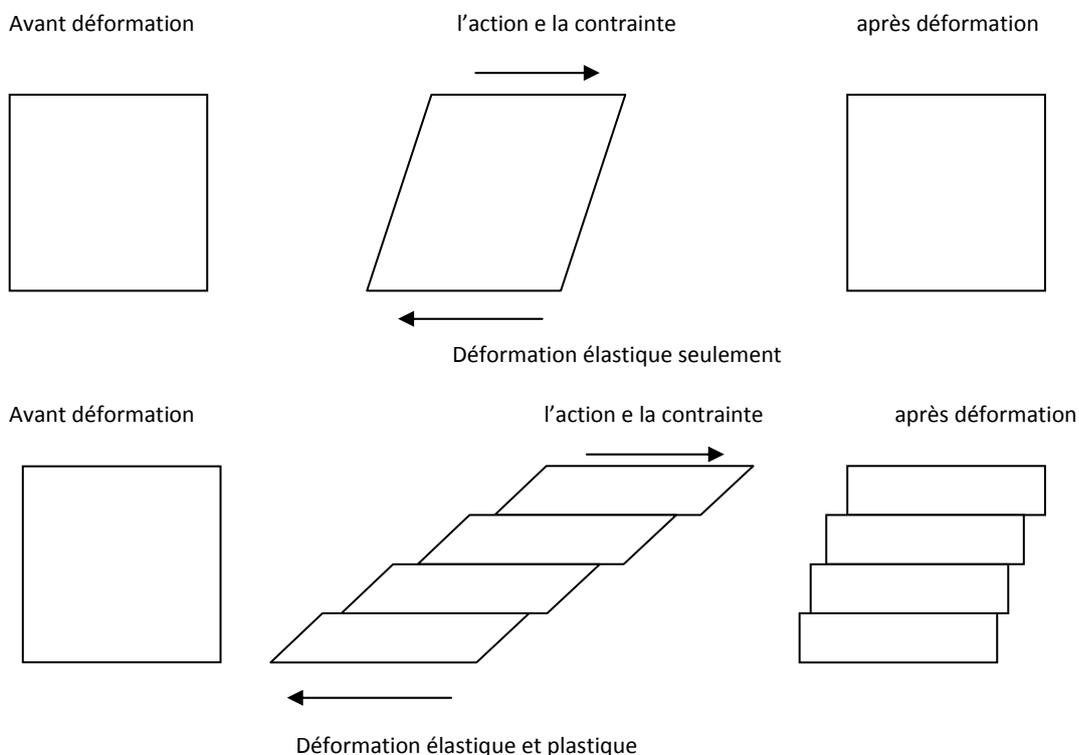
#### 1) Définition :

La plasticité est une propriété d'un solide dans le domaine des déformations permanentes. [13]

Lorsque les contraintes tangentielles dépassent une certaine valeur (limite d'élasticité), la déformation devient irréversible, la suppression de la charge n'élimine que la composante élastique de la déformation alors que la partie de la déformation dite plastique subsiste.

Fig4

- La déformation plastique peut se produire par glissement ou par maclage.
- Le glissement a lieu suivant les plans et les directions de l'empilement les plus compactes [7] [10].



**Figure 4:** *déformation élastique et plastique*

## 2) Description microscopique de la déformation plastique :

La déformation plastique est entièrement due à l'action d'un seul système de glissement, ces lignes de glissement sont longues et droites [9].

Les dislocations commencent à se déplacer lorsqu'une contrainte de cisaillement suffisante s'exerce dans leur plan de glissement et qu'elles ont entièrement traversé un cristal, les deux moitiés de l'éprouvette séparées par le plan de glissement se trouvent décalées d'une quantité égale au vecteur de Burgers «  $b$  » fig(5), il apparaît ainsi à la surface du cristal une marche élémentaire dont la hauteur est la projection de «  $b$  » sur la normale à la surface considérée [7].

### 2.1) Vecteur de Bergers : [5]

La déformation se propage et peut être représentée par un vecteur, appelé vecteur de Bergers, ainsi on dit que la dislocation est coin si le vecteur est perpendiculaire à la ligne de dislocation, et qu'elle est vis si elle est parallèle. Fig (4)

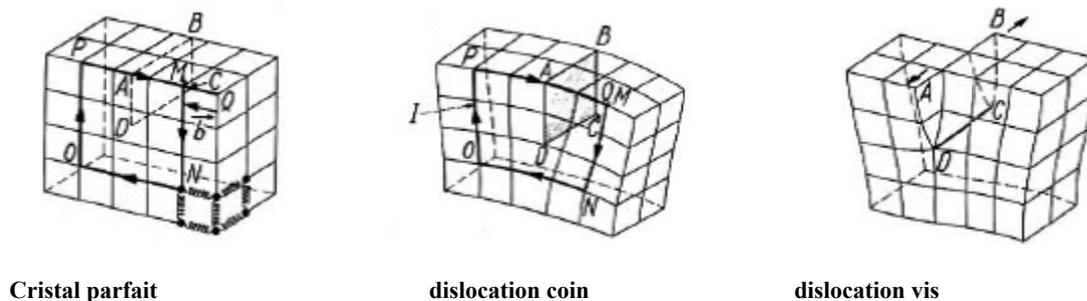


Figure 5: dislocation élémentaire dans un cristal cubique

## 3) Changement de structure au cours d'une déformation plastique :

Des éprouvettes polies au préalable et soumises à la déformation montrent d'abord au microscope des traces de glissement sous forme de lignes droites de même orientation au sein des grains isolés.

Avant la déformation les grains ont une forme arrondie, après la déformation les déplacements suivants les plans de glissement étendent les grains dans le sens des efforts appliqué, en produisant une structure fibreuse [21].

## 4) Ecrouissage :

Lorsque le métal subi une déformation plastique il est dit écroui, sa structure, ses propriétés physiques et mécaniques ont été modifiées, il n'est plus dans un état d'équilibre. Autrement dit, les caractéristiques telle la résistance à la déformation ( $R_e$ , HB) s'améliore, alors que l'aptitude à la déformation plastique (la plasticité : A% et Z%) diminue.

Ce phénomène de consolidation a reçu le nom d'écrouissage. La consolidation du métal est due à l'augmentation du nombre d'imperfection de la structure cristalline (dislocations, lacunes, atomes interstitiels). Ces imperfections rendent plus difficile le déplacement des dislocations.

## II.7. Déformation à chaud :

Entre les températures de déformation et de recristallisation, on peut distinguer la déformation à froid et la déformation à chaud [12].

### II.7.1. Définition :

La déformation à chaud se fait à une température supérieure à celle de recristallisation pour obtenir une structure complètement recristallisée, sa limite inférieure dépend de la vitesse de déformation, on peut la situer vers  $0,4 T_f$  ( $T_f$  température de fusion en Kelvin).

On parle de déformation à chaud, lorsque il se produit une restauration de la structure ou une recristallisation qui s'oppose à l'effet de l'écroutissage par le retour à l'équilibre.

La déformation à chaud est mise en jeu dans la pratique dans deux types de conditions très différentes :

- fortes déformations sous des vitesses élevées au cours de la mise en forme (laminage à chaud, forgeage, filage,...)
- conditions statiques (ou cycliques) de faible contrainte, ou ce qui compte est la résistance mécanique et la durée de vie des pièces (chaudières, moteurs,...) [9].

### II.7.2. Déformation à chaud incomplète :

Lorsque la déformation produit dans un métal une structure partiellement recristallisée, il serait plus correct d'appeler ce traitement déformation à chaud incomplète [8].

La déformation à chaud est étroitement liée à la restauration et la recristallisation.

### II.7.3. Restauration et recristallisation :

Le chauffage d'un métal provoque des processus de restauration et de recristallisation qui rétablissent toutes les propriétés qu'avait le métal avant la déformation.

La restauration et la recristallisation sont deux mécanismes de déconsolidation au sens où ils permettent au métal de perdre plus ou moins une grande quantité de l'énergie fournie [2].

#### 1) Restauration :

##### 1.1) Définition :

On entend par la restauration l'ensemble des phénomènes (surtout annihilation des défauts cristallins) qui contribuent à remettre la microstructure en équilibre, sans germination de nouveaux grains (les joints de grains restent inchangés).

Autrement dit, la déformation provoque des modifications structurales et l'état d'équilibre est perturbé. L'énergie libre augmente, il y a alors tendance à un réarrangement des conditions d'équilibre, c'est la **restauration**.

Un échauffement jusqu'aux températures relativement peu élevées ( $0,2-0,3 T_f$ ) déclenche le processus de restauration qui se traduit par la suppression des microcontraintes sous l'effet de la diminution de la densité des imperfections structurales.

Il n'y a pas création de nouveaux grains mais un réarrangement de ceux-ci en de nouvelles configurations [19] [8].

### 1.2) Les étapes de la restauration : La restauration s'effectue en deux étapes [8]

#### a) la détente :

Elle a lieu aux températures inférieures à  $0,2T_f$ , lorsque la quantité de défauts ponctuels (lacunes) diminue et que les dislocations se redistribuent.

#### b) la polygonisation :

Quand on chauffe un métal déformé, la première modification notable de structure est le réarrangement des dislocations, en système d'énergie plus faible, sans modification du nombre total de dislocations : c'est la polygonisation. C'est une fragmentation de grains en bloc plus petits, légèrement désorientés les uns par rapport aux autres. Ce type de processus a lieu généralement après des déformations peu importantes accompagnées de chauffage à  $0,25$  ou  $0,3 T_f$ .

### 1.3) Mécanisme de la Restauration :

Une partie de cette restauration est provoquée déjà par la suppression des **forces de déformation**, mais la majeure partie est due à des processus **thermiques**. C'est la restauration proprement dite, qui se décompose en six phases

- 1° Diminution des lacunes ou "trous" interstitiels,
  - 2° Compensation des dislocations de signes contraires,
  - 3° Réarrangement des dislocations en ordre plus stable,
  - 4° Absorption des dislocations par les joints inter cristallins,
  - 5° Réduction de la surface des joints des cristaux,
  - 6° Diminution de l'énergie libre de surface par modification de l'orientation ou de la forme.
- [19]

#### 2) Recristallisation :

##### 2.1) Définition :

La recristallisation est caractérisée par le développement de nouveaux grains qui dépend d'une matrice, qui est dans un état structural moins parfait. Après la recristallisation, la densité de dislocations diminue de  $10^{10}$  ou  $10^{12} \text{ disl/cm}^{-2}$  à  $10^6$  ou  $10^8 \text{ disl/cm}^{-2}$  [9].

##### 2.2) Mécanisme de recristallisation :

C'est le mouvement vers "extérieur" des joints cristallins dans un milieu contenant un pourcentage élevé de dislocations, le joint augmente en surface mais l'énergie diminue, car le nouveau cristal formé a moins d'énergie de dislocations par unité de volume que le cristal du milieu déformé.

- Les facteurs de recristallisation sont le temps et la température.
- Les impuretés augmentent la valeur de la température de recristallisation [9].

### 2.3) La recristallisation et le recuit :

Au cours du recuit, des germes apparaissent, ce sont de nouveaux cristaux d'orientation différentes de la matrice ou ils sont nés, ces germes ne sont pas visible au microscope optique qu'à un stade avancé de leur développement. Ils croissent en « mangeant » la matrice écrouie qui les entour, et prennent des formes plus en moins régulières due à l'anisotropie de leurs vitesse de croissance jusqu'à ce qu'ils arrivent au contact les uns des autres, à ce moment, la recristallisation proprement dite est achevée et l' on entre dans le stade appelé « croissance des grains ».

### 2.4) Les étapes de la recristallisation :

La recristallisation d'un métal déformé est généralement considérée en procédant en deux étapes : La germination et la croissance.

a) **germination** : implique la formation d'un petit volume dans les zones qui sont relativement parfaites lié à des grains de forte désorientation, ce volume doit avoir une taille suffisante pour pouvoir se développer.

b) **La croissance** : implique la migration de cette frontière (joint) du grain à forte désorientation.

### 2.5) Types de recristallisation :

#### a) La recristallisation primaire :

L'échauffement du métal écroui ne rétablit pas l'ancien grain, mais produit un grain tout à fait nouveau, dont les dimensions peuvent différer sensiblement du grain initial, donc la formation de nouveaux grains qui remplacent la structure fibreuse du métal déformé.

#### b) La recristallisation cumulative :

Lorsque l'échauffement se poursuit après la recristallisation primaire, certains grains recristallisés se développent aux dépend d'autres grains ; ceci se produit par glissement des joints fortement désorienté de façon que les grains à joints concaves absorbent les grains à joints convexes.

#### c) Recristallisation secondaire :

Si quelques uns parmi les nouveaux grains ont une tendance à la croissance préférentielle.

Les grains à grande vitesse de croissance peuvent être considérés par convention comme centre de germination, ce dernier conduit à la formation en quantité des grains fins, et d'un petit nombre des grains plus gros [8].

## II.7.4. Recristallisation et Restauration au cours de la déformation à chaud :

### Introduction :

Il faut d'abord signaler que la recristallisation dynamique totale n'est atteinte que pour des déformations importantes. Elle ne peut avoir lieu que pour des températures élevées en raison des possibilités de l'outil.

La restauration et la recristallisation statique peuvent alors se produire, si elles sont caractérisées par une certaine cinétique qui dépend de nombreux facteurs, ce sont la température, la déformation la vitesse de déformation, la composition chimique et l'effet d'hérédité d'une passe sur l'autre [12].

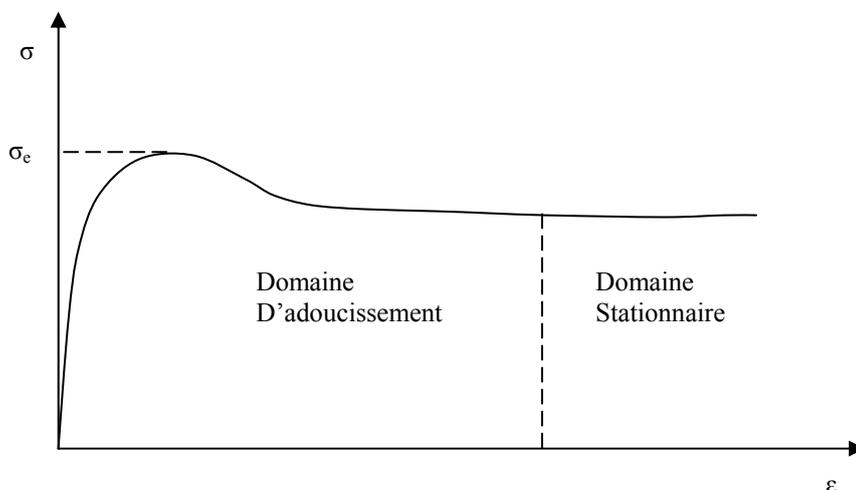
### II.7.4.1. Comportement des métaux lors d'une déformation à chaud :

L'examen des relations entre contrainte d'écoulement et déformation équivalente (lois de comportement unidimensionnelles) obtenues à vitesse de déformation et à température constante, sachant que la consolidation des propriétés mécaniques ne se produit habituellement qu'à des températures relativement élevées, permet de distinguer essentiellement **deux catégories** de métaux :

**1) Métaux à forte énergie défaut d'empilement «  $\gamma_s$  » :** «  $\gamma_s$  » soit quelques  $10^{-1} \text{ J} / \text{m}^2$  (aluminium, fer  $\alpha$ , titane).

La courbe  $\sigma_0.\dot{\epsilon}$  de la figure (6) présente d'abord un domaine d'écrouissage, puis un maximum relativement peu accentué, suivi d'un lent adoucissement conduisant à un domaine stationnaire dans lequel la contrainte d'écoulement reste constante ; celui-ci n'est parfois atteint qu'après une déformation très élevée et ne peut être obtenue qu'au moyen d'essais de torsion.

Un tel comportement est lié au processus de restauration dynamique où un réarrangement important des dislocations est relativement facile, une restauration notable des propriétés mécaniques se produit avant la recristallisation.



**Figure 6 :** courbe contrainte déformation en déformation a chaud.

### 1.1) Restauration dynamique :

Elle se traduit par une évolution microstructurale analogue à la formation des cellules d'écroûissage observées dans la déformation à froid.

