République Algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université DE Dr YAHIA FARES MEDEA

Département du Génie Mécanique

Faculté des sciences de Technologie

projet de fin d'études

Pour l'obtention d'un Diplôme de Master En Génie Mécanique

Option: science des matériaux

thème

Evolutions des caractéristiques mécaniques Lors des traitements thermiques imposés à un acier faiblement allié **42CD4**

Présenté par :

- *GHERBIE ZOHEIRE*
- *SLIMANI MOHAMED*

Proposé par :

Encadreur : Dr. ELMOHRI .A

Promotion : 2016/2017

REMERCIEMENTS

***E**n Premier lieu, Je remercie **ALLAH,** le Tout Puissant pour m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.*

***J**e remercie infiniment **Docteur** :* **Abd-Elnour ELMOHRI** *et qui avoir assuré la co-direction de ce mémoire, pour ces conseils précieux le long de mon travail de mémoire. Je ne saurais trop le remercier pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail et pour les longues heures de discussion qu'il m'a réservé avec une patience inégale. Et tous les enseignants du département Génie de la mécanique*

***J**e remercie également tous les membres de jury qui ont bien voulu examiner ce modeste travail. Je suis certaine de pouvoir compter sur leurs vastes connaissances et leur esprit critique constructif pour m'aider, par leurs commentaires et leurs discussions, à mieux comprendre certains problèmes rencontrés au cours de ce travail de recherche.*

***I**l est difficile, dans un petit espace, de remercier toutes les personnes qui ont eu une influence sur ma vie de tous les jours pendant la durée de réalisation de mon mémoire de fin d'études. Ces personnes se reconnaitront facilement et sauront combien ma tendresse et mon amitié sont grandes pour eux.*

***C**e travail n'aurait jamais pu se réaliser sans le soutien continu de ma famille et sans leur éducation basée sur des valeurs morales fondées sur le respect des autres et du travail.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Celle qui a bercé mes rêves : ma mère.

Celui qui a nourri mes ambitions : mon père

Mes cheres sœurs :rahma

qui M'ont aidé et soutenu tout au long de mon parcours scolaire et universitaire.

Mon cher frère : A mes chers amies





A mes chers amies : zoheir et zinou

« Slimani.Mohamed »

Remerciements

D'abord nous tenons à remercier **ALLAH** *de nous avoir accordé la force et le courage de mener à terme ce projet, toute notre reconnaissance et toute notre gratitude vont vers nos professeurs qui nous ont appris le savoir.*

Nous tenons à remercier et à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur Monsieur ***Docteur*** *:* **Abd-Elnour ELMOHRI** *de nous avoir guidé et orienté durant les différentes étapes de ce projet et tout l'equipe de sonacom de barouaghia .*

Nous remercions les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.



Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A ma chère maman qui n'a jamais cessé de ménager ses efforts pour que j'atteigne ce niveau. Ses sacrifices et privations ne l'ont pas empêché d'accomplir son devoir de mère soucieuse de l'avenir de ses enfants.

A mes parents qui a su se montrer patiente, compréhensif et encourageant, sa chaleur paternelle a été et sera toujours pour moi d'un grand réconfort.

A ma famille, grande et petite

À tous mes amies et mes collègues, pour les sympathiques moments qu'on a passé ensemble.

À tous ceux qui me connaissent, et surtout qui m'aiment.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Sommaire

Résumé

Introduction générale

Chapitre:1Généralité sur les aciers

1.L'ACIER :.....02

1.1.Différentes « familles » d'aciers 03

1.1.1.Aciers non alliés à usage général (types S,E, ...)

1.1.2.Aciers spéciaux (type C) 03

1.1.3.Aciers patinables 03

1.1.4.Aciers inoxydables 03

1.1.5.Autres aciers alliés.....03

A).Aciers faiblement alliés.....03

B). Aciers fortement alliés 03

1.2 Composition des aciers 03

1.3 Les différentes phases de l'acier.....04

1.3.1. Austénite 04

1.3.2 Bainite 04

A).Bainite supérieure..... 04

B).Bainite inférieure.....05

C).Transformation bainitique 05

D). Utilisation des aciers bainitiques.....05

1.3.3 Cémentite 05

1.3.4 Ferrite 05

1.3.5 Martensite 05

1.3.6 Perlite.....06

1.4.Diagramme d'équilibre Fer-Carbone.....06

1.4.1 Analyse du diagramme Fer-carbone.....06
1.4.2.Les points caractéristiques du diagramme d'équilibre Fe-Fe3C.....07
a)Courbes.....07
b). Les transformations.....07
1.5. Influences des éléments d'addition sur les propriétés des aciers.....08

1.5.1.Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des acie...09

1.5.2.Influence des éléments d'additions des aciers 09
1).L'aluminium.....09

2).Le carbone 09

3).Le chrome.....10

4).Le cobalt 12

5).Le manganèse 13

6).Le molybdène 14

7).Le Nickel 16

8).Le silicium.....18
1.6.Désignation normalisée des matériaux.....18

1.6.1.Les aciers (NF EN 10027-1).....19

a)Introduction.....19
b)Aciers désignés à partir de leur emploi et de leurs caractéristiques mécaniques et physiques.....20

c)Aciers désignés à partir de leur composition chimique..... 20
1).Aciers non alliés avec une teneur en Mn inférieure à 1%.....20

2).Aciers faiblement alliés.....20
3).Aciers fortement allié.....21

Chapitre2 : Traitements thermiques

2.1.Introduction 24

2.2.Le cycle thermique.....24

.3.Les traitements thermiques de l'acier.....25

2.3.1 Définitions et procédés des traitements thermiques.....25
2.1.1 L'austénitisation 25

2.1.2 La Trempe.....25

2.1.2.a) Trempe à l'eau :.....26

2.1.2.b) Trempe à l'huile.....27

2.1.2.c) Trempe à l'air.....27

2.1.3 Le Revenu.....28

2.2 Recuit et traitements connexes.....30

2.2.1 Types de recuit :.....31

2.2.1.a)Recuit de normalisation :.....31

2.2.1.b) Recuit complet :.....31

2.2.1.c)Recuit de coalescence :.....31

2.2.1.d) Recuit de recristallisation :.....31

2.2.1.e) Recuit de détente 31

2.2.1.f) Recuit d'homogénéisation.....31

Chapitre3 : Matériau et méthode expérimentales

3.Le matériau utilisé.....33

3.1. Désignations normalisées.....33

3.2. Analyse chimique moyenne.....33

3.3.PROPRIETES.....33

a)Soudabilité.....33

B)Aptitude à la trempe.....33

c)Caractéristiques mécaniques moyennes (état trempé revenu).....33

3.4. La gamme de traitement thermique.....34

3.4.1. La trempe.....34

3.4.2. Le revenu.....34

3.5.Essai de traction.....35

3.5.1. Objectifs de l'essai 35

3.5.2. Principe de l'essai 35

3.5.2.1 Eprouvette 35

3.5.2.2. Exécution de l'essai 36

3.5.3 Exploitation des résultats de l'essai.....37

3.5.3.1. Courbe conventionnelle 37

3.6. Essai de dureté 39

3.6.1. Objectif et principe de dureté 39

3.6.2. Eprouvettes 39

3.6.3. Exécution de l'essai 39

3.7.Essai Rockwell 40

3.7.1.Principe de l'essai.....40

3.8.Examens Métallographiques.....41

3.8.1.Examens Macrographique.....41
a)Introduction 41
b)Découpage des échantillons.....41
c)Polissage.....42
d)Attaque chimique.....43
3.8.2.Microscope métallographique.....43
3.8.3.Examen au microscope.....44

Chapitre4: calcul et resultas

4.1.Introduction.....46
4.2. Interprétation.....46
4.2.1Avant traitement.....46
***a)** Résultats expérimentaux d'essai de traction 46*
b)Résultats expérimentaux d'essai de dureté.....46
c) transformation microstructure.....47.
4.2.2Traitement de tremp de T°= 820°c.....47
4.2.2.1 Traitement de tremp de T°= 820°c de 30 min maintient 48
a)Résultats expérimentaux d'essai de dureté 47
4.2.2.2 Traitement de tremp de T°= 820°c de 45 min maintient..... 48
a)Résultats expérimentaux d'essai de traction.....48
b)Résultats expérimentaux d'essai de dureté 49
c) transformation microstructure.....49
4.2.2.3 Traitement de tremp de T°= 820°c de 60 min maintient.....49
a)Résultats expérimentaux d'essai de dureté 49
4.2.3Traitement de tremp de 45 min de maintient 49
4.2.3.1.Traitement de tremp de 45 min de maintient de T°= 780°c.....50
a)Résultats expérimentaux d'essai de dureté 50
4.2.3.2.Traitement de tremp de 45 min de maintient de T°= 820°c.....50

a)Résultats expérimentaux d'essai de dureté.....50

4.2.4.Traitement de tremp de 45 min de maintient de T°= 850°c.....51

a)Résultats expérimentaux d'essai de dureté.....51

4.2.4.Traitement de tremp étagé 51
4.2.4.1.Traitement de tremp étagé de T°= 850°c et 30 min maintient T°=760°c et de t = 30 min.....51
a)Résultats expérimentaux d'essai de traction.....52
b)Résultats expérimentaux d'essai de dureté.....52
c) transformation microstructure.....52
4.2.4.2Traitement de tremp étagé deT°= 850°c et 30 min maintient T°=760°c et de t = 45 min.....53
a)Résultats expérimentaux d'essai de traction.....53

b)Résultats expérimentaux d'essai de dureté.....54

4.2.4.3.Traitement de tremp étagé de T°= 850°c et 30 min maintient T°=760°c et de t =60min :.....54

a)Résultats expérimentaux d'essai de traction.....55

b)Résultats expérimentaux d'essai de dureté 55

4.2.5.Défferent courbe du résultats mécaniques des traitements thermiques.....55
4-3 Interprétation des résultats 55

4-3-1 Effet du temps de maintien sur la dureté 55

4-3-2 Effet de température de chauffage sur la dureté 55

4-3-3 Effet de temps de maintien sur la dureté au cours d'une.....56 referoidissement

Conclusion

ملخص:

الهدف من ه هذه المذكرة هو دراسة تاثيرالمعالجة الحرارية على الخصائص الميكانيكية و البنيوية لسبيكة الفولاذ

التي تستعمل عادة في الأدوات الميكانيكية مثلا جميع أنواع المحامل.لمتابعة التطورات الميكانيكية ل (42CD4)منخفضة البنيوية استعملنا عدة طرق تجريبية مثل الشد و الصلابة والمجهر الضوئي .

-الصلابة تزيد بعد المعالجات الحرارية

-المقاومة الميكانيكية تنقص بعد المعالجات الميكانيكية

الكلمات المفتاحية: المعالجة الحرارية , سبيكة الفولاذ ,الشد ,الصلابة ,المجهر الضوئي

Résumé :

Le but de ce travail est l'étude de l'influence du traitement thermique sur les propriétés mécaniques et microstructurales de l'acier 42CD4 faiblement allié utilisé généralement en mécanique d'outillage par exemple : Roulements de tous types. Pour suivre les évolutions mécaniques et structurales de cette nuance, plusieurs méthodes expérimentales ont été utilisées à savoir la traction et dureté et la microscopie optique.

Les résultats obtenus ont permis de montrer que :

- La dureté et augmente après les traitements thermiques.
- La Resistance mécanique diminue après les traitements thermiques.

Mots clés : traitement thermique ; l'acier ; la traction ; dureté ; la microscopie optique

Summary :

The aim of this work is to study the influence of heat treatment on the properties

Mechanical and microstructural characteristics of low-alloyed 42CD4 steel generally used in tooling mechanics, for example: Bearings of all types. To follow the mechanical and structural evolutions of this nuance, several experimental methods have been used, namely tensile strength and optical microscopy.

The results obtained showed that:

- Hardness and increase after heat treatments.
- Mechanical resistance decreases after heat treatment.

Key words: heat treatment; Steel; traction ; hardness ; Optical microscopy

INTRODUCTION GENERALE :

De tous les alliages métalliques, les aciers sont parmi ceux les plus couramment employés dans les applications industrielles. La grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser les traitements thermomécaniques conditionnant les propriétés mécaniques de ces aciers permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large.

Leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure de l'alliage, donc à sa composition et aux traitements thermiques appliqués. Enfin, leurs faibles coûts présentent un grand intérêt pour leurs utilisations.

L'objectif de ce travail consiste à optimiser la microstructure et de ce fait les caractéristique mécanique d'un acier qui devant être mis en forme par un procédé de trempe. L'acier doit présenter des caractéristiques
mécaniques élevées après traitement de trempe et revenu.

De ce fait, le choix des structures martensitiques revenues s'est naturellement imposé pour les applications souhaitées. Les propriétés mécaniques des ces structures sont très largement conditionnées par la précipitation se produisant aux différentes étapes du trempe. Ainsi, la composition chimique, la taille et la répartition des précipités sont autant de paramètres essentiels pour la caractérisation de ces états. C'est pourquoi, l'optimisation de la composition nécessite essentiellement de comprendre le rôle des divers éléments d'alliages au cours des transformations de phases.

Notre choix s'est porté sur la nuance 42CD4 acier faiblement allié au Cr, Mo. Il est utilisé généralement dans la fabrication des pièces de moyennes a fortes séctions (arbres,essieux,crémailléres,vilbrequins,bielles,engrenages) . cet acier et parfois utilisé pour des piéces trempées superfciellement.

Dans notre étude nous sommes intéressés en particulier, aux évolutions microstructurales lors d'une série de trempe afin de pouvoir caractériser le matériau après
différents milieux (vitesse) de trempe.
Pour réaliser cette étude nous avons utilisé essentiellement la microscopie optique, essai traction et la dureté.

En plus de cette introduction et d'une conclusion générale ou on résumé l'essentiel des résultats

obtenus, la mémoire comprend quatre chapitres :

*Le premier chapitre est consacré pour des généralités sur les aciers.
*Le deuxième chapitre présente les différents traitements thermiques qui sont généralement appliqués aux aciers et les transformations de phases à l'état solide dans les aciers.
*le troisiéme chapitre est définie le matérieau **42CD4** et la méthode exprementale .
*le quateriéme chapitre represente les calcule et les resultas rondus .
* conclusion

Chapitre :I

Généralité sur les aciers

1.L'ACIER :

L'acier est un alliage à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone (de 0,008 à environ2 % en masse).

La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés de l'acier : en deçà de 0,008 %, l'alliage est plutôt malléable et on parle de « fer ». Au-delà de 2 %, les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte. Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique et la dureté de l'alliage : on parle d'aciers « doux, mi-doux, mi-durs, durs ou extra-durs » (classification traditionnelle).

On modiffie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle d'aciers alliés. On peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes) prenant en surface ou à cœur de la matière ; on parle alors d'aciers traités.

Autre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales : résistance aux efforts (module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique), dureté, résistance aux chocs (résilience). D'autre part, leur coût d'élaboration reste relativement modéré, car le minerai de fer est abondant sur terre (environ 5 % de l'écorce). Enfin les aciers sont pratiquement entièrement recyclables grâce à la filière ferraille.

On peut néanmoins leur reconnaître quelques inconvénients, notamment leur mauvaise résistance à la corrosion, à laquelle on peut remédier, soit par divers traitements de surface (peinture, brunissage, zingage, galvanisation à chaud, etc.), soit par l'addition d'éléments réalisant des nuances dites «inoxydables». Par ailleurs, les aciers sont difficilement moulables, donc peu recommandés pour les pièces volumineuses de formes complexes (bâtis de machines, par exemple). On leur préfère alors des fontes.

En fin, lorsque leur masse volumique est compromettante (dans le secteur aéronautique par exemple), on se tourne vers des matériaux plus légers (alliages à base d'aluminium, composites, etc.), mais parfois beaucoup plus chers.

De ce fait, les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application : équipements publics (rails, signalisation), bâtiment (armatures, structures porteuses, ferronnerie, quincaillerie), moyens de transport (carrosseries, transmission), composants mécaniques (visserie, ressorts, câbles, roulements, engrenages), outillage de frappe (marteaux, burins, matrices, etc.) et de coupe (fraises, forets, porte-plaquette), etc. La liste est loin d'être exhaustive. [1]

1.1.Différentes « familles » d'aciers :

Il existe des aciers faiblement alliés, à faible teneur en carbone, et au contraire des aciers contenant beaucoup d'éléments d'alliage (par exemple, un acier inoxydable typique contient 10 % de nickel et 18 % de chrome en masse).

1.1.1.Aciers non alliés à usage général (types S,E, ...) :

Ils ont une faible teneur en carbone et sont les plus utilisés, leurs qualités pouvant varier. Leurs applications vont de la construction soudée à l'ameublement en passant par l'électroménager.

1.1.2Aciers spéciaux (type C) :

Leur composition est plus précise et plus pure et correspond à des usages définis à l'avance. Leurs applications courantes sont : forets, ressorts, arbres, matrices.

1.1.3Aciers patinables :

Les aciers à résistance améliorée à la corrosion sont des aciers faiblement alliés appelés également aciers patinables ou aciers autoprotecteurs, car dans certaines conditions d'exposition, ils ont la faculté de se couvrir d'une couche protectrice appelée « patine ».

Ils sont connus sous différents noms de marque comme CORTEN, INDATEN, DIWETEN. Ces aciers font également l'objet de la norme NF EN 10025-5 de mars 2005 .

1.1.4Aciers inoxydables :

L' acier inoxydable est une des trois grandes familles d'aciers qui présente une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au ßuage (déformation irréversible). C'est un acier fortement allié. Ses applications sont multiples: chimie, nucléaire, mais aussi couteaux et équipements ménagers. Ces aciers contiennent au moins 12% de chrome.