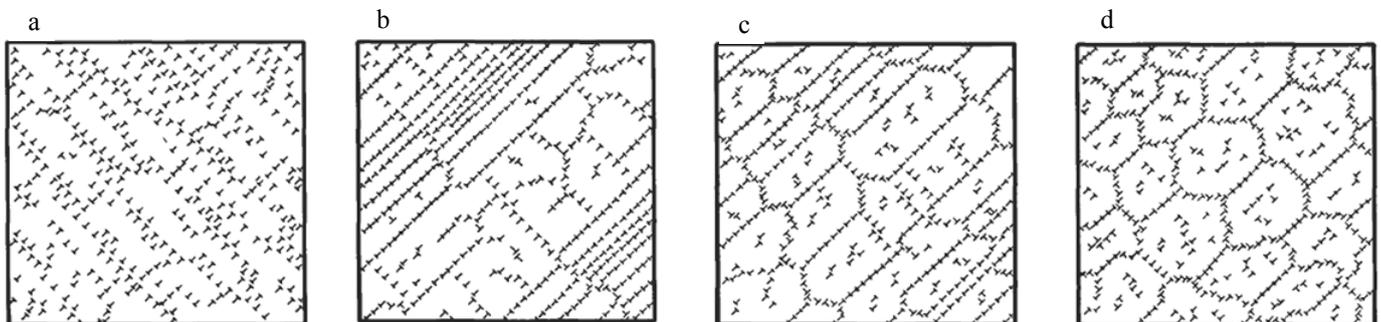
Dans le domaine d'écroûissage de la figure (6), on observe une augmentation de la densité de dislocation ( $10^{14}$  à  $10^{15} \text{ disl/m}^3$ ) qui correspond au maximum de la courbe  $\sigma_0$ - $\dot{\epsilon}$ . Simultanément, les dislocations s'organisent en sous joints, subdivisant ainsi les grains initiaux en sous-grains ; les sous joints apparaissent comme des arrangements plans d'1-2-3 familles de dislocations parallèles.

La désorientation cristallographique moyenne entre les sous-grains est de quelques degrés.

La taille moyenne est de l'ordre de quelques micromètres, elle augmente lorsque la vitesse de déformation diminue et quand la température s'élève.

Au cours de la déformation, les sous-grains se détruisent et se reforment continuellement, c'est la repolygonisation.

Au delà du maximum, alors que la contrainte d'écoulement ne diminue que faiblement, la taille des sous grains reste quasiment stationnaire. Fig7



**Figure 7 :** représentation schématique de la restauration dynamique

Aux déformations très élevées, la désorientation moyenne « $\theta$ » entre les cristaux adjacents s'accroît progressivement. On distingue deux types d'interfaces :

- $< 15^\circ$  : l'interface est du type sous-joint, décrit par un arrangement plan de dislocation.
- $> 15^\circ$  : l'interface est du type joint de grain.

#### Remarque :

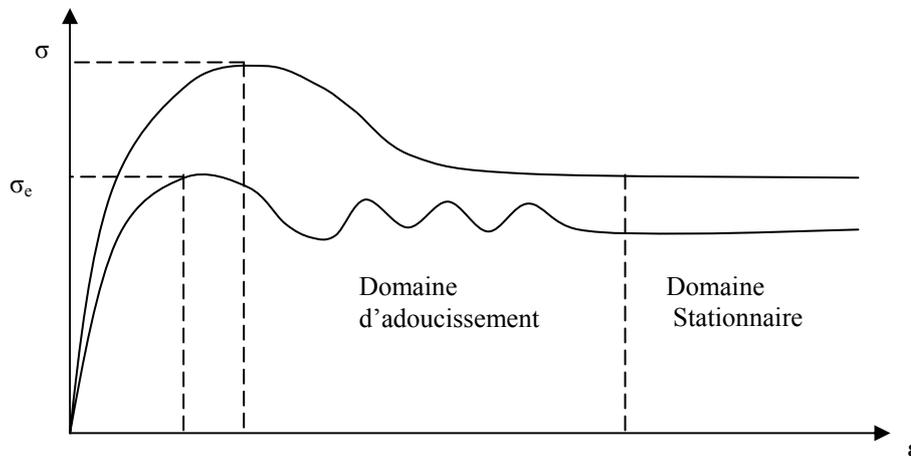
La cinétique de la restauration est très caractéristique et bien différente de celle de la recristallisation : la vitesse de restauration est fonction croissante de la température de recuit, mais fonction continûment décroissante du temps de recuit, sans présenter de période d'incubation [10].

## 2) Les métaux à faible ou moyenne énergie de défaut d'empilement « $\gamma_s$ »

Dans les matériaux à faible énergie de défaut d'empilement, soit quelques  $10^{-1} \text{ J/m}^2$  (cuivre, laitons, nickel, fer  $\gamma$ , aciers austénitiques), la phase d'écrouissage est généralement suivie d'un maximum unique, plus prononcé que dans le cas précédent.

Le régime stationnaire est atteint pour des déformations beaucoup plus faibles. De plus, aux faibles vitesses de déformation et aux températures élevées, le palier stationnaire n'est atteint qu'après une série d'oscillations d'amplitude décroissante. Ce comportement est lié au processus de recristallisation dynamique. Fig8

Les dislocations ne montent pas facilement ils sont peu mobiles, les propriétés mécaniques n'évoluent qu'au cours de la recristallisation dynamique (la restauration dynamique est moins efficace),



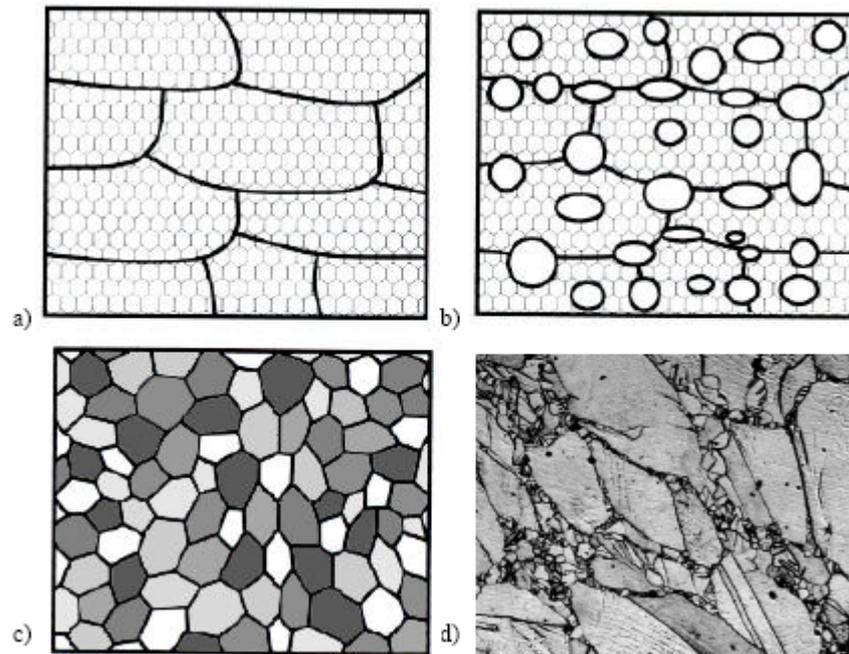
**Figure 8 :** courbe contrainte déformation en déformation a chaud.  
( métal a faible énergie de défaut d'empilement)

### 2.1) Recristallisation dynamique :

A la déformation critique  $\epsilon_m$  correspondant au maximum de la courbe, des germes apparaissent dans le matériau écroui le plus souvent à proximité des joints de grains initiaux (le germe est une région de faible volume ( $\mu\text{m}$ ) contenant une faible densité de dislocation séparé de la matrice environnante par des interfaces à forte désorientation). La suite de la recristallisation dynamique dépend du rapport entre la taille du grain initial  $D_0$  du matériau et la taille moyenne  $D_s$ . On distingue donc deux cas:

#### a) Processus conduisant à un affinement des grains (si $D_0 > 2D_s$ )

La recristallisation dynamique se produit « en collier » à partir des joints des gains initiaux déformés. Fig9



**Figure 9 :** Recrystallisation dynamique : affinement des grains

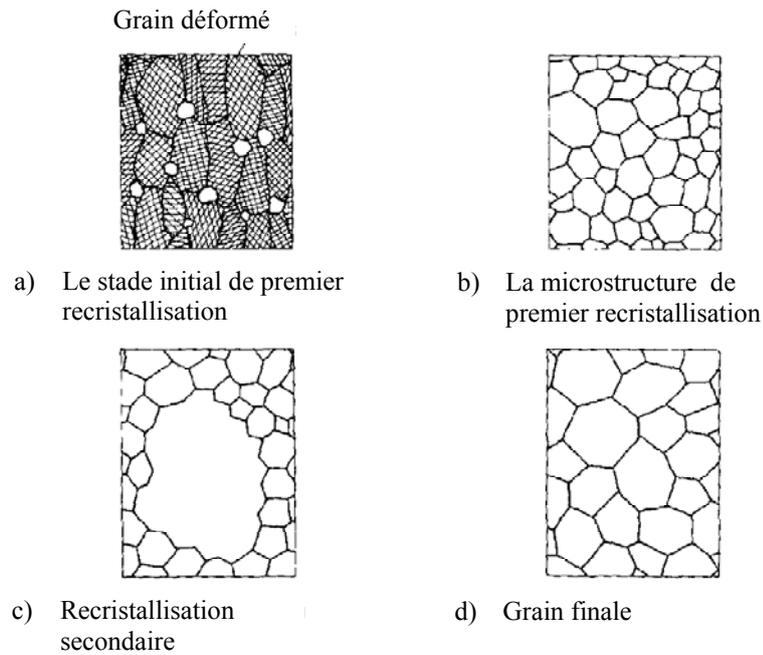
- a) structure déformée restaurée et non recristallisée;  
 b) germination de nouveaux grains;  
 c) grains à des niveaux différents d'écroutissage;  
 d) exemple d'une microstructure d'un acier austénitique présentant des grains écrouis et recristallisés

Les nouveaux grains recristallisés envahissent progressivement les anciens à partir de leur périphérie, ce qui se manifeste par une décroissance de la contrainte d'écoulement. Cependant, les grains recristallisés se déforment sous l'action de la sollicitation imposée, de telle sorte que lorsque les grains initiaux ont entièrement disparu, l'état d'écroutissage du matériau est fortement hétérogène.

La recrystallisation dynamique va donc se poursuivre de manière non synchronisée, ce qui se traduit par l'apparition d'une contrainte d'écoulement stationnaire après un maximum unique de la courbe  $\sigma_0 - s$ .

**b) Processus conduisant à un grossissement du grain ( $D_0 < 2D_s$ ) :**

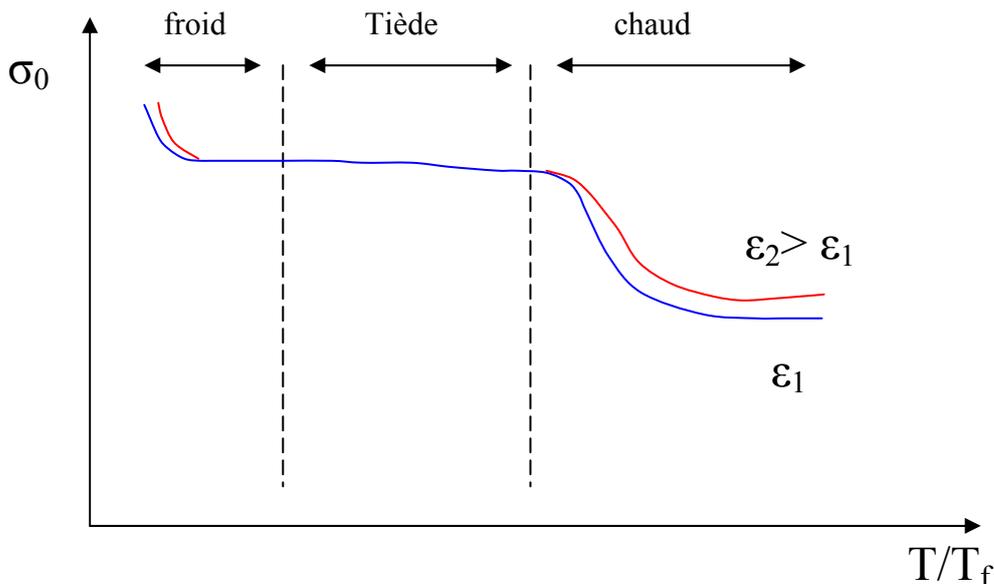
Une première vague de recrystallisation qui se traduit par une première décroissance de la courbe contrainte déformation ne permet pas aux grains recristallisés d'atteindre la taille  $D_s$ , l'ensemble du matériau s'écroute à nouveau de manière relativement homogène jusqu'à déclenchement d'une deuxième décroissance de la courbe  $\sigma_0 - \dot{\epsilon}$  et ainsi de suite (d'une manière synchronisée) d'où des oscillations, le développement progressif d'hétérogénéité conduit à l'amortissement de ces oscillations puis à l'apparition du domaine stationnaire, Fig10



**Figure 10 :** *modification structurel au cour de la déformation a chaud de la recristallisation dynamique. Un grossissement du grains*

#### II.7.4.2. Limite élastique lors de la déformation à chaud :

La figure (11) montre les variations de la limites élastique  $\sigma_0$  d'un métal recuit avec les températures et la vitesse de déformation au cours de la déformation à chaud (en bleu). Aux hautes températures, la décroissance de  $\sigma_e$  (lorsque la température augmente) devient plus rapide, c'est un domaine thermiquement activé, qui correspond à la déformation à chaud ( $T/T_f > 0.5$ ). [12 ]



**Figure 11 :** *variation de la limite d'élasticité macroscopique avec la température pour deux vitesse de déformation*

**Conclusion**

La déformation à chaud n'est pas caractérisée seulement par une modification des paramètres de la déformation comme l'énergie de défaut d'empilement et les modules élastiques, mais aussi par une restauration et parfois par une recristallisation dynamique simultanées avec la déformation plastique.

Les phénomènes d'écrouissage, de restauration, de recristallisation et de croissance du grain sont présentés successivement dans ce chapitre. Ils sont intimement associés dans la pratique industrielle [2].

Les opérations de mise en forme à chaud demandent moins d'effort et permettent d'agir sur l'architecture du matériau; elles sont alors qualifiées de traitements thermomécaniques.

# Chapitre III :

# Le durcissement

### III.1 .Introduction :

Bien que la théorie des dislocations ait été proposée pour interpréter la déformation plastique des cristaux il y a plus de trente ans, il n'existe pas actuellement de théorie universellement acceptée qui rende compte des principaux aspects de cette déformation. Ce qui semble bien établi, c'est le calcul de la contrainte qu'il faut fournir pour propager une dislocation dans un réseau de dislocations donné et la compréhension de l'organisation de ce réseau au fur et à mesure que la déformation augmente [7].

On sait que pour durcir le métal il faut provoquer une augmentation de la limite d'élasticité, c'est-à-dire, trouver les moyens de gêner le déplacement des dislocations lors de la déformation plastique ; pour cela on introduit ou on crée dans le réseau cristallin des obstacles de différentes sortes qui freinent le déplacement des dislocations, se sont

- d'autres dislocation : durcissement par écrouissage.
- des atomes étrangers en insertion ou en substitution: durcissement par solution solide.
- des joints de grains : durcissent par affinement du grain [1].
- des précipités de deuxième phase : durcissement par précipitation.

D'autre part il est possible d'agir principalement sur quatre facteurs pour modifier les caractéristiques mécaniques des aciers :

- le durcissement de solution solide de la ferrite.
- la teneur en perlite.
- la taille de grain.
- le durcissement par précipitation [7].

Ces divers modes de durcissement n'ont pas la même efficacité du point de vue de l'augmentation de la limite d'élasticité, ni les même conséquences de température de transition ductile/fragile [1].

Le tableau (2) montre pour les différents processus de durcissement la variation de la température de transition correspondant à une augmentation de la limite d'élasticité de 100 MPa.

Mode de durcissement	$\Delta T$ transition
Affinement es grains	-60°C
Manganèse en solution solide	-30°C
Silicium en solution solide	+45°C
Perlite	+15°C
Précipitation durcissant	+25°C
Dislocation	+40°C

**Tableau 2 :** *la variation de la température de transition selon le mode de durcissement.*

La réduction de la taille du grain ferritique est réalisée par l'affinement de la taille du grain austénitique.

**Remarque :**

On notera que c'est le seul paramètre ayant un aspect bénéfique à la fois sur les caractéristiques de traction et de résilience, autrement dit, la finesse de la structure reste un paramètre essentiel en ce qui concerne la résistance à la rupture fragile. On se basera dans notre étude sur ce paramètre important. [12].

**III.2. Intérêt de l'affinement du grain : [9]**

La taille du grain après recuit joue un rôle dans les propriétés des métaux, notamment la dureté et la ductilité qui sont les propriétés les plus reliées et contrôlées par la structure et la microstructure du métal [17], comme on le voit ci-dessous:

- Les échantillons à grains fins ont ainsi une limite élastique plus élevée s'écroutissent plus fortement,
- Ils présentent une rupture plus ductile dans les aciers, la température de transition peut être nettement abaissée.
- Ils ont une moins bonne résistance au fluage.

La taille du grain doit donc être contrôlée avec soin dans la pratique industrielle, la taille recherchée dépend essentiellement du but poursuivi, et des facteurs suivants :

- Le degré de déformation préalable.
- La composition chimique de métal.
- La dimension du grain de départ.
- La présence de l'inclusion insoluble, etc.
- La grosseur du grain diminue pour une même température de recuit, si le taux de déformation croît.

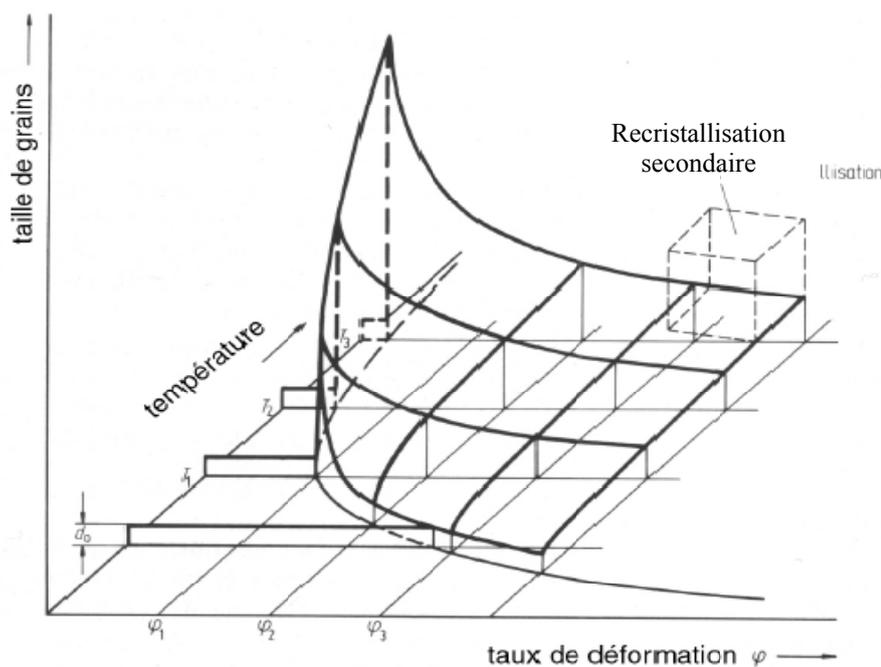
**Exemple :**

Pour les aciers ferritiques, la taille du grain dépend des conditions de germination et de croissance de la ferrite à partir de l'austénite, c'est-à-dire essentiellement de la vitesse de refroidissement d'une part, de la taille du grain austénitique antérieur d'autre part. Comme les grains ferritiques germent essentiellement sur les joints de l'austénite il est possible d'éviter la recristallisation de l'austénite jusqu'à des températures proches de la température de transformation austénite / ferrite.

Dans la phase austénitique fortement perturbé les sites de germination de la ferrite sont sans doute plus nombreux et la taille du grain ferritique qui en résulte est plus faible.

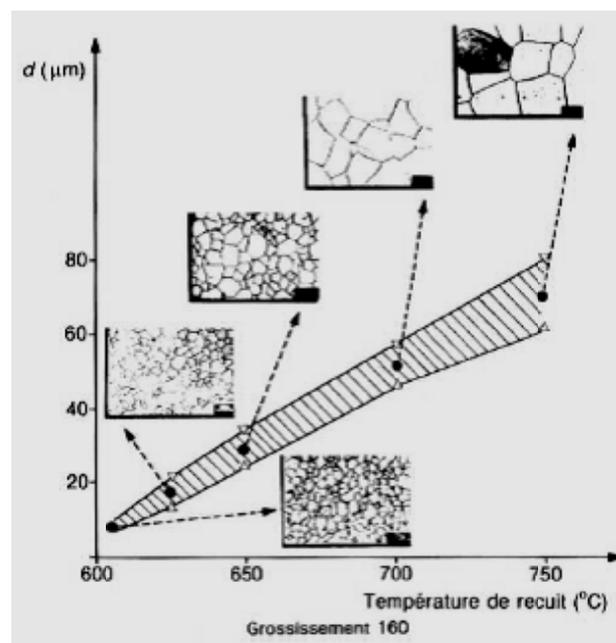
- l'augmentation de la durée et de la température de recuit fait accroître la dimension du grain ferritique.
- le grain recristallisé est d'autant moins gros que le degré de déformation est plus grand [7].
- la température et la durée du recuit de recristallisation.
- la recristallisation ne débute pour une même température de recuit qu'à partir d'un taux critique de déformation.

Le diagramme de recristallisation montre que le grain de recristallisation peut être gros pour des taux d'écroutissage faible il faut éviter lors d'un formage à faible déformation pour procéder à une recristallisation [6]. Figure (12)



**Figure 12 :** influence du taux de déformation et de la température de recuit sur la taille du grain

D'après la figure(13) : on observe une hétérogénéité de la distribution de la taille des grains ferritique de dimension variant entre 1, 4 et 5 micromètre selon la variation du temps de recuit[10].



**Figure 13:** d'évolution de la taille des grains recristallisés en fonction de la température de recuit.

### III.3. Méthodes pour affiner le grain :

Pour contrôler et affiner la taille du grain ferritique, on peut songer à utiliser diverses méthodes en agissant sur la taille du grain austénitique lui-même.

On sait en effet que pour la transformation austénite / ferrite + perlite, la taille du grain de la ferrite sera notamment d'autant plus faible que la taille du grain austénitique est plus petite.

Deux procédés principaux sont utilisés à cet effet :

- L'addition d'éléments dispersifs, comme le niobium et le vanadium, même en faible teneur, retardent considérablement la recristallisation de l'austénite.
- Une diminution encore plus importante de la taille du grain peut être obtenue à l'aide d'un traitement thermomécanique : le laminage contrôlé appliqué à des aciers contenant ou non ces éléments.

La consolidation apportée par la diminution de la taille du grain est l'augmentation de la densité de dislocations[7].

### III.4. Relation entre la taille de grain et l'élasticité :

La limite élastique macroscopique est égale à la valeur de la contrainte à partir de laquelle la déformation se produit dans tous les grains : elle se propage à partir des grains déformés au cours du stade de la microdéformation aux autres à travers les joints. Expérimentalement, la limite élastique macroscopique augmente d'une façon systématique lorsque la taille de grain diminue, du moins si la taille de grain est supérieure à une vingtaine de nanomètre. Figure (13)

Cette variation obéit à la relation suivante :

Valeur de la limite élastique et celle de la taille des grains

$$\sigma = \sigma_0 + k d^{-1/2}$$

Loi de HALL et PECH

$\sigma$  : Contrainte (force de frottement).

$\sigma_0$  : Limite élastique.

$k$  : constante.

$d$  : diamètre moyen du grain [6].

Chapitre IV :  
Traitement  
thermomécanique

**Introduction :**

En raison des vastes possibilités que les Traitements Thermomécaniques offrent pour l'amélioration des propriétés de ces aciers, de nombreuses études et recherches ont été réalisées.

Il y a une trentaine d'années environ, on a pensé qu'il pouvait être possible, dans certains cas, de tirer partie de l'effet conjugué d'une déformation plastique et d'un traitement thermique, pour améliorer les propriétés du métal, c'est à dire de profiter du procédé de formage à haute température pour obtenir à la fois la forme désirée et les caractéristique mécaniques aussi élevées que possible, d'où le nom de traitement thermomécanique à haute température.

Les études sur les traitements thermomécaniques à haute température (T.T.M.H.T) ont commencé en URSS et aux Etats unis il y a plusieurs dizaines d'années, initialement et pendant une longue période, elles ont porté essentiellement sur des aciers à très haute caractéristique.

En effectuant leur formage à chaud, pratiqué à l'origine sur des pièces en aciers de façon limitée par une déformation superficielle durant leur traitement isotherme de trempe martensitique, le traitement thermomécanique s'étend maintenant à une déformation de toute la masse de la pièce par forgeage, laminage, étirage, tréfilage... etc.

A la fin des années cinquante, des essais de laminage s'effectuant avec le contrôle de la température de fin de laminage, d'ou le nom de « Laminage contrôlée » [4].

Les travaux de recherche effectués sur ces procédés ont permis de bien comprendre les phénomènes qui interviennent au cours d'une opération de laminage à chaud et de montrer qu'il était possible, en conduisant le laminage dans des conditions de température et de déformation bien définies et programmées, d'obtenir à la fois les dimensions requises et des niveaux élevés de caractéristiques mécaniques.

En particulier, les résultats obtenus grâce à la méthode originale de simulation du laminage par torsion développée à l'Institut de recherches de la sidérurgie française (Irsid), et les modèles de laminage qui ont été mis au point, ont permis de définir des schémas de laminage contrôlé très performants, par exemple le procédé *Multiphi* , qui a fait l'objet d'un Brevet (1973).

Ce procédé a connu rapidement un développement industriel important et, à l'heure actuelle, après diverses améliorations (abaissement de la température de réchauffage des brames avant laminage, abaissement des températures de fin de laminage, refroidissement accéléré après laminage...).

Donc les traitements thermomécaniques à hautes températures, notamment le laminage contrôlé, allaient permettre de développer de nouvelles familles d'aciers - contenant des éléments de microalliage : niobium, vanadium ou titane- à caractéristiques très élevées, mais néanmoins facilement soudables [5].

### IV.1. Définitions sur le Traitement Thermomécanique :

« Traitement thermique durant lesquels le métal subit au refroidissement une déformation mécanique, cette déformation pouvant être située avant, pendant ou après la transformation allotropique du métal » [14][15].

### IV.2. Etapes générales du traitement thermomécanique :

D'une manière générale tout traitement thermomécanique peut être décomposé en 4 ou 5 grandes étapes :

- La matière à mettre en forme (billettes, tôles...) est tout d'abord réchauffé à une température fixée pendant un temps imposé par les impératifs de la production ou les buts métallurgique visés.
- Elle est ensuite transférée du four de réchauffage à l'outil de mise en forme (laminoir pilon de la forge...).
- Pendant ce transfert, le refroidissement peut être naturel ou accéléré, selon la microstructure sur laquelle la déformation doit être imposée pour conduire aux résultats escomptés.

**Remarque** : Les opérations de mise en forme sont alors réalisées dans des conditions de température, de vitesses de sévérités du taux de déformation déterminée par les buts poursuivis.

Après, la pièce finie est soumise à un refroidissement apte à lui conférer la microstructure souhaitée [10].

### IV.3. But du Traitement Thermomécanique :

Le but de ce traitement est d'obtenir sans recours à des éléments d'alliage supplémentaire des propriétés mécaniques améliorées (résistance à la traction et à la rupture fragile) notamment avec la conservation de la ductilité voir pour certains types de traitements, une augmentation de celle-ci, cette amélioration des propriétés mécaniques et atteinte par une combinaison judicieuse des conditions de température, de temps et de déformation interférant sur les mécanismes de précipitation, consolidation, recristallisation et transformation allotropique [14].

Il y' a donc trois étapes essentielles: l'austénitisation, l'écrouissage de l'austénite et le traitement thermique.

#### 1) L'austénitisation :

Lors de la traversée de la transformation, chaque grain ( $\alpha$ ) peut donner naissance à plusieurs grains ( $\gamma$ ), il en résulte que lorsqu'on atteint  $AC_3$  ou  $AC_m$  (fin de la transformation à l'échauffement), les grains de solution ( $\gamma$ ) sont plus petits et plus nombreux que les grains ( $\alpha$ ) précédents.

Cette austénite a des propriétés particulières, c'est une solution solide de carbone dans le fer ( $\gamma$ ) de structure cubique à faces centrées, elle n'est pas magnétique mais ductile et résistante à la corrosion, elle a un coefficient de dilatation plus élevé que ( $\alpha$ ).

Sa structure réticulaire et plus compacte par sa forme et plus lâche par l'agrandissement de la dimension de sa maille, le passage de l'état  $\alpha$  à l'état  $\gamma$  a lieu avec une contraction nette qui permet d'ailleurs avec un dilatomètre d'apprécier les températures de début et de fin de réaction.

**Remarque :** La température  $AC_1$  varie de façon caractéristique pour chaque addition selon la formule suivante :  $AC_1 = 720 + 28 \text{ Si} + 15 \text{ Cr} - 5 \text{ Mn} - 10 \text{ Ni} - 3 \text{ V}$ . [3].

L'examen métallographique montre qu'une solution solide métallique, ce qui est le cas de l'austénite, est constituée par une juxtaposition de grains ayant chacun une orientation cristalline déterminée. Cette caractéristique s'explique par les processus de germination et de croissance, le développement d'un cristal à partir d'un germe étant limité par celui des cristaux voisins.

Entre ces "grains", une zone de transition désorientée constitue le "joint de grain". La "grosseur de grain", mesurée par le nombre de cristaux dans un certain volume ou, plus simplement, par le nombre de cristaux rencontrés dans une coupe de section déterminée, joue un rôle important [5].

## 2) Procédé d'écroissage au cours de l'austénitisation :

Une déformation écroissant l'austénite à température subcritique provoque une déformation de son réseau cristallin, qui si la température est suffisante, peut être suivie de la recristallisation [3].

L'écroissage de l'austénite modifie sensiblement les conditions de germination et de croissance de la nouvelle phase (ferrite) [12].

## 3) Traitement thermique après la déformation :

Le métal déformé doit subir un traitement thermique apte de lui conférer la microstructure souhaitée soit à l'air, au four, ou bien à l'eau.

Lorsqu'on porte un métal à sa température de recristallisation primaire, il y a une germination de nouveaux grains suivi d'une croissance jusqu'à contact mutuel [10].

### Remarque :

Dans certaines conditions de traitement thermique qui auraient pu donner des transformations autres que diffusionnelle pure, l'écroissage du grain favorise la transformation ferritique [12].

## IV.4. Les types du Traitement Thermomécanique :

Les nombreux T.T.M existants peuvent être classés en trois grands groupes selon que la déformation qu'ils font intervenir est imposée au métal **avant/ pendant/ après** la transformation allotropique, ces trois grandes classes ainsi définies peuvent être subdivisées pour tenir compte de l'état structural de la phase métallique subissant la déformation, le tableau (3) illustre cette classification [12].