1.1.5Autres aciers alliés :

A).Aciers faiblement alliés :

Aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse ; ils sont utilisés pour des applications nécessitant une haute résistance.

B). Aciers fortement alliés :

moins un élément d'addition dépasse les 5% en masse. Destinés à des usages bien spécifiques, on y trouve des aciers à outils, réfractaires, Maraging (très haute résistance, utilisés dans l'aéronautique), Hadfields (très grande résistance à l'usure), à roulements.

1.2 Composition des aciers :

On distingue plusieurs types d'aciers selon le pourcentage de carbone qu'ils contiennent :

- les aciers hypoeutectoïdes (de 0,008 à 0,77 % de carbone) qui sont les plus mous

- les aciers eutectoïdes (0,77 % de carbone)
- les aciers hypereutectoïdes (de 0,77 à 2,11 % de carbone) qui sont les plus durs.

La structure cristalline des aciers à l'équilibre thermodynamique dépend de leur concentration (essentiellement en carbone mais aussi des autres éléments d'alliage), et de la température. On peut aussi avoir des structures hors équilibre (par exemple dans le cas d'une trempe).

1.3 Les différentes phases de l'acier :

austénite, bainite, cémentite, ferrite, martensite, perlite

1.3.1 Austénite :

Du nom de William Chandler Roberts-Austen (1843-1902), l'austénite (ferγ)est une phase du fer, stable entre 910°C et 1394°C. Elle a une structure cristallographique cubique à faces centrées, notation Strukturberucht A1. Cette structure permet une grande solubilité du carbone (jusque 2,1% massique à 1 147°C). L'austénite est amagnétique.

Certains éléments d'alliage (manganèse, nickel, azote par exemple) augmentent la plage de stabilité de l'austénite ; ils sont dits «gammagènes» . Avec un dosage suf Þsant, ils permettent, grâce à une trempe, d'obtenir de l'austénite à température ambiante à l'état métastable. C'est le cas des aciers dits austénitiques. La grande majorité des aciers inoxydables est austénitique, car ils combinent de bonnes résistances à la corrosion avec des propriétés mécaniques plus élevées que l'acier ferritique.

D'autres éléments (silicium, molybdène ou chrome par exemple) tendent à déstabiliser l'austénite. On appelle ces éléments « alphagènes ».

1.3.2 Bainite :

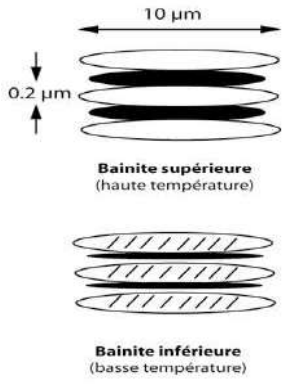
La bainite est le nom d'une microstructure de l'acier découverte en 1930 par E. S. Davenport et Edgar Bain lors de leurs études de la décomposition isotherme de l'austénite. Cette phase se présente sous la forme d'un agrégat de plaquettes (ou lattes) de ferrite et de particules de cémentite. Elle se forme lorsque le refroidissement de l'acier est trop rapide pour obtenir la formation de perlite mais trop lent pour obtenir la formation de martensite.

C'est un constituant qui présente les mêmes phases que la perlite (ferrite et cémentite) mais possède une structure particulièrement Þne, souvent en aiguilles, ce qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques. Elle est dure et assez facile à usiner.

La bainite peut se présenter sous deux formes suivant la température à laquelle elle est formée.

A).Bainite supérieure :

La bainite supérieure présente une structure sous forme de fines plaquettes de ferrite d'une épaisseurde 0,2 micromètres et d'une dizaine de micromètres de longueur qui croissent en paquets appelés lames.Dans chacune de ces lames, les plaquettes sont parallèles et ont la même orientation cristallographique, chacune ayant un plan bien défini. Une plaquette d'une lame est souvent appelée sous unité de bainite. Elles sont séparées par des joints de grain à faible désorientation ou par des particules de cémentite. [1]



B).Bainite inférieure :

La bainite inférieure se forme juste au-dessus de Ms. Les lattes sont plus fines et les carbures sont dispersÈs dans les lattes.

C).Transformation bainitique :

Elle se forme dans les aciers au cours de transformations isothermes à des températures inférieures à celles qui correspondent au domaine perlitique. Sa formation fait intervenir une diffusion à courte distance. On admet généralement que la germination de la bainite débute par la ferrite ; cette ferrite se formerait par un cisaillement du réseau de l'austénite accompagné d'une diffusion à courte distance permettant une redistribution du carbone.

D). Utilisation des aciers bainitiques :

Les aciers bainitiques sont particulièrement bien adaptés au marché des aciers d'une limite d'élasticité inférieure à 1 000 MPa et contenant moins de 2% en poids d'éléments d'alliage.

1.3.3 Cémentite :

La cémentite (ou carbure de fer) est un composé chimique dont la formule est Fe3C dont la structure est orthorhombique. Elle contient 6,67%de C. C'est un composé très dur (dureté Vickers HV=700 à 800) mais très fragile A=0%, Rm=700N/mm². Elle forme avec la ferrite un constituant appelé perlite.

1.3.4 Ferrite :

La ferrite (ferα) est une phase de l'acier, sous la forme d'une structure cubique centrée. Cette phase est observable lorsque la température est inférieure à 912 °C ou supérieure à 1394 °C si la teneur en carbone est très faible. Le passage de la structure cubique à faces centrées (austénite) du fer à la structure cubique centrée (ferrite), lorsque la température descend en dessous de 912°C, résulte de l'apparition progressive du ferromagnétisme dans la structure cubique centrée. En effet, pour des raisons liées à l'arrangement cristallin, l'alignement des spins responsable du ferromagnétisme tend à stabiliser la structure cubique centrée.

1.3.5 Martensite :

En ce qui concerne les aciers, la martensite (fer α') est une phase métastable issue de la transformation sans diffusion de l'austénite en dessous d'une température martensitique.

C'est une solution solide d'insertion sursaturée en carbone dans le ferα, de même composition que l'austénite initiale. La transformation austénite - martensite consiste en un changement du réseau cristallin (avec un faible déplacement des atomes de fer), mais elle n'affecte pas le carbone: on appel ce type de transformation «displacive».

La martensite cristallise dans le système quadratique (prisme droit à base carrée qui est ici très voisin d'un cube).

La martensite est ferromagnétique. [1]

Elle possède une grande dureté (HV > 800) et une fragilité notable. Elle a une structure en aiguilles (plaques) ou en lattes, visibles avec un grossissement suffisant, après attaque par les réactifs classiques. Ces aiguilles correspondent à des plaquettes internes dont le plan habituel est voisin de (225), orientées à l'intérieur de chaque grain initial d'austénite suivant

trois directions parallèles aux côtés d'un triangle équilatéral. Le durcissement de la martensite est d'ordre physico-chimique ; chaque atome de carbone, plus volumineux que l'interstice où il est inséré, écarte les deux atomes de fer voisins, le réseau du fer est ainsi fortement distordu, et ces perturbations en bloquant le mouvement des dislocations durcissent l'acier.

1.3.6 Perlite :

La perlite est un constituant biphasé de l'acier. C'est un agrégat formé de 89 % de ferrite et 11 % de cémentite. Sa structure est généralement formée de lamelles alternées de cémentite et de ferrite. La germination se fait aux joints de grain de la phase mère austénitique.

1.4.Diagramme d'équilibre Fer-Carbone:

1.4.1 Analyse du diagramme Fer-carbone

Le diagramme d'équilibre Fer-carbone est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite Fe3C (6.67%C) est fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0.008%C et 2%C) et les fontes (de 2%C à 6.67%C).