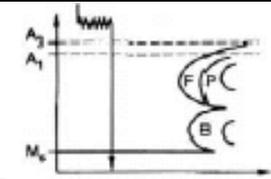
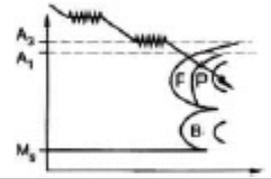
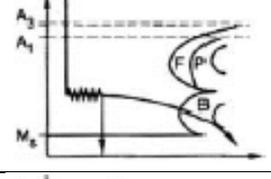
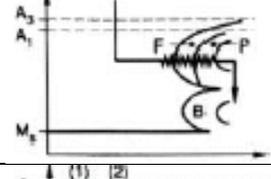
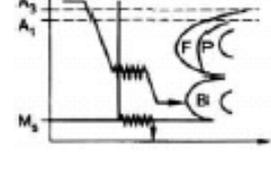
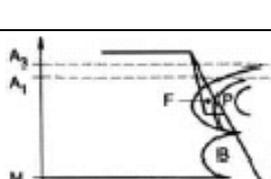
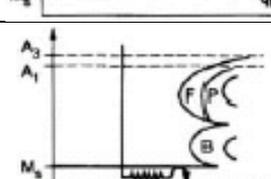
Moment de la déformation par rapport à la transformation de l'austénite	Température de déformation	Produit sur lequel s'effectue la déformation	Dénomination	Aciers concernés	Schéma du traitement
Avant	au-dessus de A3	Austénite stable	TTMHT	Tous	
			Laminage contrôlé	Aciers de construction métallique	
	au-dessous de A3	Austénite métastable	TTMBT Austénito-formage	Aciers faiblement ou fortement alliés	
Pendant	entre A1 et Ms	Austénite et ferrite-perlite ou perlite	Isoformage	Aciers à transformation perlitique	
	proche de Ms	Austénite et martensite	Marformage : — traitement des aciers TRIP — zerolling	Aciers austénitiques et semi-austénitiques	
Après	au-dessus de Ms	Ferrite-perlite	Perlitoformage	Aciers à transformation perlitique	
	au-dessous de Ms	Martensite	Marstraining	Aciers à structure martensitique	

Tableau 3 : Différentes classes de traitements thermomécaniques.

#### IV.4.1. Traitements Thermomécaniques avant un changement de phase :

Austénitisation à une température supérieure au point de transformation de l'acier avec déformation à cette température, puis trempe et revenu [14].

On peut classer ces traitements en distinguant successivement

- Laminage contrôlé ;
- Les traitements thermomécaniques à haute température ;
- Les traitements thermomécaniques à basse température ; [10]

##### 1. Laminage contrôlé :

###### 1.1. Introduction :

Le laminage contrôlé a pris une grande extension industrielle et a connu rapidement un développement important, et divers améliorations (abaissement de la température de réchauffage des brames avant le laminage).

Les progrès réalisés dans la maîtrise du procédé ont permis de répondre à des spécifications de plus en plus exigeantes quant aux niveaux des caractéristiques demandées.

La mise en forme d'un produit obtenue par un laminage contrôlé doit permettre d'obtenir à la fois les caractéristiques mécaniques et géométriques souhaités, c'est à dire que ce type de laminage est alors un véritable traitement thermomécanique [12].

###### 1.2. Définition :

C'est un type de laminage effectué selon un programme précis de température et de déformation [12].

Le laminage contrôlé comporte une déformation de l'austénite stable suivie d'un refroidissement naturel à l'air [14].

Dans le laminage contrôlé, on impose un cycle précis de températures de déformation et d'écroissage lors des dernières passes, la dernière passe de laminage étant toujours effectuée au voisinage du point de transformation (au dessus ou au-dessous) [10].

###### 1.3. Modes de laminage contrôlé :

Il existe trois modes de laminage contrôlé [8].

###### 1) Laminage contrôlé des plaques sur quarto :

Il remplace progressivement les traitements thermiques de normalisation, il permet de réaliser des nuances de grade et plus forte épaisseur, il est complété par le refroidissement accéléré.

## 2) Laminage contrôlé sur train à bande :

Il est moins sévère que les quarts en raison de la rigidité du train continu qui permet la fabrication de tôles à chaud à haute résistance ; l'existence du refroidissement accéléré permet de compenser les limites thermomécanique de l'érouissage de ce type de laminoir.

## 3) Laminage Normalisant :

Un procédé de laminage contrôlé dans lequel les déformations finales dans l'austénite sont effectuées à un niveau de température conduisant à des structures équivalentes à celle obtenues après normalisation.

Il permet d'obtenir les valeurs spécifiées des caractéristiques mécaniques, et de garantir qu'elles sont maintenues même après un traitement de normalisation complémentaire ou d'autres traitements thermiques après formage ou soudage.

### 1.4. Quelques applications des cycles de laminage contrôlé :

Dans la pratique, il faut adapter le schéma de laminage à l'outil dont on dispose, et savoir a priori quelle est la structure souhaitée à la fin du laminage ou au début de transformation [12].

Quelques exemples sur les cycles de laminage contrôlé adoptés dans divers études :

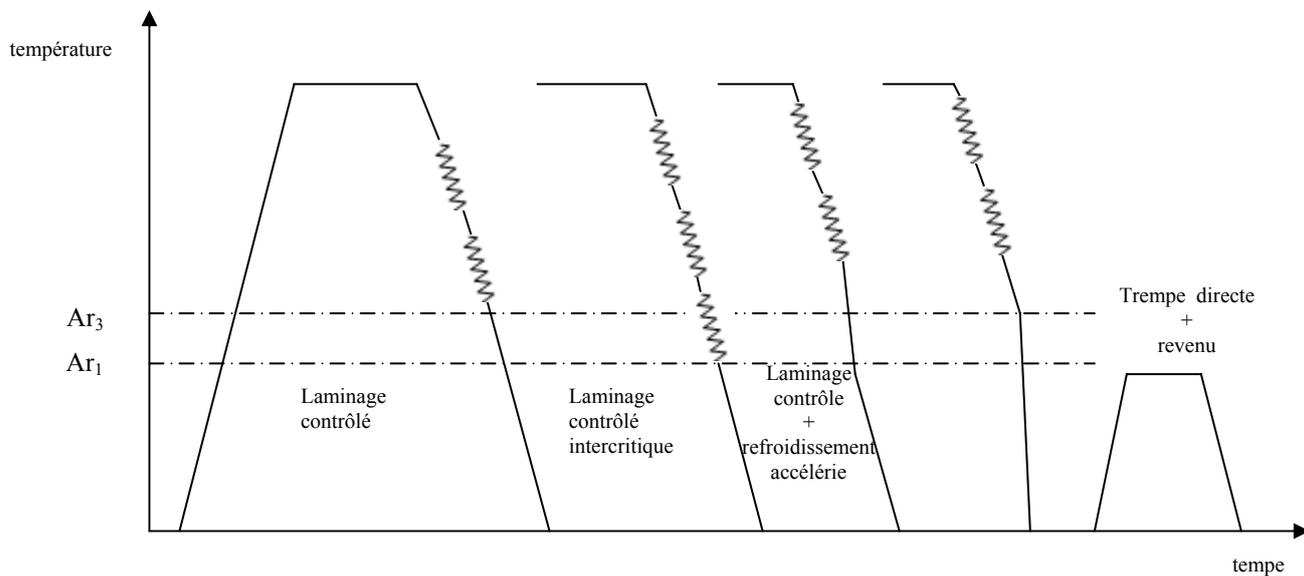
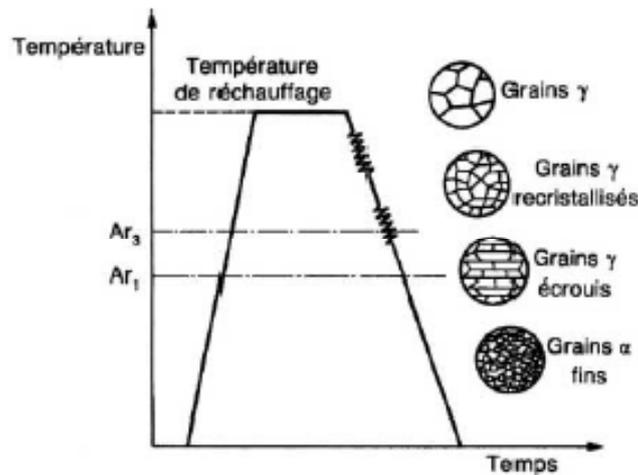


Figure (14) : laminage contrôlé.



$Ar_1$  : température à laquelle l'austénite s'achève de se transformer en ferrite et cémentite au cours du refroidissement.

$Ar_3$  : température à laquelle la ferrite commence à se former au cours du Refroidissement.

**Figure (15) :** type de laminage contrôle pour l'affinement d grain.

### 1.5. Microstructure après le laminage contrôlé :

Après la dernière passe de laminage, le grain peut être fin ou grossier, écroui ou recristallisé, Homogène ou non.

Il y 'aura un affinement du grain considérable, ceci s'explique par la structure austénitique existante au début de la transformation qui est fine et recristallisée pour des fortes températures de fin de laminage, et fine et écroui pour les basses températures de fin de laminage.

Comme le grain austénitique de départ est très fin, il est possible d'obtenir par la combinaison Refroidissement à Basse Température laminage contrôlé, un grain ferritique extrêmement fin, pouvant aller jusqu'à 1 ou 20 Microns, et du même coup des niveaux de caractéristiques très élevées.

### 1.6. Les étapes de laminage contrôlé [12] :

La structure idéale semble être fine et homogène, la maîtrise de l'écrouissage et la recristallisation permet de l'atteindre comme le suggère la figure (16) ou l'on constate que l'évolution se fait en trois grandes étapes:

- **Première étape:** un affinement du grain par recristallisation statique successive suivie de grossissement de grain.
- **Deuxième étape:** si elle est bien conduite, elle va conduire à l'affinement souhaité du grain, sinon on peut obtenir une recristallisation trop grossière, suivie de grossissement secondaire (II b), ou une recristallisation statique incomplète (II a) qui est les deux causes principales d'hétérogénéité.
- **Troisième étape:** est une étape d'écrouissages additive qui, s'il permet de modifier la forme des grains et l'énergie emmagasinée, ne permettent plus de faire évoluer le volume moyen (ou la taille moyenne) du grain.

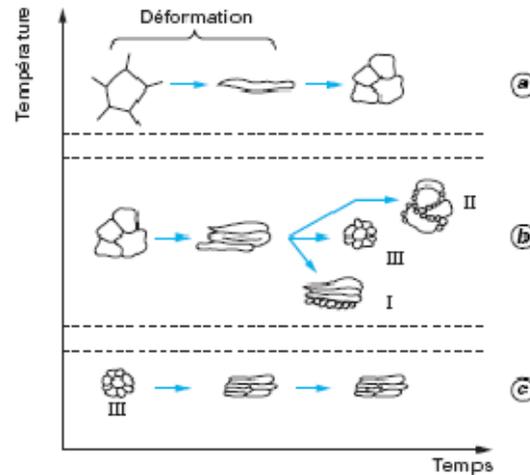


Figure 16 : les étapes de la microstructure (laminage contrôlé)

### 1.7. Laminage contrôlé et les aciers de construction soudable : [4]

Interprétation : à l'origine les grains austénitiques sont de forme polygonale, puis s'aplatissent et s'allongent dans la partie croissante de la courbe, après une recristallisation dynamique apparaît au joints de grains jusqu'à un état stable avec un grain plus au moins équiaxe.

Les études de base qui ont été effectuées grâce à la méthode de simulation par torsion ont permis de comprendre les différentes phases qui se produisent au cours de la déformation à chaud : écrouissage, restauration, recristallisation dynamique et statique et précipitation induite.

Après les phases de restauration et de recristallisation dynamique qui se produisent dans la partie croissante de la courbe, un palier de contrainte d'une structure composée de nouveau grain équiaxe plus au moins écrouis dont la taille [qui est d'autant plus faible que la température est moins élevée] reste constante quelque soit les phénomènes de précipitation qui peuvent se produire à des températures inférieures du domaine austénitique (cas des aciers qui contiennent des éléments d'alliages) dès que la limite de solubilité est atteinte.

### 1.8. Laminage contrôlé et les aciers au C-Mn :

La Métallurgie de laminage des aciers C-Mn et C-Mn micro alliés vise simplement à l'obtention d'une structure ferritique fine et homogène, sachant que les propriétés mécaniques des structures ferrito-perlitiques sont directement reliées à la taille moyenne du grain ferritique [5].

Le laminage contrôlé des aciers au carbone -Manganèse est un cas particulier où la structure visée est une structure ferrito-perlitique [12].

### 1.9. Laminage contrôlé et les aciers à structures bainitiques et martensitiques :

Les propriétés des structures martensitiques ou bainitiques que l'on utilise en général à l'état revenu ne s'expriment pas en fonction d'un paramètre aussi simple que la taille moyenne du grain.

Là encore, l'expérience montre que ce sont les grains fins, homogènes et écrouis qui, par transformation sans diffusion cette fois, conduisent à la structure martensitique, présentant les meilleurs propriétés après revenu.

On peut mettre en évidence des différences entre la martensite classique issue d'un traitement thermique et celle issue d'un traitement thermomécanique (austénite mère écrouie), les différences détectées se situent à l'échelle du réseau cristallin [4].

### 1.10. Le Laminage contrôlé et les aciers à haute limite élastique :

Pour les aciers qui ont une teneur en carbone limitée afin de préserver leur soudabilité et leur ténacité sous impact, on recourt à un laminage contrôlé suivi d'un refroidissement contrôlé.

Les aciers HLE (haute limite élastique) sont constitués d'une matrice ferritique polygonale à grains fins, durcie par précipitation, obtenue à partir d'une austénite conditionnée par le laminage, selon les étapes suivantes :

**1<sup>er</sup> étape :** l'obtention d'une austénite à haut pouvoir de germination au niveau du point  $A_3$ , début de formation de la ferrite, les sites de germination sont localisés aux interfaces de la structure.

**2<sup>ème</sup> étape :** s'effectue à travers deux méthodes

1-recristallisation contrôlée par le laminage à chaud.

2-Laminage conventionnel contrôlé [6].

### Conclusion :

En contrôlant le taux de déformation et la durée des maintiens entre les diverses déformations (passes), il est possible d'éviter la recristallisation de l'austénite jusqu'à des températures proches de la température de transformation ;

Austénite → ferrite.

Tout ce qui précède montre que le laminage contrôlé ne doit plus être simplement appréhendé comme un simple moyen de mise en forme à chaud, mais également comme un moyen métallurgique d'amélioration des matériaux métalliques à chaque fois que ceux-ci doivent être utilisés à l'état brut de laminage à chaud.

## 2. Traitement Thermomécanique à haute température (TTMHT) :

Dans le Traitement Thermomécanique à haute température (la température comprise entre 800 et 1200 °C), conduisant après transformation et écrouissage à une phase austénitique stable.

Ce traitement consiste à déformer l'austénite stable, afin d'y introduire un grand nombre de défauts cristallins, et freiner ainsi la recristallisation.

Le TTMHT se distingue du laminage contrôlé par le refroidissement final accéléré, permettant de conférer à l'acier une structure martensitique ou bainitique, auquel on ajoute un traitement de revenu à basse température [10][14].

## 3. Traitement Thermomécanique à basse température TTMBT (L'austénitoformage) :

### 3.1. Définition :

C'est une nouvelle méthode de traitement de l'acier, ce traitement conduit après transformation et écrouissage à une phase austénitique métastable.

C'est le Traitement Thermomécanique le plus étudié appelé ausforming dans la littérature anglo-saxonne, pour lequel la déformation est effectuée dans le domaine de l'austénite métastable (un chauffage d'austénitisation puis une déformation à basse température vers 400 à 600°C T° inférieure à  $A_{c3}$ ) avec transformation partielle, suivi d'une trempe avant toute recristallisation ; il est généralement complété d'un revenu [6].

Le procédé a donc été proposé pour produire des fils d'acier durs et alliés ayant des limites élastiques inhabituelles, en même temps qu'un allongement de rupture important [3].

Ce traitement thermomécanique est également applicable aux aciers TRIP (transformation induced by plasticity), dont la déformation finale à froid induit une transformation martensitique conférant au matériau une très bonne dureté lors de son utilisation [14][10].

Dans l'austénitoformage la structure de l'acier trempé se forme dans les conditions d'une densité accrue de dislocations due à l'écrouissage [2].

### 3.2. Types :

On distingue deux modes :

- a) **Austénitoformage à haute température** : l'acier est déformé à une température au dessus de  $A_3$ , le degré de déformation est 20 à 30% suivi immédiatement d'une trempe pour freiner le processus de recristallisation.
- b) **Austénitoformage à basse température** : l'acier est déformé dans la zone de température correspond au domaine de l'austénite surfusionnée relativement stable (400 à 600° C).

La température de déformation est supérieure au point  $M_s$  et inférieure à la température de recristallisation, le degré de déformation varie entre 75 à 95 % suivis d'une trempe.

**Remarque :** dans les deux cas la trempe doit être suivie directement d'un revenu à basse température de 100 à 300°C.

### Comparaison entre l'austénitiformage à HT et l'austénitiformage à BT

La meilleure consolidation ( $R = 260$  à  $300 \text{Kg/mm}^2$ ) s'obtient en déformant l'austénite surfusionnée avec l'austénitiformage à basse température, car il se produit une recristallisation partielle à l'austénitiformage haute température.

l'austénitiformage à haute température permet d'obtenir une grande plasticité et une meilleure résistance [10].

### 3.3. L'influence de la composition chimique du traitement d'austénitiformage :

L'austénitiformage n'est applicable qu'aux aciers dont le diagramme TTT (Temps-Température-transformation) est du type de la figure (17). Il répond aux conditions suivantes :

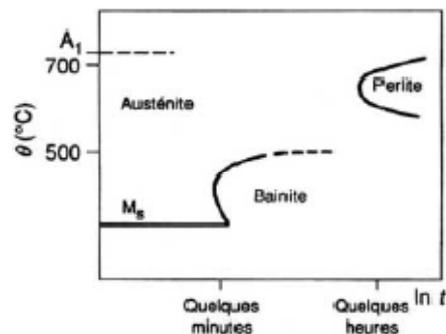


Figure17 : diagramme TTT.

- La courbe de début de transformation perlitiques est repoussée vers la droite du diagramme, la courbe représentant la loi de refroidissement du métal, de la température d'austénitisation à la température de déformation, ne doit pas traverser le domaine perlitiques afin d'éviter la transformation de l'austénite en perlite.
- la courbe de début de transformation bainitiques doit également être repoussée vers la droite du diagramme.
- Le domaine austénitique métastable doit être assez large pour que les variations de température au cours de la déformation (de l'ordre de 50°C en laminage) ne provoquent pas un changement de phase.
- Le domaine austénitique métastable doit s'étendre vers des temps assez longs pour permettre la mise en température et la déformation du métal.

Ce traitement est, par conséquent, limité aux aciers suffisamment alliés.

Une modification de la composition chimique influe sur la microstructure, elle se traduit par un déplacement vers la droite et / ou vers le bas de la courbe de transformation en refroidissement continu, comme par exemple une addition de Nickel ou de Manganèse, car elle permettra d'obtenir plus facilement un grain ferritique fin.

Les résultats indiqués au tableau (4) tendent à montrer que les durcissements les plus importants sont obtenus quand les éléments d'alliage sont fortement carburigènes, comme le chrome, le molybdène à le vanadium et le tungstène, on notera que le silicium contribue à améliorer la résistance après revenu à basse température, le Manganèse élargissant seulement le domaine de l'austénite métastable.

Classe d'acier	destination	Traitement thermomécanique	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A(%)
Acier peu alliés	27NCD16	Trempe +revenu 1h 550°C Déformation 70% par laminage a 500°C	920 1160	1170 1220	18 -
	37CDV12	Trempe +revenu 1h 550°C Déformation 70% par laminage a 525°C+revenu 1h 500°C	1370 1650	1780 2250	14.5 8
	38NCD7	Trempe Déformation 70% par laminage a500°C	1600 2000	1960 2220	10 10
Acier alliés	40NCD18	Trempe Déformation 70% par traction a540°C	1220 2100	2500 3850	20 20
	Z40CDV5	Trempe +revenu 1h 550°C Déformation 60% par forgeage +revenu 1h a 540°C	1800 2360	2040 2850	10 5
	Z40CDV5	Trempe +revenu 2h 475°C Déformation 70% par traction a 500°C+revenu 1h 500°C Déformation 70% par laminage a 525°C+revenu 1h 500°C	1480 2550 -	2040 2960 2860	20 - 20
Acier inoxydable martensitique	Z40CDV12	Trempe +revenu 1h 550°C Déformation 55% a 500°C+revenu 1h 500°C	1200 1530	1690 1930	20 20
	Z30C13(1)	Trempe +revenu 1h 500°C Déformation 55% a 500°C	1430 2140	1940 2500	5 20
	Z30C13(2)	Déformation 70% par laminage a 500°C+revenu 1h 500°C Trempe Déformation 68% a 400°C Déformation 40% a 550°C	- - - -	2500 900 1370 1050	12 - - -

**Tableau 4 :** Amélioration des caractères mécanique de traction par austénitiformage[10].

➤ **L'influence de la teneur en carbone**

La figure (18) montre que le durcissement obtenue par austénitiformage est sensiblement indépendant de la teneur en carbone.

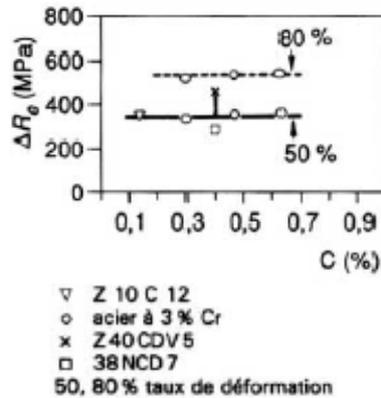


Figure 18 : influence de la teneur en carbone sur le durcissement[10].

- La grosseur du grain austénitique initial a une influence très nette sur la grosseur du grain ferritique [4].

### 1) Influence de la vitesse de refroidissement :

- Le grain ferritique est d'autant plus fin que la vitesse de refroidissement est plus élevée.

### 2) Influence des conditions de déformation sur le durcissement :

Le durcissement est influencé par :

La température et la durée d'austénitisation contrôlent la grosseur du grain austénitique et la remise en solution des carbures dans les aciers alliés, l'influence est très faible figure (19).

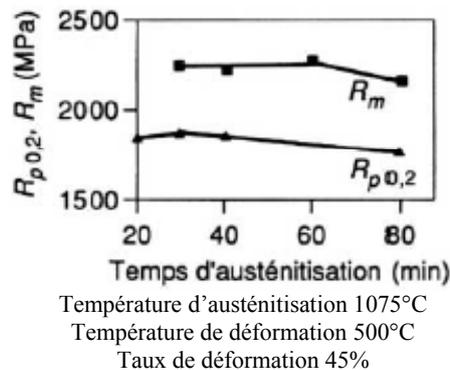
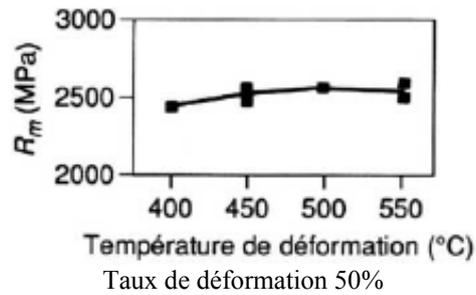


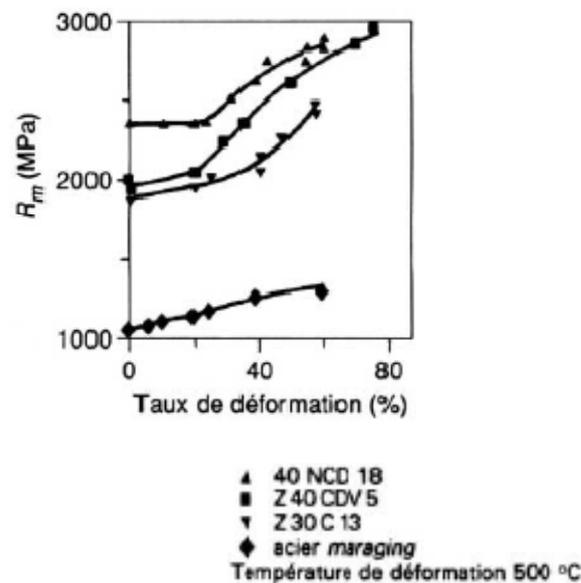
Figure 19 : influence du temps d'austénitisation sur la résistance à la traction et la limite élastique[10].

Les résultats concernant la température de déformation sont contradictoires, mais dans la mesure où la déformation a lieu sans changement de phase, on constate que la déformation n'a pas une influence sensible dans le domaine compris entre 400 et 550°C. Figure(20)



**Figure 20 :** influence de la température de déformation sur la résistance à la traction (Z 40CDV)[10].

Le taux de déformation est la seule variable importante qui contrôle essentiellement la valeur du durcissement supplémentaire apporté par la déformation en phase austénitique métastable. Figure(21)

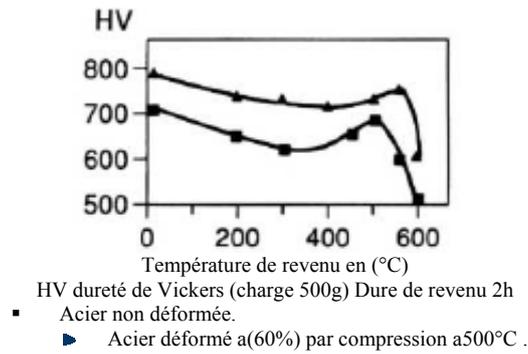


**Figure21 :** influence de taux de déformation sur la résistance à la traction après austénitisation[10]

- ✓ La dureté, la limite d'élasticité et la résistance à la traction augmentent avec le taux de déformation.
- ✓ La forme de courbe de durcissement varie avec chaque acier.
- ✓ on observe très souvent une limite du durcissement à partir de 70 % de déformation et une déformation préalable de 20 % environ est nécessaire pour enregistrer un durcissement appréciable.

Le durcissement, fonction croissante du taux de déformation, est maximal à partir de 60 à 70 % de déformation.

Le durcissement produit par la déformation de l'austénite est conservé pour toutes les températures de revenu et à des températures de revenu supérieures comparativement à un état non déformé ; le pic de durcissement secondaire dans les aciers correspondants est souvent plus faible et décalé vers les températures supérieures (figure 22).



**Figure (22) :** Comparaison de l'évolution de la dureté de (Z40CDV5) traité ou non par austénitiformage en fonction de la température du revenu [10].

### Conclusion :

Pour durcir par austénitiformage, un acier doit contenir du carbone (0.3 % par exemple) et des éléments d'alliage carburigènes.

Le durcissement ne dépend essentiellement que du taux de déformation.

Les applications industrielles de l'austénitiformage, pour obtenir des produits finis à hautes caractéristiques mécaniques, demandent donc la mise en œuvre de moyens de déformation puissants, selon la nuance choisie, la température et le taux de déformation requis [10].

#### IV.4.2. Traitement Thermomécanique en cours de changement de phase :

En se référant aux phases qui apparaissent au cours d'un maintien isotherme ou d'une trempe, on peut distinguer deux types de traitement [14].

##### 1. L'iso-formage :

ce traitement qui consiste à effectuer la déformation dans le domaine des températures où s'effectue la transformation d'austénite proeutectoïde en perlite, il est appelé dans la littérature anglo-saxonne « isoforming ».

Il permet d'obtenir une répartition fine de carbures de fer ( $Fe_3C$ ) dans une matrice ferritique finement polygonée, conduisant à d'excellentes propriétés de traction et de résistance aux chocs pour des aciers se transformant normalement en ferrite et perlite.

##### 2. Le marformage :

ce traitement correspond à une déformation à basse température, voisine de  $M_s$ . Il est bien connu dans l'utilisation des aciers inoxydables austénitiques, en effet, il est possible de relever le point ' $M_s$ ' correspondant à la transformation austénite-martensite en appliquant une contrainte.

La transformation martensitique ainsi induite par la déformation permet d'obtenir des limites d'élasticités importantes tout en conservant une ductilité appréciable [10].

### IV.4.3. Traitement thermomécanique après un changement de phase :

Le chauffage d'austénitisation puis une déformation à température intermédiaire vers 700°C suivi de trempe et revenu [10].

#### 1. Le traitement de perlitoformage :

Consiste à déformer une structure ferrito-perlique à une température correspondant au domaine de formation de cette structure, avec ou sans refroidissement intermédiaire, la déformation est suivie d'un recuit au dessous de  $A_{c1}$ . Cette déformation permet d'accélérer la vitesse de globularisation de la cémentite et d'obtenir des structures adoucies et malléables plus rapidement que par traitement thermique de recuit.

Le champ d'application de ce traitement est celui des aciers destinés à la frappe à froid.

#### 2. Marstraining :

Le traitement qui consiste à déformer la martensite avant revenu, que l'on appelle marstraining, il permet également d'atteindre des durcissements importants.

### IV.5. Amélioration des propriétés mécaniques par les Traitements Thermomécaniques :

Dans ces traitements, on cherche à combiner à la fois une opération de déformation et un traitement thermique en vue d'améliorer les propriétés mécaniques du produit final [7].

L'érouissage effectuée lorsque le métal est encore austénitique, est capable d'améliorer sensiblement les caractéristiques finales. En 1954 un nouveau procédé de durcissement par traitement thermomécanique a donné les résultats mentionnés dans le tableau ci-dessous [12].

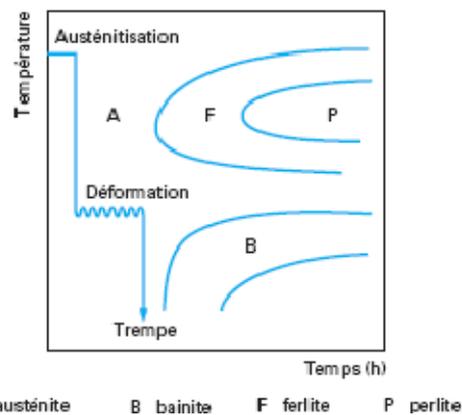
	Dureté de ROCKWEL	Limite d'élasticité(MPa)	Allongement %	Striction %
Un traitement conventionnel	56.5	2032	2	5
Avec TTMBT	58	2756	12	42

**Tab (5) :** Amélioration des propriétés mécaniques avec l'austénitoformage

Depuis, l'amélioration des propriétés mécaniques à l'aide de ce traitement a été confirmée par de nombreuses études aux Etats-Unis, à partir de 1960, ainsi que dans les Centres de Recherches Européens et dans les pays de l'Est [10].

Les aciers haute caractéristiques ont une meilleur réponse à l'austénitoformage, car le gain sur la limite d'élasticité et sur la résistance à la traction est de 30 % environ, la ductilité est conservée le plus souvent. Les propriétés de résilience et de résistance à la propagation de fissures sont largement améliorées [10].

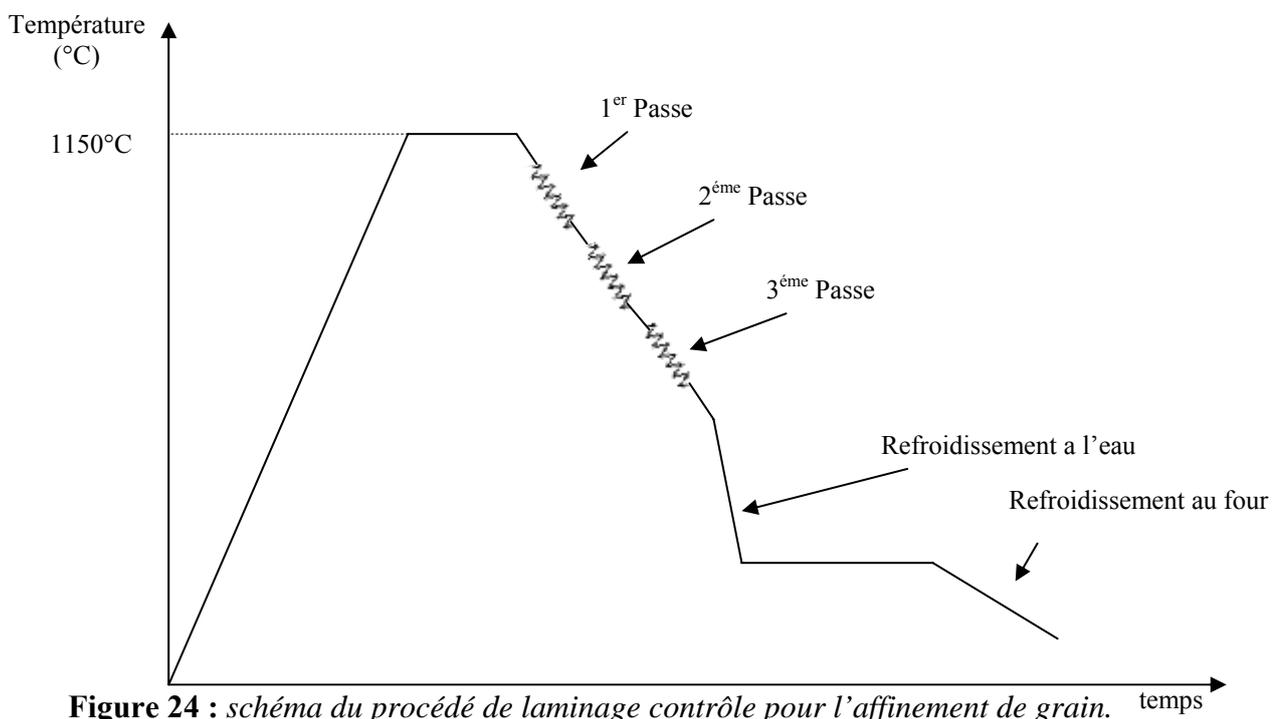
✓ Dans le TTMHT l'acier est déformé dans le domaine austénitique stable. figure (23)



**Figure 23 :** Traitement Thermomécanique à basse température TTMBT (L'austénitiformage).

plus de 50% des tôles fortes sont fabriquées par laminage contrôlé. On est passé progressivement des nuances dont la limite élastique minimale ne dépassait pas 413 MPa à des nuances ayant des limites élastiques allant jusqu'à 550 MPa. L'utilisation conjointe d'éléments de microalliage et de schémas de laminage contrôlé de plus en plus performants a permis cette progression des caractéristiques sans conséquence fâcheuse pour la soudabilité.