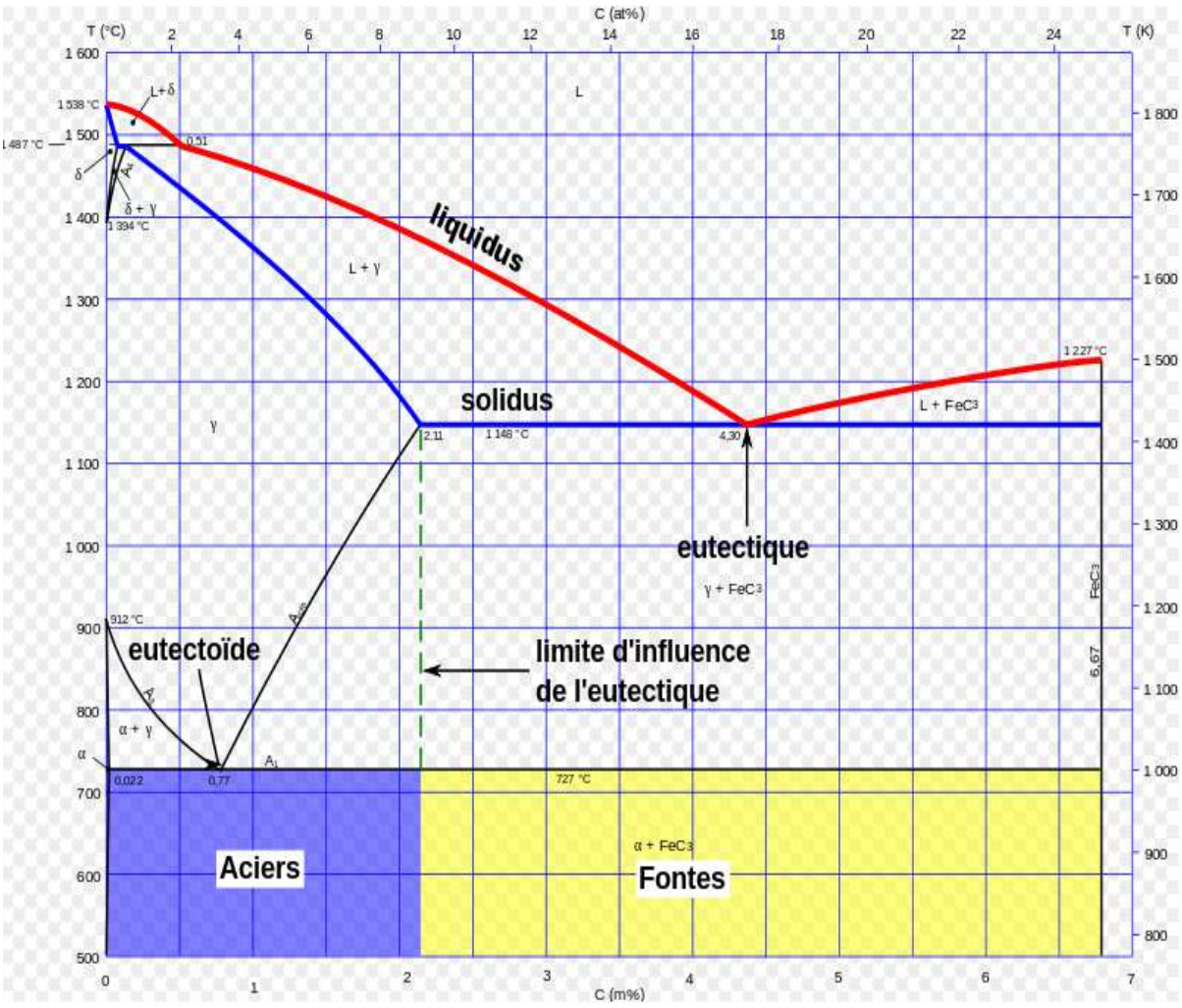


Figure1.1 :diagramme fer-carbone [2]

1.4.2.Les points caractéristiques du diagramme d'équilibre Fe-Fe3C :

- **A** : correspond à la température de fusion du fer pur (1539°C).

- **D** : correspond à la température de fusion de la cémentite (1392°C).
- **B** : 0,51 % C dans la phase liquide en équilibre avec la ferrite δ et l'austénite à la température péritectique 1493°C.
- **H** : 0,10 % C teneur limite du carbone dans la ferrite δ à 1493°C.
- **I** : 0,16 % C dans l'austénite à la température péritectique 1499°C.
- **N** (1392°C) et **G** (910°C) marquent la transformation polymorphe réciproque ferriteausténite (δγ).
- **E** : 2,1 % C teneur limite du carbone dans l'austénite à la température eutectique (ECF 1147°C).
- **S** : 0,8 % C dans l'austénite à la température eutectoide 727°C.
- **P** : 0,02 % C teneur limite dans la ferrite à la température eutéctoïde 727°C.
- **C** : 4,3 % C transformation eutectique à la température 1147°C.

a) Courbes

Acm : indique la fin de la dissolution après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.

* **A0 :** (210°C) précise la température de la transformation magnétique de la cémentite.

* **A1 :** précise la fin de la transformation au refroidissement de l'austénite. L'austénite n'existe plus au-dessous de cette ligne.

* **A2 :** (point de Curie ≈ 768°C) précise la température de la perte de magnétisme du Fer α. en générale ce point ne figure pas sur le diagramme Fer-C.

* **A3 :** précise la fin de la transformation au chauffage de la ferrite en austénite .La ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

* **A4 :** précise la fin de la transformation au chauffage de l'austénite en ferrite δ et/ou liquide. L'austénite n'existe plus au-dessus de cette ligne.
On peut trouver Ac3, Ac4… pour indiquer que le point est tracé en chauffage, ou Ar3, Ar4 lorsqu'il s'agit de refroidissement.

b). Les transformations

Le diagramme Fer-carbone contient trois réactions isothermes caractérisées par des paliers :

* **Eutectique à 1147°C** : il marque la température minimale d'existence du liquide.

* **Eutectoïde à 723°C (A1**). Il marque la fin de la transformation au chauffage de la perlite en austénite. Au-dessus de 723°C, la perlite n'existe plus

***Péritectique à 1487°C**, mais d'importance négligeable de point de vue industrielle.

Réaction eutectoïde

Un premier point remarquable doit être noté, correspondant à la teneur de 0.8%C à 723°C, ce point est dit eutectoïde ; les aciers qui contiennent moins de 0.8%C sont dits **hypo**eutectoïdes et ceux qui sont plus carburés **hyper**eutectoïdes.[2]

Réaction eutectique

Un deuxième point remarquable doit être noté correspondant à la teneur de 4.3% de carbone à 1147°C, ce point est dit eutectique. A la température eutectique il existe trois phases en équilibre.

Le liquide se solidifie, pour former les phases d'austénite et de cémentite on l'appelle lédéburite.

Réaction péritectique

Un troisième point remarquable correspondant à la teneur de 0.51% de carbone à 1487°C, ce point est dit péritectique.

1.5. Influences des éléments d'addition sur les propriétés des aciers :

Les éléments d'addition ajoutés à l'acier ou alliage métallique à base de fer (Fe + C), jouent un rôle particulier sur les caractéristiques générales, ou un rôle commun lorsque plusieurs éléments d'addition sont présents dans la composition chimique finale. Les éléments d'alliagesse repartissent le ferγ .

Dans la suite de ce chapitre, nous nous limiterons à présenter en détail les effets de quatre éléments présélectionnés pour notre étude: le Silicium, le Manganèse, le Phosphore et le Soufre. [3]

Influence des éléments d'addition

1.5.1.Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers :

	Résistance à la traction	Re	Résistance à l'usure	Résistance à la fatigue	Résilience	Dureté à froid	Dureté à chaud	A%
Aluminium					↘			
Carbone	↗		↗		↘	↗		
Cobalt		↗					↗	
Chrome	↗	↗	↗		↘	↗		↘
Manganèse	↗	↗	↗			↗		↘
Molybdène	↗	↗					↗	
Nickel	↗	↗	↗		↗			↘
Silicium	↗	↗	↗			↗		
Titane	↗	↗	↗		↘	↗	↗	
Tungstène	↗	↗	↗			↗	↗	
Vanadium	↗	↗		↗	↗	↗		

1.5.2.Influence des éléments d'additions des aciers

1. **L'aluminium** :

La solubilité de l'aluminium dans le fer est de 35% à 1232°C et de 32% à la température ambiante.

Les additions d'aluminium réduisent la région gamma du diagramme d'équilibre, accroissant la phase alpha et formant finalement une région alpha et gamma continue. La plupart des aciers moulés sont désoxydés à l'aide de petites additions (0.5 à 1 kg par tonne), qui changent l'oxyde de fer en en alumine insoluble, dispersée sous la forme de particules ultra-microscopiques, infusibles et dures, qui sont généralement moins gênantes au cours de la fabrication que les inclusions existant dans les aciers calmés au silicium. En empêchant la formation de gaz, des additions de ce genre évitent la formation de piqûres et de ségrégation.

Il reste très peu d'aluminium dans le métal. A condition d'éviter la surchauffe, une forte désoxydant par l'aluminium représente un moyen d'élever la température à partir de laquelle le grain du métal grossit rapidement, et l'on peut par la suite agir sur la finesse du grain. Les très petites inclusions d'alumine agissent probablement en gênant mécaniquement le grossissement des grains sur les bords de ceux-ci. Les aciers désoxydés de cette façon ont une résilience accrue.

Cet élément présente une grande affinité pour le soufre, et il se forme un sulfure double d'aluminium et de fer à bas point de fusion. Des additions en quantités justes suffisantes pour désoxyder l'acier conduisent à la séparation de Al_2S_3 sous forme d'inclusions situées sur les bords des grains, inclusions qui réduisent beaucoup la ductilité et la résistance aux chocs. On évite une telle séparation en employant un excès d'aluminium de 50% ou plus, ce qui donne une répartition au hasard.[3]

2. **Le carbone :**

Les propriétés de l'acier dépendent, de façon fondamentale, de la teneur en carbone. Le fer liquide dissout très facilement le carbone dans des proportions très supérieures aux 2.08% qui marquent la délimitation entre les aciers et les fontes. En quantités allant jusqu'à cette limite de classification, le carbone se dissout dans le fer pour donner de l'austénite, mais la solubilité dans le fer est très faible (de 0.01 à 0.04%). Les additions de carbone introduisent le point A2(768), (695°C formation de perlite) élèvent le point A4 (1400°C) et peuvent abaisser le point A3 (910°C) jusqu'à 695°C.