- ✓ Une étude de *SUNGHAK, KWON, LEE, OHJOON* a été consacrée aux aciers C-Mn dans le but est de trouver la corrélation entre les facteurs microstructuraux et les propriétés mécaniques par un traitement thermomécanique (laminage contrôlé). La figure (24) montre les étapes de laminage contrôlé [16].



**Figure 24 :** schéma du procédé de laminage contrôle pour l'affinement de grain.

On obtient une structure fine, de telle sorte que les grains deviennent plus équiaxes et fins par l'addition des éléments d'alliages et l'acier acquiert de bonnes propriétés de rupture et de ductilité, spécialement par l'addition du nickel ; les propriétés de ductilité sont énormément améliorées, et sont dues à l'augmentation de la densité de dislocations et la finesse de la ferrite. Le schéma (25) représente l'évolution structurale des grains au cours de laminage contrôlé [16].

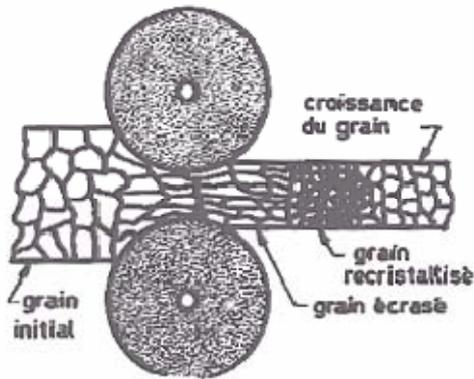


Figure 25 : développement structural des grain.

✓ une autre étude montrant le développement microstructurale du grain ultrafin ferritique d'un acier à bas carbone (C-Mn) et fortement déformé par torsion à chaud est représentée par la Figure (26) après les étapes suivantes :

- L'austénitisation(900°C)
- Un refroidissement rapide.
- La déformation à chaud : la torsion.
- Un recuit intercritique.

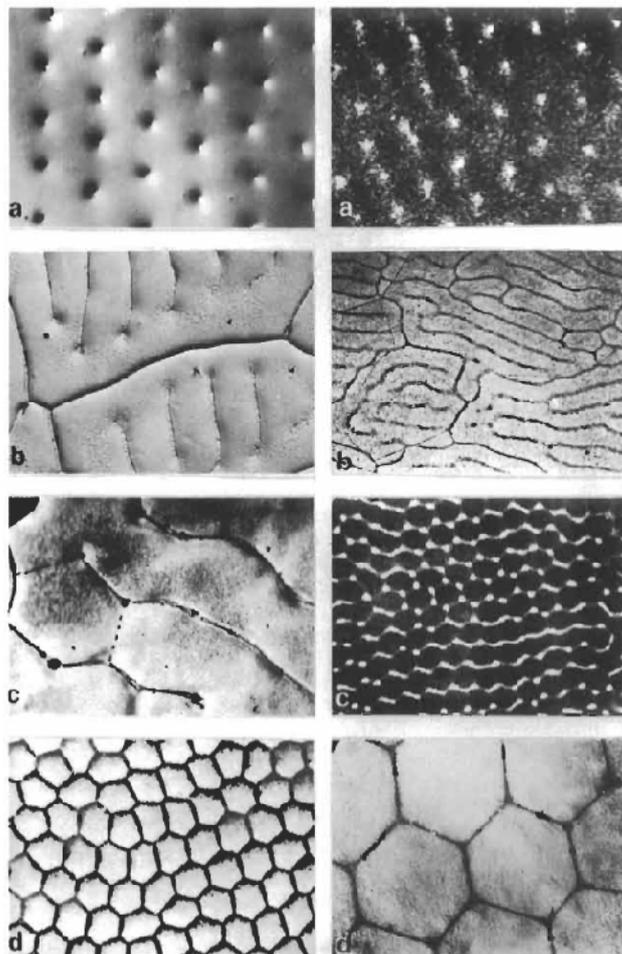


Figure 26: Affinement du grains par déformation à chaud (torsion)[17].

**Conclusion:**

En appliquant un programme précis de déformation et de température pendant le travail à chaud, on peut agir, dans une certaine mesure et suivant les cas, sur la taille des grains, la déformation de leurs joints, la densité de défauts maintenus à la température ambiante, la forme et la répartition des précipités.

Un traitement thermomécanique sur un acier est dit à haute température si la déformation est effectuée dans des conditions telles que puissent intervenir les phénomènes de restauration et de recristallisation. Selon la nature de l'acier et les conditions de refroidissement, on peut obtenir une structure martensitique, bainitique ou ferritique.

# Chapitre V :

## Partie pratique

V.1. Introduction :

Objectif et intérêt :

On a associé successivement de façon générale, un traitement thermique avec un traitement mécanique. Le traitement thermomécanique ne modifie pas la composition chimique mais il peut apporter des modifications sur les propriétés mécaniques et la microstructure.

V.1.2. Matériaux :

Les matériaux utilisés dans ce mémoire sont

A- l'acier XC 10.

B- l'acier P22 (A 335).

Les deux nuances d'acier ont été adoptés pour étudier l'effet du Molibdene et du chrome pour le P22 ainsi que le manganèse pour le XC10.

V.1.3. Définition et choix des matériaux :

➤ Le XC 10 :

C'est un acier faiblement allié à 0.1 % de carbone pour traitement thermique, sa structure cristalline est composée de deux phases 13% perlite et 87 % ferrite.

L'acier à été choisi en raison de sa composition en élément Mn avec 0.5% et son effet bénéfique qui consiste à déplacer les courbes de début de transformation des diagrammes T.T.C et T.R.C vers la droite et en bas du diagramme. On profite de cet effet pour augmenter de manière significative le domaine Austénitique. La figure (27) montre le diagramme TTT et TRC de l'acier[11].

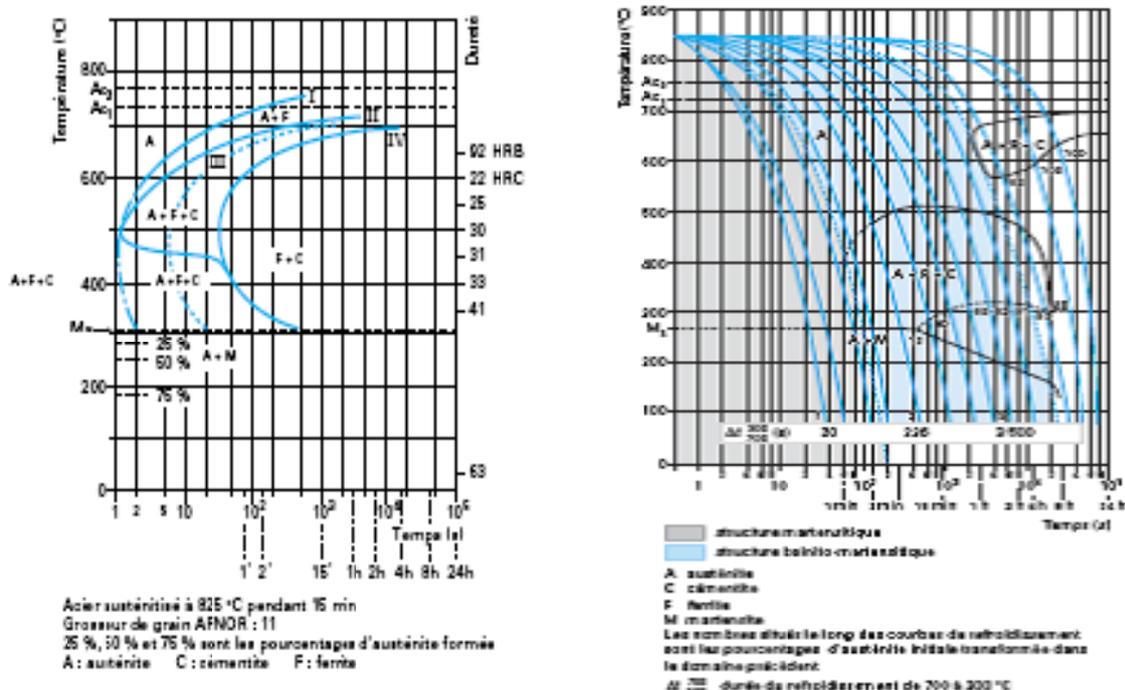


Figure 27 : diagramme TTT et TRC l'acier

➤ **Le P22 (A335) :**

C'est un acier ferritique faiblement allié (pour service à haute température) à 0.1 de carbone et 0.45% de Mn (ayant pratiquement la même composition que le XC10 pour ces deux éléments).

Le P22 a été choisi pour sa composition en éléments Cr et Mo. Le diagramme T.R.C du matériau montrant de la même façon le domaine très large de l'Austénite à haute température [4].

**V.1.4. Composition chimique :**

Après un examen spectrographique, la composition chimique de ces deux aciers est la suivante :

	C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
<b>XC10</b>	0.09	0.53	0.07	0.006	0.02	0.024	0	0.004
<b>A335</b> Grade P22	0.1	0.45	0.5	0.025	0.025	2.25	1.08	-

**V.1.5. Propriétés mécaniques :**

	<b>R<sub>e</sub>(Mpa)</b>	<b>R<sub>p</sub>(Mpa)</b>	<b>A%</b>
<b>XC10</b>	<b>260</b>	<b>215</b>	<b>31</b>
<b>P22</b>	<b>220</b>	<b>415</b>	<b>30</b>

**V.1.6. Domaines d'utilisation :**

➤ **L'acier XC10 :**

Ce genre d'acier est considéré comme extra doux. Il est utilisé en général dans la quincaillerie, pour la fabrication de tôles d'emboutissage, feuillard, pièce de forge ; il a donné de meilleurs résultats de soudabilité mais une pauvre usinabilité.

➤ **L'acier P22 (A335) :**

Ces aciers alliés ferritiques couvrent les tubes sans soudure pour service à haute température.

**V 1.7. Traitement thermomécanique appliqué :**

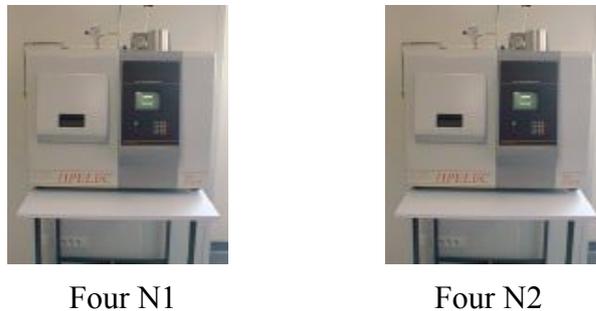
**A. But du traitement :**

Il permet de confirmer à quel point le traitement thermomécanique améliore les propriétés mécaniques du métal, en se référant sur le changement de structure ou il se produit un affinement du grain ; un examen métallographique est nécessaire pour observer la taille du grain avant et après ce traitement thermomécanique.

**B. Etapes Pratiques :****• Première étape:**

Une austénitisation, à une température de 900°C durant 15mn de tous tes les échantillons, a été effectuée pour mettre en solution tous les carbures afin de se placer dans les mêmes conditions.

Pour passer à la deuxième étape, deux fours ont été nécessaires. Le premier consiste à chauffer les échantillons à une température assez élevée pour effectuer la déformation à chaud. Comme un minimum de précaution doit être pris pour prévenir la chute de température lors de la sortie du four, on a adopté des températures de 950C° -1000C°. D'autre part le matériau s'y prête facilement à la déformation. Le deuxième four sert à pratiquer le traitement thermique, les deux fours sont représenté dans l'image 1, 2.



**Figure 28 :** fours pour les traitement thermomécanique.

**• Deuxième étape :**

Chauffage de l'échantillon à des températures entre 900°C et 1000°C pour effectuer la déformation.

**➤ Déformation :**

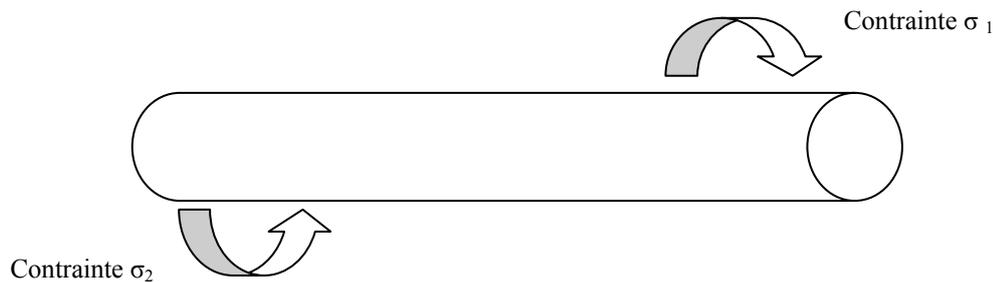
On réalise la déformation juste après l'enlèvement des échantillons du four « F1 ».

**➤ Type de déformation :**

On a choisit la torsion comme moyen de déformation

Le **principe de l'essai de torsion** est simple : une éprouvette cylindrique est bloquée à une extrémité dans un mors fixe, alors que le mors qui pince l'autre extrémité est mis en rotation par un moteur. Il faut disposer d'un couplemètre pour calculer les contraintes et d'un dispositif de mesure de l'angle de rotation pour déterminer les déformations. Les amarrages sont tels que la longueur de l'éprouvette ne varie pas. elle est plus convenable vu les dimensions des échantillons.

On a réalisé manuellement la torsion à chaud dont le taux de déformation a été représenté par le nombre de passe «  $\tau$  » comme l'indique la figure (29).