De tous les constituants de l'acier, le carbone exerce de loin l'influence la plus grande sur les propriétés du métal. Dans les aciers au carbone, il se trouve presque exclusivement sous la forme de carbure Fe_3C dur et fragile, mais également sous la forme de "carbone de trempe" dissous, et quelquefois sous la forme de graphite. En proportion allant jusqu'à 0.84% de carbone, et grâce à la formation de perlite, la résistance à la rupture et la limite élastique croissent rapidement, aux dépens de la ductilité et de la malléabilité.

De nouveaux accroissements de la teneur en carbone, jusqu'à 1.4% au moins, continuent à faire décroître la ductilité, et jusqu'à 1.8% n'ont que peu d'effet sur la résistance à la rupture, mais la dureté augmente. On n'obtient complètement l'effet de trempe de Fe_3C que par traitement thermique. On emploie beaucoup les teneurs variant dans la zone comprise entre 0.05 et 1.1%, mais on peut dire que la teneur de 0.30% environ est souvent adoptée pour les pièces forgées ou moulées, et que l'on élève la teneur jusque vers 0.7% pour les rails et les

jantes. des teneurs en carbone plus élevées peuvent même convenir à certains traitements de trempe par cémentation, à condition que l'acier soit à grains fins. Des teneurs se rapprochant de l'eutectoïde donnent, dans les structures de cémentation, la meilleure association de résistance à la rupture, de ductilité et de dureté. Des teneurs voisines de 1% sont employées pour les ressorts de chemin de fer et pour les aciers pour outils au carbone.

En vue de combiner au mieux la résistance à la rupture et la ductilité, la tendance est d'admettre une diminution de la teneur en carbone, compensée par un accroissement du pourcentage de manganèse. [3]

3. Le chrome :

Des additions de chrome améliorent les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion, et cet élément est très employé, en teneur variant de 0.25 à 30%, suivant l'application précise que l'on veut faire. Il se combine de préférence avec le carbone, et le carbure qui en résulte, (généralement le carbure orthorhombique Cr_3C_2 lorsque la teneur est modérée, ou le carbure cubique Cr_4C quand la teneur est forte) se dissout dans le Fe_3C restant pour former un carbure double, dur et stable. Par suite, le chrome diminue la décarburation et corrige la tendance graphitisante dans les aciers à forte teneur en carbone. La proportion du carbure libre dans l'acier est accrue, car les carbures doubles ne se dissolvent pas facilement dans l'austénite, bien que la solubilité s'accroîsse tout de même avec la température. Les quantités en excès par rapport à celle nécessaire à la formation des carbures se dissolvent librement et facilement dans le fer liquide, et restent en solution dans le fer, dans une plus grande mesure encore dans le fer. Le chrome en solution tend à retarder la transformation de l'austénite, ce qui produit de la trempe à l'air, tendance qui est favorisée par des températures initiales élevées ou par des vitesses de refroidissement dépassant la vitesse d'équilibre, ces deux conditions abaissant les points A_3 et A_1. Au cours du chauffage, ou avec des vitesses de refroidissement plus faibles, ces points sont élevés, et l'on peut ainsi réaliser le revenu à une température plus élevée. (Avec une teneur en chrome de 12%, le point Ac_1 s'élève à 800°C).

Le point A_2 reste inchangé, mais le point A_4 s'abaisse, et avec une teneur croissante, la région A_4/A_3 (Austénite) se rétrécit progressivement, jusqu'à ce que, pour 11.6% de chrome non combiné, cette région disparaisse et avec la solution solide restant ainsi stable depuis la température ambiante jusqu'au point de fusion, l'allotropie du système disparaît.

Ainsi, jusqu'à un certain point, la transformation de la perlite est favorisée en proportion de la teneur en chrome, mais avec de nouvelle addition ou un refroidissement rapide, la transformation est abaissée, interrompue et supprimée avec formation de martensite. Une teneur aussi faible que 0.5% suffit pour donner une structure aciculaire dans de l'acier au carbone à 0.35% refroidi à l'air, les premières traces de martensite apparaissant pour 2% environ de chrome. Cet élément affine l'eutectoïde, et fait également fortement décroître sa teneur en carbone, jusqu'à ce que, vers 13% de chrome, elle ne soit plus que de 0.3% au lieu de 0.84%. Les aciers au chrome se caractérisent par leur sensibilité au traitement thermique.

Dans les aciers de construction perlitique au chrome, largement employés dans un grand nombre d'industries, la teneur varie généralement de 0.5 à 1.5%, la teneur habituelle étant de

1% environ. Des quantités de cet ordre accroissent la résistance à la rupture, sans diminuer la ductilité de façon appréciable. Elles diminuent l'allure de revenu, et améliorent l'aptitude à la trempe. Cette gamme d'aciers est employée chaque fois qu'il est nécessaire d'avoir une dureté extrême, par exemple pour les matrices, les crémaillères, les limes et les outils. On emploie énormément de l'acier contenant de 1.2 à 1.5% de chrome avec 0.9 à 1.1 % de carbone, pour les roulements à billes et les cages de roulement à billes, le métal étant très usinable dans l'état "sphéroïdisé", et cependant extrêmement résistant l'abrasion après trempe. Tant qu'il s'agît de véritable résistance à l'abrasion, cet acier est supérieur à l'acier au manganèse, mais il ne convient pas au moulage.

On emploie des aciers contenant 2% de chrome avec 0.8 à 1.8% de carbone pour les coffres-forts. Pour le matériel de raffinage du pétrole, fonctionnant à 540°C pour les tubes, vannes, raccords, etc... Sans soudure, on emploi de l'acier à 4.6% de chrome, ce qui donne une dureté de service très grande.

Dans les compositions ci-dessus, le chrome est utilisé seul, mais, le plus souvent, on emploie en même temps que d'autres éléments d'addition, spécialement le nickel, le molybdène, le vanadium et le titane, qui améliorent en plus la ductilité et la ténacité, réduisant en outre la fragilité due au grossissement du grain. Des additions simultanées de chrome (0.5 à 1.5%) et de nickel (1.5 à 4.5%) donnent une association excellent de résistance à l'usure et d'aptitude, à la trempe, avec une résistance (à la rupture) élevée, de la ductilité, de la ténacité, le métal obtenu convenant bien aux fortes épaisseurs, et n'étant que relativement peu sujet au grossissement du grain. Ces aciers sont perlitiques et servent à fabriquer d'innombrables pièces pour automobiles et avions, ainsi que des plaques de blindages. On emploi les aciers au nickel-chrome à faible teneur en carbone comme aciers de trempe par cémentation, le chrome augmentant la vitesse de carburation, ainsi que la dureté, la résistance à l'usure et la résistance de la couche cémentée.

Le chrome contribue beaucoup à la formation de nitrure, et les aciers destinés à la nitruration peuvent en contenir de 0.9 à 1.8% avec ou sans aluminium. Les aciers au silicium-chrome pour les soupapes d'échappement contiennent de 8 à 10% de chrome, avec une teneur en silicium allant jusqu'à 3.5%. L'acier de construction contenant 0.5% de chrome, 1.2% de manganèse et 0.8% de silicium présente une résistance et une ductilité élevées. Une autre composition à haute résistance comporte 0.9% de chrome, 0.8% de manganèse, et 0.3% de cuivre.

Le chrome est l'élément indispensable des aciers inoxydables, la résistance à la corrosion augmentant avec la proportion qui est présente, laquelle varie entre 5 et 30%.

Afin de rendre la ferrite suffisamment riche en chrome pour que le film superficiel d'oxyde double, inerte et adhérent, soit imperméable aux agents oxydants, il faut que la teneur en chrome dépasse 11%. La résistance à la corrosion est diminuée par les carbures de chrome. Si on augmente le carbone, il faudra aussi augmenter le chrome et l'acier devra contenir au moins 12 à 14% de chrome pour que l'on ait une résistance à la corrosion qui soit complète.

Les aciers inoxydables pour la coutellerie contiennent habituellement ces quantités là de chrome, avec 0.30 à 0.40% de carbone. On emploie des teneurs en chrome jusqu'à 30%. La douceur de ces aciers ferritiques permet de les soumettre à des travaux de déformation à froid très importants. Avec de telles teneurs en chrome (12 à 30%) les aciers résistants à la corrosion deviennent résistants à la corrosion aux températures élevées. Les aciers

inoxydables peuvent contenir du nickel, du silicium, du molybdène, du titane, du tungstène et du nobium. Le type le plus commun des aciers inoxydables est austénitique et contient 18 à 19% de chrome et 8 à 9% de nickel (ce qui est le minimum pour stabiliser l'austénite aux températures ordinaires) avec de petites quantités d'éléments alliés. Cet acier réunit une haute résistance à la corrosion, l'aptitude à être soudé, à être embouti à chaud et à subir de fortes transformations de section ou de forme par travail à froid. Il est très employé dans diverses industries chimiques et pour des applications d'architecture et de domotiques. [3]

4. Le cobalt :

Le cobalt élargit la région þ, en relevant la température du solidus et abaissant le point de transformation. Ajouté à l'acier, il n'a pas d'effet durcissant appréciable sur l'austénite. En ce qui concerne les propriétés mécaniques à froid, il élève graduellement la charge de rupture à la traction et la limite élastique, avec réduction correspondante de l'allongement et de la striction. La résistance à la corrosion est améliorée. Le cobalt est le seul élément qui n'agisse pas directement pour augmenter la dureté produite par la trempe et il faut recourir à un refroidissement plus rapide. Cet élément fait que l'acier résiste à l'action du revenu après trempe.

Le cobalt existe dans les aciers surtout sous forme de carbure Co_3C. L'instabilité de celui-ci tend à produire de la décarburation pendant le travail à chaud. Étant donné que le chrome exerce un effet stabilisant par suite de la formation de carbures complexes, contrecarre la fragilité et diminue partiellement les difficultés de forgeage. Il en résulte qu'on l'ajoute souvent aux aciers au cobalt, surtout dans ceux qui sont à haute teneur en carbone. Toute la proportion du cobalt qui n'est pas combinée avec le carbone, forme un composé intermétallique Fe_2Co, qui donne avec le fer une série de solutions solides.

Cet élément est très employé, à des teneurs allant de 5 à 40% comme constituant d'aimants permanents puissants, parce qu'il augmente beaucoup la force coercitive (c'est à dire donne la stabilité magnétique si le champ varie), en même temps qu'il augmente un peu le magnétisme rémanent (c'est à dire la valeur du flux magnétique résiduel dans un champ inducteur revenu à zéro). Un effet de stabilisation est exercé par le cobalt sur la martensite existant après un revenu. C'est un cas unique pour réussir à fabriquer des aimants permanents.

Une autre application importante est l'emploi du cobalt (à des teneurs allant de 5 à 30%) dans les aciers à outils au tungstène. Aux hautes températures, sur l'extrémité de l'outil en cours de travail de coupe, il augmente le rendement en copeaux enlevés et prolonge la durée de service de l'arête coupante, en retardant la coagulation du carbure.

En élevant le solidus, le cobalt permet de tremper à des températures élevées, ce qui a pour effet de mettre les carbures plus complètement en solution. L'effet de précipitation durcissante du tungstène se combinant avec le cobalt, donne une grande dureté du fait de la basse température à laquelle la transformation se produit, facilitant ainsi la formation de martensite. [3]

5. Le manganèse :

Le manganèse a une influence si favorable qu'il est un constituant essentiel de n'importe quel acier industriel. Le seul élément qui ait une importance plus grande est le carbone. Le manganèse forme avec le fer gamma, le fer et la cémentite, une série continue de solutions solides. Les points Ar3 (correspondant à la transformation et Ar1 (changement eutectoïde) sont notablement abaissés par la présence du manganèse. Avec une teneur en manganèse de 2%, les points critiques se confondent, même quand la teneur en carbone est modérée.

L'effet produit sur la structure est, sous beaucoup de rapports, semblable à celle que produirait un accroissement de la vitesse de refroidissement. En toute petite quantité, il donne à la perlite un aspect de très petites lamelles (aspect sorbitique), notamment après normalisation. La teneur en carbone eutectoïde est notablement réduite. Cet élément a peu d'effet sur le grossissement du grain de l'acier. Les aciers au manganèse demandent souvent un traitement dans la poche de coulée. Des additions de manganèse améliorent la fluidité, mais augmentent le retrait. La conductibilité électrique est réduite.

Le manganèse est présent dans les aciers, en partie sous forme d'impuretés résiduelles, en partie comme résultat d'une désoxydation. Une partie du manganèse constitue un élément d'addition intentionnelle pour contrebalancer la mauvaise influence du sulfure de fer, en produisant du sulfure de manganèse relativement moins nocif.

Le manganèse améliore les propriétés mécaniques et les possibilités de travail à chaud. En tant que désoxydant, le manganèse a une très grande efficacité et il est employé pour obtenir de l'acier sain, sans défaut interne, tels que les soufflures. Si la teneur en manganèse est inférieure à 0.2% l'acier sera vraisemblablement ruché (soufflures superficielles en nid d'abeilles) et donc non sain. Son action sur le sulfure de fer est utilisée dans tous les aciers. Elle est particulièrement importante dans les aciers de décolletage à haute teneur en souffre. La présence du manganèse empêche la fragilité à chaud, et améliore l'usinabilité. Les inclusions de sulfure de manganèse-fer sont plus réfractaires que celles des sulfures de fer et ont tendance à ségréguer aux limites des grains. De plus, elles sont suffisament plastiques pour se déformer lors du forgeage ou du laminage. Tous les aciers qui doivent être travaillés à chaud doivent contenir suffisament de manganèse pour que celui-ci se combine avec le soufre présent et les rapports effectifs minima varient jusqu'à 1%.

Des quantités de manganèse, supérieures à 0.30%, augmentent la résistance à la traction et à moindre degré, diminuent l'allongement et la striction. L'amélioration de ténacité due au manganèse varie directement avec la teneur en carbone. Une teneur en manganèse de 1% augmente la résistance d'un acier à 0.10% de carbone d'environ de 25%, alors que, dans le cas d'un acier à 0.50% de carbone, l'augmentation de résistance est d'environ 50%.

L'effet du carbone sur les aciers à haute teneur en manganèse est également plus grand. Une partie de l'augmentation de la résistance et de la dureté provient du manganèse qui se trouve en solution solide avec la ferrite, mais une partie plus importante encore provient du carbure de manganèse, lequel intervient pour beaucoup dans la diminution de la ductilité.
La formation de perlite sorbitique, qui est favorisée par le manganèse, permet de combiner une résistance élevée avec la ductilité et l'usinabilité. [3]

L'usinabilité des aciers doux, à basse teneur en carbone, est beaucoup améliorée par une certaine augmentation de la teneur en manganèse.

On peut considérer les teneurs en manganèse allant de 0.30 à 0.90%, comme normales pour des aciers de construction. La teneur est souvent supérieure et va jusqu'à 2%, avec amélioration marquée des résultats. Avec des teneurs en carbone de 0.30% environ, si la teneur en manganèse est augmentée au-delà de 1.70%, l'acier devient trempant à l'air, avec structure partiellement martensitique. La ductilité devient insuffisante pour qu'on puisse l'utiliser à l'état brut de laminage à chaud.

Avec 2% de manganèse, l'effet de trempe à l'air devient si prononcé que la résistance au choc n'est plus que le cinquième de ce quelle était avec 1.40% de manganèse. Une teneur très favorable en manganèse, pour avoir un acier à haute résistance et ductile, est de 1.2% à 1.6% avec 0.25 à 0.30% de carbone. Lorsque la teneur en carbone est de l'ordre de 0.45%, si le manganèse dépasse notablement 1.50%, l'acier a une ductilité médiocre. L'avantage des hautes teneurs en manganèse est que l'on peut alors réduire les teneurs en carbone, dans le but d'avoir une résistance à la traction déterminée, ce qui améliore indirectement la ductilité.

Par substitution à d'autres éléments, le manganèse permet notamment une diminution de la teneur en nickel qui est un élément couteux des aciers spéciaux.

Le manganèse a un effet important sur l'aptitude des aciers à prendre la trempe. Les aciers à basse teneur en carbone, contenant 1.60 à 2% de manganèse ont après traitement thermique d'excellentes propriétés. De basses températures de trempe suffisent pour avoir une trempe effective, puisque le manganèse abaisse les points critiques. La profondeur de métal qui prend la trempe est augmentée. Il suffit donc de faire des additions modérées de manganèse pour éviter le manque de profondeur de la couche trempée.

Quand le fluide de trempe est l'eau, la teneur en carbone devra être suffisament basse pour éviter de la fragilité et la production de bavures. Inversement, sous ces rapports la borne limite en manganèse diminue quand le carbone augmente.

Cependant, à moins que les pièces soient de forte section ou que la teneur en manganèse soit faible, la trempe à l'huile convient bien et, dans le cas de l'acier à 0.40% de carbone, des teneurs en manganèse jusqu'à 1.80% ont un effet utile très net sur les propriétés mécaniques, après trempe à l'huile et revenu. Un refroidissement lent, après ce chauffage de revenu, tend à donner de la fragilité dans les aciers au manganèse.