**Figure 29 :** schéma de déformation appliquées ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ).

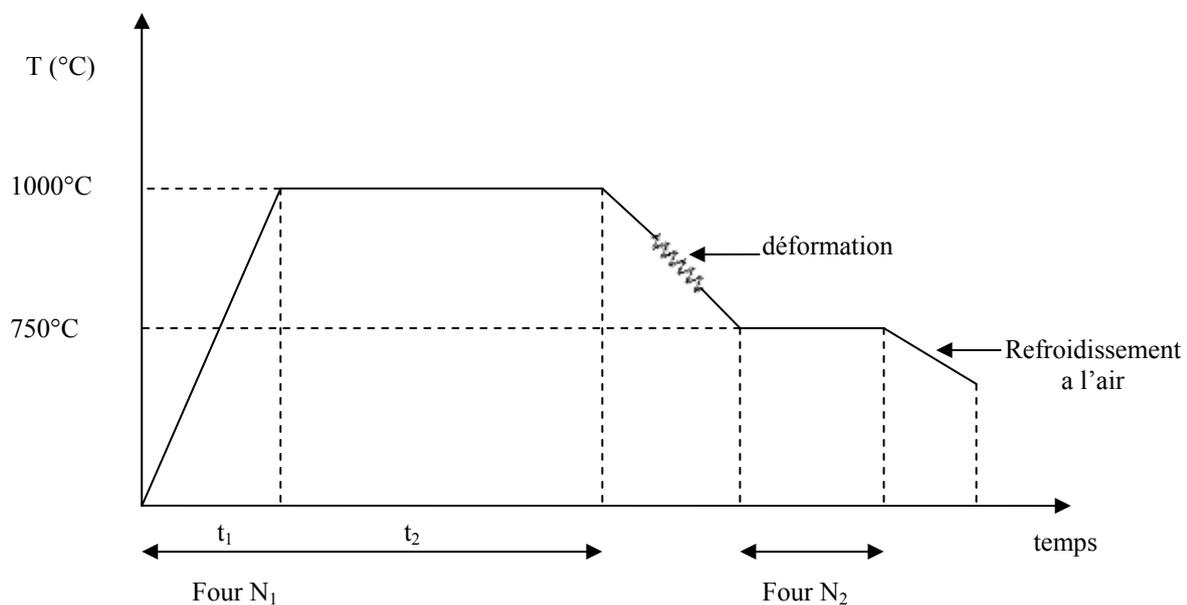
➤ **La troisième étape :**

Juste après la déformation on place les échantillons dans le deuxième four pour des maintiens différents, sachant que la température est constante et fixée à 750°C, puis suivi d'un refroidissement à l'air.

➤ **Temps de maintien :**

Comme la cinétique de nucléation est une étape essentielle de la recristallisation, le temps de maintien doit être bien défini. La germination est intimement liée à l'énergie stockée et peut être distribuée de manière hétérogène [22].

ces différentes étapes sont représentées dans la Figure 30



**Figure 30 :** cycle du traitement thermomécanique réalisée.

**V.1.8. L'examen métallographique :**

L'examen micrographique ou métallographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques lors de l'observation au microscope optique.



**Figure 31** : microscope optique

**a) Technique de la métallographie :**

Dans une opération de micrographie, on doit distinguer:

- 1) le prélèvement de l'échantillon.
- 2) le polissage: mécanique- de finition.
- 3) l'attaque (chimique).
- 4) l'observation et sa photographie.

**b) Préparation micrographique des échantillons :**

L'obtention de la surface d'examen nécessite une suite d'opération allant du prélèvement effectué sur le produit à l'attaque micrographique. Le polissage se fait généralement en deux étapes:

- Le Pré-polissage.
- Le Polissage de finition.

➤ **Le pré-polissage :**

Il se fait par frottement de l'échantillon, sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fine. Le polissage se fait habituellement sous eau (ou arrosage), en prenant soin de croiser le sens de polissage en passant d'un grade à un autre.

La finesse des grains décroît dans l'ordre suivant 100-180-400-600-800-1000-1200

➤ **Le polissage de finition :**

C'est un polissage sur un feutre contenant une pâte diamantée dont la finesse des grains est dans l'ordre décroissant ( $3 \mu\text{m}$  -  $1 \mu\text{m}$ ).

La pâte diamantée est étalée sur le feutre à l'aide d'un diluant après le polissage on nettoie l'échantillon par un jet d'eau pour éliminer les particules de l'abrasif, suivi d'un rinçage à l'alcool pour enlever toute trace de matière grasse. Une fois que l'échantillon est prêt on procède à l'attaque chimique pour l'observer au microscope.



**Figure 32 :** *polisseuse*

**c) L'attaque chimique :**

L'attaque chimique donne des différences de relief ou coloration, entre les différents constituants ou entre les cristaux différemment orientés d'une même phase. Après polissage mécanique et de finition, nous avons procédé à une- attaque chimique de la surface par le Nital : HN03 2% et 98% Acide Nitrique.

d) **Durée d'attaque :** de 15 à 20 secondes.

**V.1.9. Essai de dureté :**

Les essais sont effectués sous des charges moyennes ( $1 \text{ kp} = 9.084 \text{ N}$  selon la Norme NF A 03-163).

Le pénétrateur est de type Vickers.

La mesure de la dimension de l'empreinte est réalisée à l'aide d'un microscope (X400).  
Figure (33).

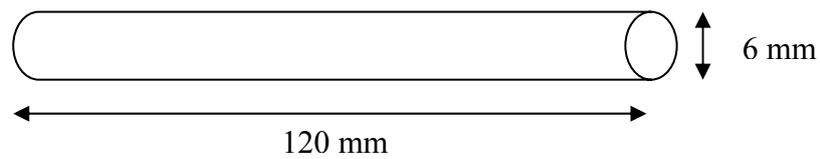


**Figure 33 :** microdureté

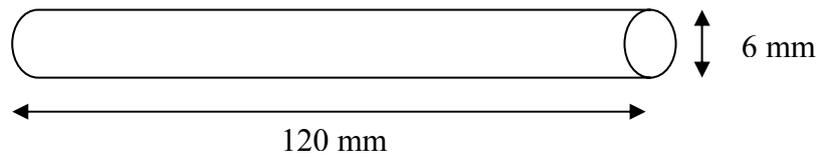
**V.2. Partie expérimentale :****V.2.1. Préparation de l'échantillon :**

Le tableau est les schémas suivants montrent la forme et les dimensions des échantillons des acier XC10 et A335 .

	<b>Nombre des éprouvettes</b>	<b>Diamètre (mm)</b>	<b>Longueur (mm)</b>
XC10	20	6	120



	<b>Nombre des éprouvettes</b>	<b>Diamètre (mm)</b>	<b>Longueur (mm)</b>
A335	20	6	120



### V.2.2. Résultats d'essais de torsion et dureté :

Les résultats de nombre de passe ( $\tau$ ) et de dureté sont représentés dans les tableaux suivants :

- L'acier XC10 : pour température de maintien :  $T=750^{\circ}\text{C}$

Maintien (mn)	Déformation $\tau$ (passe)	Dureté HV (Mpa)
5	5	133
5	10	162
5	15	148
5	20	144.5

Maintien (mn)	Déformation $\tau$ (passe)	Dureté HV (Mpa)
10	5	156
10	10	173
10	15	186
10	20	142

Maintien (mn)	Déformation $\tau$ (passe)	Dureté HV (Mpa)
15	5	188
15	10	168
15	15	159
15	20	148

Maintien (mn)	Déformation $\tau$ (passe)	Dureté HV (Mpa)
20	5	170
20	10	162
20	15	151
20	20	168

- L'acier P22 : pour température de maintien :  $T=750^{\circ}\text{C}$

Maintien (mn)	Déformation $\tau$ (passe)	Dureté HV(Mpa)
5	5	250
5	10	262
5	15	255
5	20	252

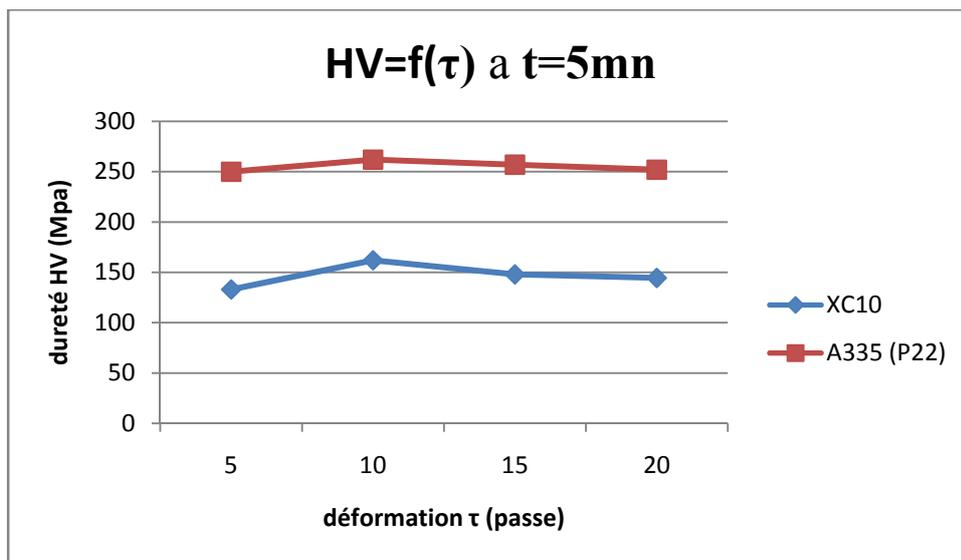
Maintien (mn)	Déformation $\tau$ (passe)	Dureté HV (Mpa)
10	5	319
10	10	350
10	15	419
10	20	307

Maintien (mn)	Déformation $\tau$ (passe)	Dureté HV (Mpa)
15	5	388
15	10	371
15	15	334
15	20	318

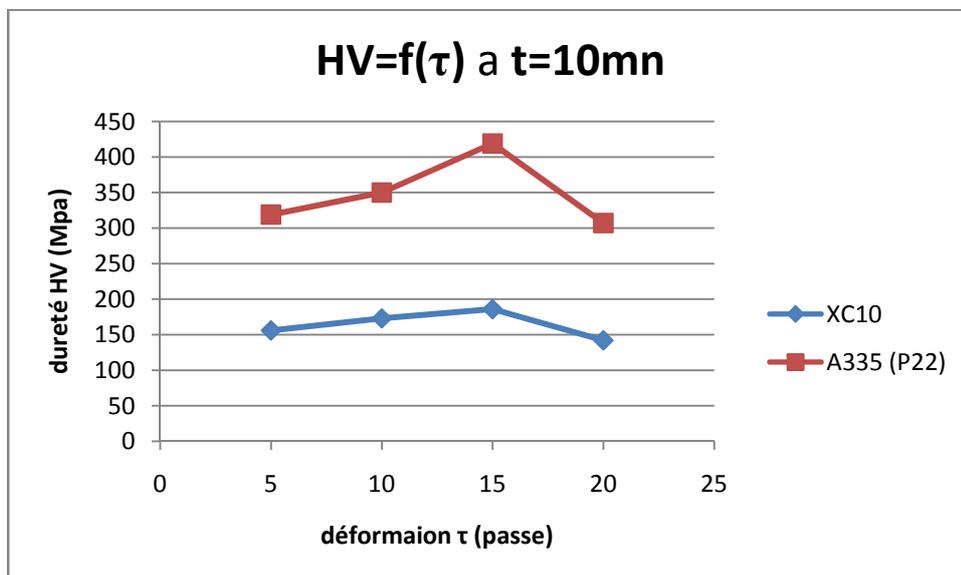
Maintien(mn)	Déformation $\tau$ (passe)	Dureté HV (Mpa)
20	5	370
20	10	355
20	15	325
20	20	365

Ces résultats sont représentés dans les courbes des figures (34) (35) (36) (37) (38) (39) montrant la relation entre la dureté (HV), le taux de déformation et le temps de maintien.

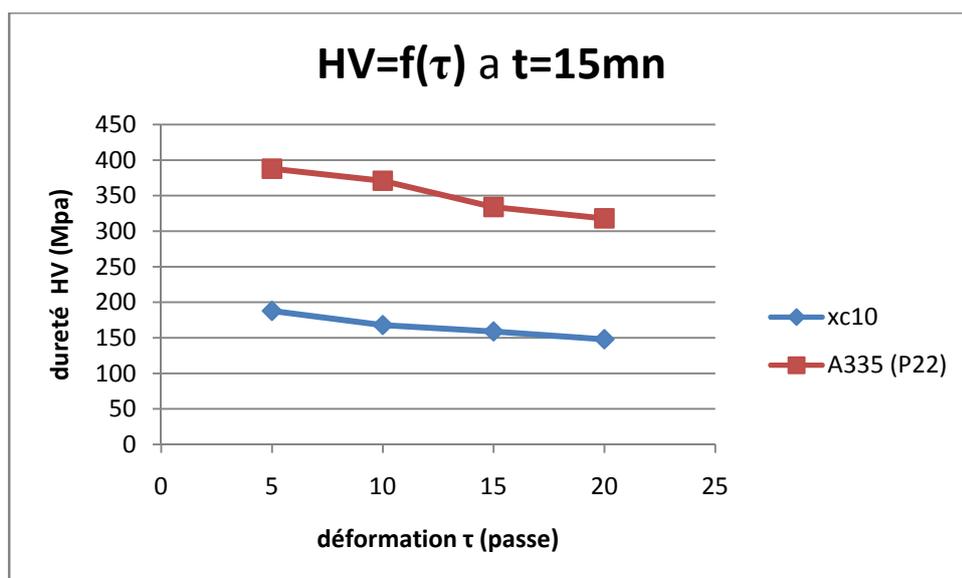
## V.2.3. les graphes de la dureté en fonction de déformation :



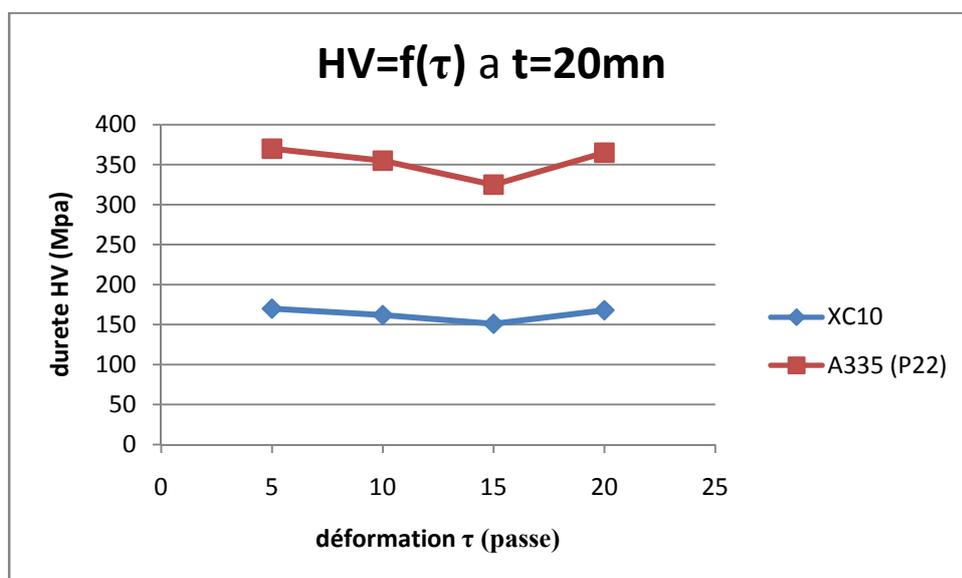
**Figure 34 :** la variation de la dureté en fonction de taux de déformation (la temps et le température du maintien  $t=5mn$ ,  $T=750^{\circ}C$ )



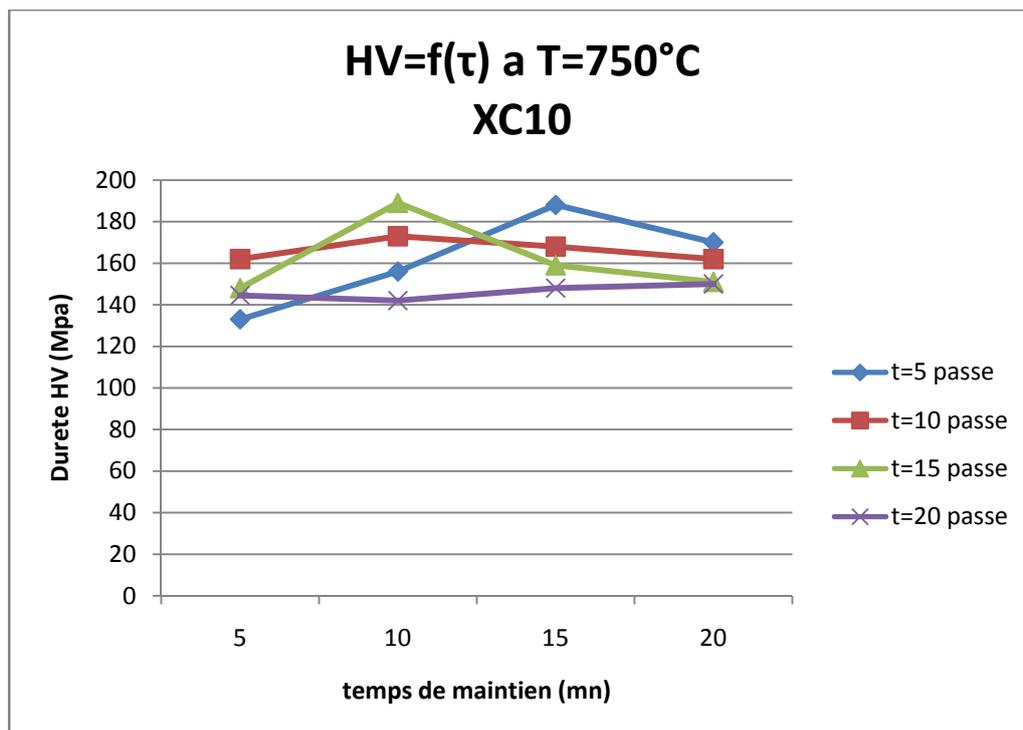
**Figure 35:** la variation de la dureté en fonction de taux de déformation (la temps et le température du maintien  $t=10mn$ ,  $T=750^{\circ}C$ )



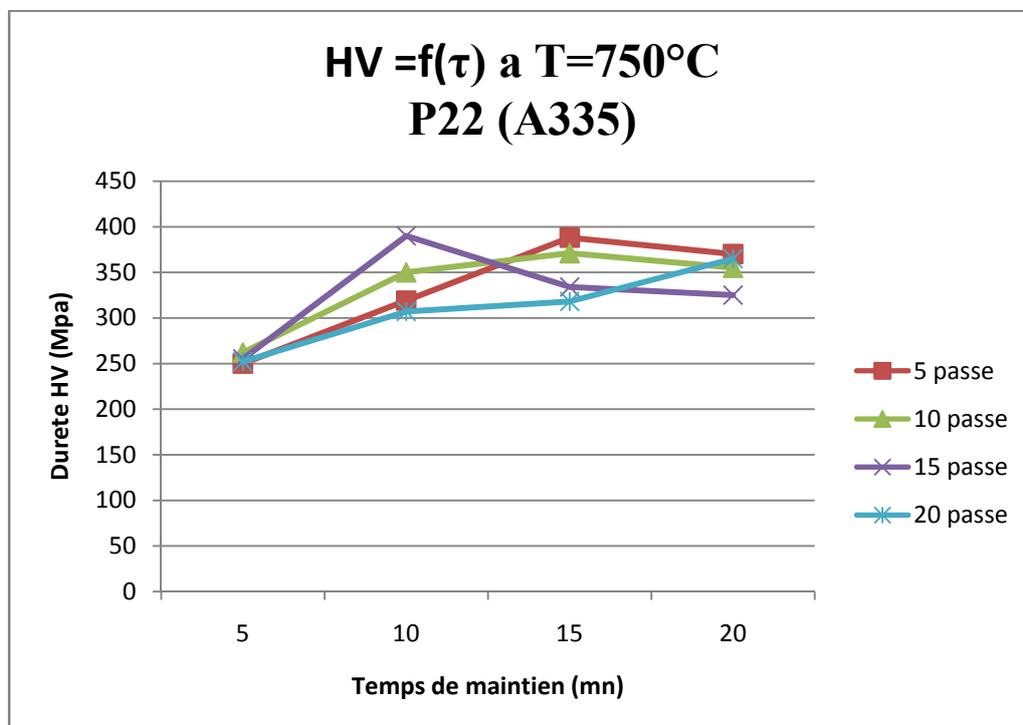
**Figure 36 :** la variation de la dureté en fonction de taux de déformation (la temps et le température du maintien  $t=15mn$ ,  $T=750^{\circ}C$ )



**Figure 37 :** la variation de la dureté en fonction de taux de déformation (la temps et le température du maintien  $t=20 mn$ ,  $T=750^{\circ}C$ )



**Figure 38 :** la variation de la dureté en fonction de temps de maintien (le température du maintien T=750°C) du XC10.



**Figure 39 :** la variation de la dureté en fonction de temps de maintien (le température du maintien T=750°C)

### V.3. Interprétation des examens métallographie :

On a calculé la taille du grain en utilisant la méthode de comptage du nombre de grain

- **XC10 :**

	$n_g$	$d_m(\mu\text{m})$
<b>Brut</b>	<b>48</b>	<b>25.51</b>
<b>Echantillon (2)</b>	<b>70</b>	<b>21.13</b>
<b>Echantillon (4)</b>	<b>57</b>	<b>23.41</b>

- **P22 :**

	$n_g$	$d_m(\mu\text{m})$
<b>Brut</b>	<b>37</b>	<b>29.06</b>
<b>Echantillon (2)</b>	<b>72</b>	<b>17.66</b>

$n_g$  : nombre de grain circonférence tracer

$d_m(\mu\text{m})$  : le diamètre moyen du grain

#### **Discussion :**

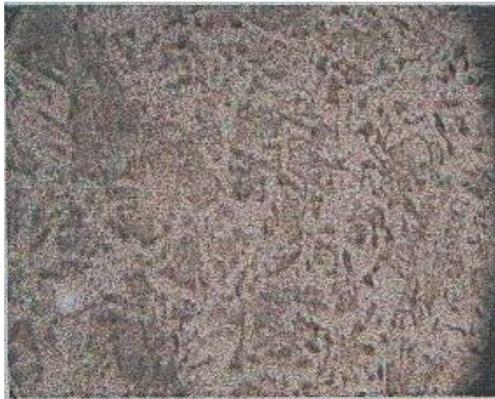
IL se produit un affinement du grain après le traitement thermomécanique par rapport a l'état brut.

**V.4.Résultats de l'examen métallographique :**

Les différents examens métallographique ont donnés comme résultats les clichés suivent :

Pour différents temps de maintien ( $t$ ) et différents taux de déformation ( $\tau$ )

a

 $\tau = 5$  passe,  $t = 20$  mn

b

 $\tau = 10$  passe,  $t = 10$  mn

c

 $\tau = 15$  passe,  $t = 5$  mn

d

 $\tau = 20$  passe,  $t = 15$  mn

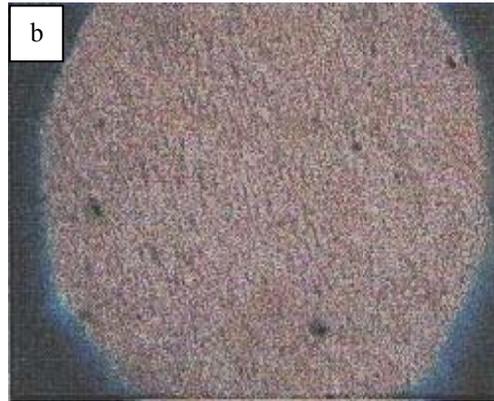
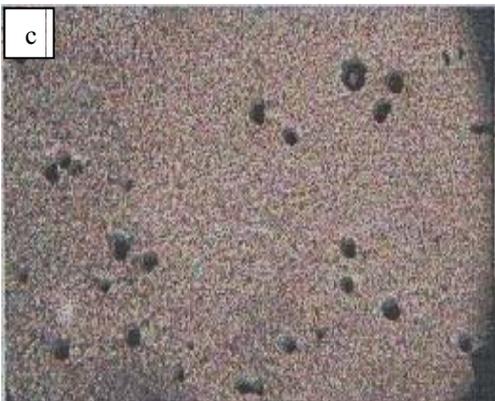
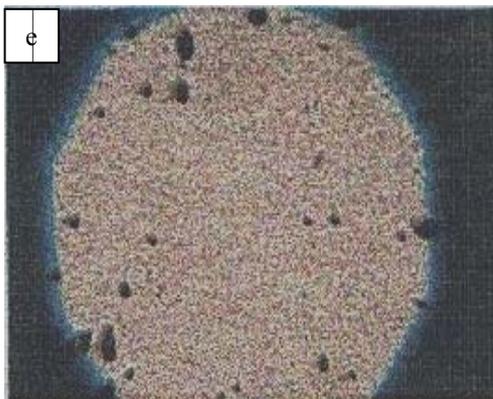
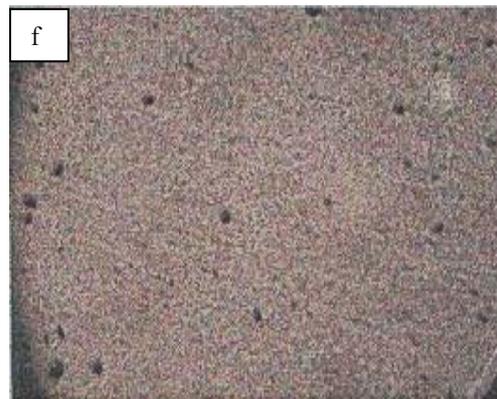
cliche N°1 : structure acier XC10

**Structure granulaire :**

- Grain claire de ferrite.
- Grain sombre de perlite.



Brute P22

 $\tau = 5$  passe,  $t = 10$  mn $\tau = 5$  passe,  $t = 5$  mn $\tau = 10$  passe,  $t = 20$  mn $\tau = 10$  passe,  $t = 10$  mn $\tau = 15$  passe,  $t = 20$  mn

Cliché N°2 : structure d'acier A335 (P22)

Structure granulaire :

- Grain claire de ferrite.
- Grain sombre de perlite.

### V.5. Interprétations

#### Acier XC10 :

La figure (38) du cliché n°01 donnant l'évolution de la dureté en fonction des passes pour différents temps de maintien montre que les différents aciers traités maintiennent des duretés voisines et acceptable pour un même niveau de déformation (10 passes) quelque soit le temps de maintien.

Pour des taux de déformation inférieures (5 passe) les valeurs de la dureté restent dispersées montrant ainsi que le traitement thermomécanique reste inefficace probablement parce que les déformations engendrées n'ont pas encore atteint le taux critique ou à la rigueur l'avoisine. La micrographie de l'acier traité pour 5 minutes révèle des grains assez grossiers confirmant la chute de sa dureté.

Il en est de même pour des taux de déformation (10 passes) sauf pour le cas de dix minutes où la dureté est très élevée comme le confirme la micrographie Qui révèle une structure fine mais aciculaire.

Il semble que les taux de déformation et les maintient retenus restent 10 passes et 10 minutes car au-delà c'est la recristallisation qui prend place. On peut aussi considérer que pour taux de déformation supérieurs à 10 passes la déformation n'a pas eu lieu en milieu entièrement austénitique en raison des temps assez long que nécessite la déformation (franchissement certain de la courbe de début de transformation voir microstructure 2. 2) Des temps de maintien assez long conduisent au grossissement aussi son importance.

#### Acier A335 (P22) :

La même remarque s'applique au cas de l'acier P22 en ce qui concerne les taux de déformation ainsi que les temps de maintien appliquée. Une règle générale peut être retenue en restant à des niveaux de déformation et des temps de maintien moyens. C'est le cas de l'échantillon en (10 passes ,10 minutes), la micrographie du cliché n° 02 (d) montre une structure ferritique équiaxe avec un niveau de dureté moyen.

# Conclusion générale

## Conclusion général :

Pour produire des aciers avec une amélioration du rapport résistance/ductilité, le traitement thermique peut être modifié par une opération de déformation dans le processus de fabrication.

La combinaison du travail mécanique et du traitement thermique est appelé traitement thermomécanique (T.H.T).

On peut citer trois principaux types de traitement thermomécanique qui peuvent se classer comme :

- 1) Déformation dans le domaine stable de l'austénite au-dessus de  $A_3$  avant transformation, c'est le traitement thermomécanique à haute température (T.H.T.H).
- 2) Déformation au-dessous de  $A_1$  avant transformation, c'est le traitement thermomécanique à basse température désigné par LTHT et appelé Auforming.
- 3) Déformation durant la transformation isotherme en perlite, c'est à dire au-dessous de  $A_3$  et appelé Isoforming

Le principal avantage du traitement thermomécanique est l'affinement du grain particulièrement pour les aciers au Silicium qui retarde la recristallisation.

On peut dire que l'on peut classer les éléments d'addition en deux groupes où chacun a un rôle bien déterminé tant niveau du traitement thermique lui-même que dans celui de la déformation.

Le Si et surtout le Manganèse élargissent suffisamment le domaine austénitique pour pouvoir exécuter la déformation à chaud.

L'addition du Chrome et du Molybdène est de produire une fine disposition de carbure dans l'austénite durant la déformation par l'introduction d'une haute densité de dislocations. Ces éléments étant carburigène, le carbone restant en solution dans l'austénite conduit lors du franchissement du début de la courbe de transformation à une structure entièrement ferritique (peut de perlite) et dont la structure est modifiée par la polygonisation des sub-grains.

D'autres éléments tels que le Ni, le V et le Nb semblent être intéressants dans les traitements thermomécaniques en maintenant le rapport résistance/ductilité assez élevé où le Nickel peut agir sur le domaine austénitique car étant lui-même gamma-gène ; même si le Mo reste l'élément préféré parce que plus facile à mettre en solution, la contribution des éléments tels que le Vanadium et le Niobium se manifestent par la dispersion de fins carbures constituant une barrière efficace aux déplacements des dislocations lors de la déformation.

Comme il s'agit de domaine austénitique et de déformation notre objectif a été de définir le taux de déformation appliqué et le temps de maintien à la température de 750°C les essais de dureté et la micrographie indiquent que des temps de maintien de 10 mn et des taux de déformation de 10 passes semblent être adéquats pour atteindre les propriétés assez élevées surtout en ce qui concerne le rapport résistance /ductilité,

# Références bibliographie

- [1]- le livre de l'aciers, GERARD BERANGER, GUY, HENEY, GERMAIN, PR2FACE Prof :LACOMBE , Paris 1994 TEC-DOC.
- [2]- LAKHTINE, Métallurgie et traitement thermique des métaux. Edition mir (Moscou) 1989.
- [3]- ANDRE SOURDILLON ; Traitement thermique des aciers de construction. Edition de la revue d'optique (paris). Deuxième édition.
- [4]- A . CONSTANT. G HENRY. J.C.CHRBONNIER, Principe de base des traitement thermique, thermomécanique, thermochimique des acier, préface du professeur P LACOMBE .
- [5]- internet.
- [6]- JEAN –BARRALIS , GERARD MACDER, précis de la métallurgie, NATAN – AFNOR.
- [7]- Y ADDA, JM DUPOUY , J PHILIBERT , Y QUERE , Elément de métallurgie physique, tome 06.Edition commissariat a l'énergie atomique (gif-sur-yvette) 1991.
- [8]-Mémoire d'ingénieur, amélioration des aciers de gazoduc par le procédé de laminage contrôle (BENZERGA).
- [9]- Y ADDA, JM DUPOUY , J PHILIBERT , Y QUERE , Elément de métallurgie physique, tome 06. Edition commissariat a l'énergie atomique (gif-sur-yvette) 1991.
- [10]- Technique de l'ingénieur.
- [11]- RAYMOND A .HIGGINS . ENGINEERING METALLURGY , edition language book socirty / hodderf stouyhtton 1974.
- [12]- P. AVENAS , B. PARNIERE , G . SERTOUR et A.ZAOUI , Mise en forme des métaux et alliage , Ecole de Villars-sur-Ollon (suisse), paris 1975.
- [13]- encyclopédie.
- [14]- ANDRE ROOS . BERNARD MILLEY , précis de métallurgie appliquée , édition technique et documentation-lavoisier (paris),1982, troisième édition
- [15]- GLOSSAIRE DE LA METALLURGIE .édition jacques bénard Michel, Masson paris 1984.
- [16]- TRANS 26A , MAY 1965 -1097 .

[17]-John .D .VERHOEVEN ,fundamentals of physical metallurgy, department of metallurgy, john WILEYSSONS

[18]- Metallurgical and Materials transaction .

[19]- métallurgie générale .

[20]- BRUCE CHALMERS , Métallurgie physique ,DUNOD-PARIS 1963

[21]- Y ADDA, JM DUPOUY , J PHILIBERT , Y QUERE , Elément de métallurgie physique, tome 05. Edition commissariat a l'énergie atomique (gif-sur-yvette) 1991.

[22]- RECRISTALLISATION AND GRAIN GROWTH .

[23]- AFNOR , PRODUIT sidérurgique ,tome 02, acier pour construction , 12<sup>ème</sup> édition .