Lorsque la teneur en carbone est de 0.80 à 1.25%, une teneur en manganèse de 2% produit une fragilité marquée, qui s'accentue si le manganèse s'accroît jusqu'à 4.5 à 5%. L'acier peut alors être pulvérisé sous la presse. [3]

6. Le molybdène :

Les améliore les propriétés de résistance aux chocs des aciers trempés. Les recherches étendues et les résultats constatés font que le molybdène est maintenant le plus largement employé dans les aciers à haute résistance, en vue de leur aciers au molybdène ont pris une importance croissante pour la fabrication d'organes de machines. Le molybdène maintenir une bonne résistance aux chocs et une bonne résistance aux températures élevées. Le succès des additions de molybdène est dû à plusieurs causes. L'une d'entre elles est d'éliminer

pratiquement toutes tendances à la fragilité de revenu, après trempe, dans les aciers au chrome-nickel et dans d'autres aciers spéciaux. Le molybdène est donc un élément d'addition qu'on emploie habituellement en même temps que d'autres. Sauf dans les aciers pour outils, où la teneur en molybdène peut atteindre 10%, en remplaçant du tungstène, les additions de molybdène ont rarement besoin de dépasser 1% pour produire leur maximum d'effet utile et souvent, elles sont beaucoup plus faibles. Ainsi, de nombreuses variétés d'aciers spéciaux contiennent seulement de 0.15 à 0.40% de molybdène.

Cet élément se dissout facilement dans l'acier fondu et, dans de certaines limites, il est retenu, sous forme de solution solide, dans le fer þ et la ferrite. Sa solubilité à 1440° C est de 24%. A la température ordinaire, elle est de 4%. A 400°C, elle est de 6%. Le molybdène est susceptible de former le composé Fe_3Mo_2. L'acier chauffée pour être amené à l'état de solution solide est soumis à une trempe, présente un précipité de Fe_3Mo_2 très finement dispersé. [3]

Cependant le molybdène est un puissant formateur de carbure et il existe en forte proportion dans l'acier, sous forme de carbures complexes de molybdène et de fer, plus stable de beaucoup que le simple carbure du fer. Ces carbures lentement solubles, donnent à la présence au molybdène beaucoup de son effet trempant, qui vient tout de suite après celui du carbone.

L'amélioration des propriétés, due au molybdène, provient aussi de ce qu'il abaisse la température des points critiques. Il peut supprimer la séparation de la ferrite, même pour des vitesses modérées de refroidissement. Des teneurs jusqu'à 0.50% sont plus efficaces que des additions correspondantes de chrome, pour produire une structure aciculaire dans des aciers refroidis à l'air, alors que des teneurs plus élevées sont moins efficaces que celles du chrome sur la formation de la martensite. Les premières traces de celle-ci apparaissent dans les aciers refroidis à l'air pour 2% de molybdène. Une autre source d'amélioration, surtout en ce qui concerne une résistance élevée aux chocs et à la fatigue, consiste en la formation d'une structure à grains fins, laquelle persiste même quand on chauffe à des températures bien supérieures à celle du point critique. [3]

Une caractéristique des additions de molybdène (0.5 à 1%) est de permettre un traitement thermique efficace des aciers au nickel-chrome, des aciers à hautes teneur en manganèse..., en supprimant largement leur susceptibilité à la fragilité de revenu. Celle-ci consiste en une précipitation durcissante entraînant une diminution considérable de la résistance aux chocs. Cela ne résulte pas d'un adoucissement de l'acier.

Mais en fait le molybdène est favorable à un durcissement par revenu. Il se crée alors des petites particules de Fe_3Mo_2. Par suite de la solubilité lente des carbures, il faut des températures de revenu élevées pour produire l'adoucissement.

On utilise notamment cette précipitation dans des aciers au molybdène pour matrices à durcissement par vieillissement.

Alors que la propriété de durcir la ferrite est seulement modérée, l'effet global utile au molybdène sur l'aptitude à prendre la trempe, sur la ténacité et la résistance à haute

température, n'est pas accompagné d'une perte de ductilité. La possibilité de durcir l'acier par la trempe sans fragilité est une des caractéristiques des additions de molybdène.

Le molybdène, pour une dureté donnée des aciers, améliore leur usinabilité. Cet élément permet d'alléger les pièces qui doivent résister à une fatigue donnée. Il s'oppose à la corrosion et à l'oxydation.

L'acier au molybdène convient très bien pour faire des moulages. Il a une bonne coulabilité, peut prendre la trempe sur une bonne épaisseur et possède une limite élastique élevée.

Le molybdène agit d'une façon semblable à celle du chrome, pour augmenter la résistance, l'aptitude à la trempe et la résistance à l'usure, tout en gardant une bonne ténacité. Il a donc divers effets favorables, analogues à ceux du nickel. Les aciers au nickel-molybdène ont une limite élastique élevée, mais ils ont une faible résistance aux chocs, et une médiocre usinabilité. Ils sont employés comme aciers de cémentation.

7. Le Nickel :

Le nickel est le premier de tous les éléments alliés employé à l'échelle industrielle. Il confère aux aciers un ensemble de propriétés remarquables, de sorte qu'il se trouve un emploi étendu pour toutes sortes d'applications, notamment aux teneurs jusqu'à 5% dans les aciers devant subir un traitement thermique ou une cémentation et pour des pièces forgées au pilon. Le plein effet du nickel se produit seulement quand on l'emploie en même temps que d'autres éléments alliés.

De nombreux aciers inoxydables et résistant à chaud contiennent de 8 à 25% de nickel.

Cet élément a une structure atomique du type cubique à faces centrées, comme celle du fer gamma, avec lequel il peut s'allier complètement en formant une série continue de solutions solides. Il est aussi complètement soluble dans la ferrite et sauf pour une petite proportion où il existe comme carbure de nickel instable, associé avec le carbure de fer, il existe dans les aciers pour pièces de construction, sous forme de solution solide dans la ferrite.

Le nickel a un comportement semblable au manganèse. Son intérêt fondamental est qu'il abaisse notablement la température des points critiques. Les points critiques Ac_3 et Ac_1 sont, tous les deux, abaissés d'environ 10°C pour chaque 1% de nickel ajouté. Cet abaissement est beaucoup plus grand au refroidissement qu'à l'échauffement. La séparation de la ferrite et la formation de la perlite se trouvant ainsi retardées, l'effet sur la structure est semblable à celui que produirait une augmentation de la vitesse de refroidissement dans un acier ordinaire au carbone.

Le nickel a une vitesse de diffusion assez faible. Il est très utile pour retarder le grossissement du grain par chauffage à hautes températures. Il contre-balance les effets pernicieux d'un surchauffage. La perlite devient plus fines, sa teneur en carbone est diminuée et ramenée, par exemple, à 0.75%, quand la teneur en nickel est de 3% et à 0.45%, quand la teneur en nickel est de 10%.[3]

Le carbure de nickel est très instable. L'effet graphitisant du nickel est intermédiaire entre celui du cuivre et celui du silicium. Cet effet est habituellement contrecarré en élevant le manganèse jusqu'à une teneur de 0.6 à 0.9%.

Le carbone intensifie l'action du nickel. Les meilleures propriétés mécaniques des aciers de construction sont réalisées seulement lorsque la teneur en carbone est réduite proportionnellement. On a alors des aciers dont les caractéristiques peuvent être modifiées en variant les conditions du traitement thermique.

Le nickel n'a qu'un effet modéré sur la trempabilité des aciers. En abaissant la température des points critiques et la vitesse critique du refroidissement, il permet une plus grande latitude dans les conditions du traitement thermique. On peut abaisser la température de trempe, en réduisant ainsi les possibilités de décarburation superficielle et de déformation. On peut avoir une trempe moins brutale que celle exigée par des cahiers au carbone seul. En faisant un revenu après trempe vers des températures de 550° à 650°C. Les aciers au nickel présentent les meilleurs ensembles de caractéristiques mécaniques.

Même une simple normalisation donne déjà de bonnes propriétés dans les pièces laminées. Les aciers au nickel possèdent des caractéristiques supérieures, à l'état forgé.

Les nombreux aciers contenant jusqu'à 5% de nickel sont plus résistants et plus tenace que les aciers ordinaires au carbone, beaucoup, par suite de ce fait que la perlite est plus fine, mais aussi par un effet direct du nickel sur la ferrite. Cependant, la résistance de celle-ci à l'abrasion n'est que légèrement augmentée. Le nickel a un rôle très utile en ce qu'il augmente le rapport de la limite élastique à la charge de rupture, ce qui a pour conséquence de permettre une substantielle diminution du poids des pièces.

Avec de faibles teneurs en carbone, la présence de 2% de nickel donne un acier très ductile, résistant aux chocs et à la fatigue aux basses températures et avec des teneurs moyennes en carbone, il améliore les propriétés élastiques.

La présence de nickel diminue les risque de criques, quand on meule et qu'on soumet aux chocs thermiques les arètes anguleuses. La teneur la plus fréquente est de 3 à 3.5%.
Les aciers de cémentation à 4.5 et 5% de nickel permettent d'obtenir une variété relativement grande de propriétés aux essais de traction et conviennent pour des pièces très fatiguées en service, telles que les engrenages de transmission. Quand on fait la cémentation jusqu'à atteindre 0.9% de carbone à la périphérie, sur des pièces en acier à 5% de nickel, les couches superficielles deviennent martensitiques, même après un refroidissement relativement lent, ce qui permet d'éviter une trempe.

Une excellente combinaison de propriétés après cémentation peut être obtenue en ajoutant, en plus du nickel, une certaine proportion de chrome qui augmente la résistance à l'usure de la couche cémentée, ainsi que la résistance à la traction du coeur des pièces, sans que celui-ci perde de sa ductilité.

Lorsque du nickel est présent dans les aciers à l'aluminium destinés à la nitruration, il se précipite un nitrure de nickel et d'aluminium qui est tenace.

Comme le nickel élargit le domaine gamma, des teneurs intermédiaires en nickel produisent la structure martensitique, même avec un refroidissement lent, mais des teneurs encore plus élevées donneraient à l'acier une structure austénitique permanente.

Les aciers austénitiques au nickel qui, sont les plus employés, sont les aciers inoxydables et résistant à chaud, contenant de fortes proportions de chrome, en plus du nickel. Ils sont la base de la plupart des variétés d'aciers résistant à la corrosion et à la chaleur. Des additions plus fortes de nickel étendent le domaine de la résistance à la corrosion et permettent une large variété de propriétés mécaniques très intéressantes. Le film protecteur formé sur les aciers, contenant seulement 12% de chrome, n'offre qu'une résistance permanente insuffisante aux acides minéraux non oxydants. [3]

8. Le silicium :

De même que le carbone, l'élément silicium est toujours présent dans les aciers industriels.

Il forme facilement des solutions solides avec le fer, aux états delta, gamma ou alpha et aussi avec la cémentite, en diminuant la solubilité de celle-ci. Alors qu'il est surtout présent à l'état de solution solide dans la ferrite, il y en a une petite proportion sous forme combinée, c'est la silice Si O_2, formant dans le métal des inclusions non métalliques.

Les aciers à hautes teneur en carbone et en silicium peuvent contenir du carbure de silicium (Si C). Celui-ci, en solution solide, contribue à produire à produire un grain grossier dans les aciers, alors que sous la forme d'inclusions dispersées, il a un certain effet pour gêner le grossissement du grain. Le silicium à l'état allié au fer, élargit le domaine de la phase alpha du diagramme d'équilibre, et quand il est présent en quantité suffisante, les alliages restent constamment ferritiques.

En élevant ainsi le point de transformation, il demande des températures de trempe plus élevées. Une tendance très dommageable, surtout lorsque sa teneur 0.50%, est celle qui contribue à décomposer la cémentite en fer et graphite. On contrecarre cet effet par un apport de manganèse.

De nombreux aciers calmés sont partiellement désoxydés par le ferro-silicium, désoxydant puissant, qui en éliminant largement les gaz et les oxydes, et en empêchant la formation de bulles gazeuses dans le métal qui se solidifie dans la lingotière ou dans le moule, donne du métal sain, exempt de soufflures. La désoxydation effectuée avec le silicium seul produit une quantité innombrables de petites particules réfractaires qui sont de la silice pure. Elles sont si petites que presque toutes restent retenues dans le métal.

Le silicium améliore la résistance de l'acier aux températures élevées. Les pellicules d'oxyde superficiel formées les premières sont adhérentes et inertes et elles empêchent rapidement une oxydation ultérieure. Certains des aciers à haute teneur en chrome résistant à la chaleur contiennent de 1 à 3% de silicium. [3]

1.6.Désignation normalisée des matériaux

En traitement de surface comme en traitement thermique, la connaissance précise de la nature d'un matériau est nécessaire pour pouvoir établir une gamme de traitement appropriée.
La moindre variation de propriété d'un acier peut aboutir à l'utilisation d'une gamme de préparation ou de traitement excessivement différente de la gamme type.

En traitement thermique une variation de composition a une influence importante sur la position des points de transformation, et sur la possibilité de traitement qui en découle (température durée, modalités de refroidissement)

Par ailleurs, la facilité avec laquelle un métal s'oxyde et donc risque de se passiver doit être pris en compte pour l'adhérence d'un revêtement.

Il est donc **nécessaire** de connaître le système permettant de coder et décoder la nature d'un matériau devant être revêtu. [4]

1.6.1.Les aciers (NF EN 10027-1)

a)Introduction

La norme (NF EN 10027-1) a retenu deux systèmes de désignation :

(groupe 1) Les aciers désignés à partir de leurs caractéristiques mécaniques et physiques (aciers pour façonnage ultérieur) ou les aciers désignés à partir de leur emploi (fils, tôles, aciers revêtus, ...)

(groupe 2) Les aciers désignés à partir de leur composition chimique

b)Aciers désignés à partir de leur emploi et de leurs caractéristiques mécaniques et physiques

S 235

Le codage est réalisé à partir d'une lettre suivi d'une valeur numérique

Lettre	signification	Valeur numérique
E	Acier de construction mécanique	Re mini
S	Acier de construction y compris les aciers à grains fins	Re mini
H	Acier à haute résistance laminé à froid pour emboutissage à froid	Re mini
P	Acier pour appareil à pression	Re mini
D	Acier pour formage à froid	Degré d'emboutissabilité

N.B. Re = limite élastique en MPa. Il existe aussi d'autres les lettres L, B, Y,etc., pour plus d'information

se référer à la norme Dans le cas d'aciers livrés moulés la désignation est précédé de la lettre G (exemple GS 235)

Exemples

E335 : Acier de construction mécanique ayant une limite élastique minimale de 335 Mpa

S 235 : Acier de construction ayant une limite élastique minimale de 235 MPa

Pour tous ces aciers, on peut trouver après la lettre et les chiffres, une série de symboles (lettre ou chiffre) indiquant des spécifications particulières. Par exemple :

S 320 G D + Z 275 N A C

S Acier de construction

320 De Re mini de 320 MPa

G Etat de livraison non précisé

D Aptitude à recevoir un revêtement au trempé

Z Galvanisation à chaud

275 Poids de couche 275g/m²

N Aspect du revêtement normal

A Qualité de finition améliorée (SKIN PASS)

C Finition chromatée

On voit qu'il est impératif de se reporter à la norme afin de connaître la signification de tous ces symboles. [4]

b)Aciers désignés à partir de leur composition chimique

Nous distinguerons 4 cas :

Les aciers non alliés avec un pourcentage de manganèse inférieur à 1% à l'exclusion des aciers de décolletage : **Sous groupe 2-1** aciers non alliés sauf aciers de décolletage.

Les aciers non alliés de teneur en manganèse supérieure à 1%, les aciers non alliés de décolletage, aciers alliés pour lesquels la teneur d'aucun élément d'addition n'atteint 5% **Sous groupe 2-2** aciers faiblement alliés Les aciers alliés dont la teneur d'au moins un des éléments est supérieure ou égale à 5%. **Sous groupe 2-3** aciers fortement alliés

Les aciers alliés qui sont utilisé comme aciers d'outillage à coupe rapide **Sous groupe 2-4** aciers rapides

1).Aciers non alliés avec une teneur en Mn inférieure à 1%

C 22

Lettre C Valeur numérique

2 chiffres représentant le pourcentage de carbone en masse de l'acier multiplié par 100.

N.B.

La désignation est précédée de la lettre G si la pièce est livrée moulée

Ces aciers peuvent être suivis par un indice indiquant certaines propriétés de l'acier

Indice signification

E Teneur maximale en soufre spécifiée Peut être suivi de la teneur en soufre en 1/100° de pour-cent

R Fourchette en soufre spécifiée Peut être suivi de la teneur en soufre en 1/100° de pour-cent

D Pour tréfilage de fils

C Pour formage à froid

S Pour ressorts

U Pour outillage

Ils peuvent être suivis éventuellement d'un symbole chimique suivi de sa teneur en 1/10 de pourcent.

2).Aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dans lesquels la teneur en élément d'addition est inférieure à 5%.

(Attention si la teneur d'un élément d'addition ne peut pas dépasser 5% la somme des teneurs le peut).

42 Cr Mo 4

Valeur numérique : Cette valeur représente le pourcentage de carbone multiplié par 100.

Symbole chimiques : Ce sont les symboles chimiques des éléments d'addition placés dans l'ordre décroissant de leur teneur. Ici Cr, le chrome a une teneur > à Mo le molybdène.

Valeur numérique : la valeur indique la teneur % en masse des éléments d'addition depuis le premier symbole chimique, cette teneur étant multipliée par un facteur donné (voir tableau ci dessous).

Ici Cr = 4/4 =1% et Mo < 1%

N.B.

*Dans le cas ou la désignation requiert plusieurs valeurs numériques, elles sont séparées par un trait d'union.

*Si la teneur en élément d'alliage est inférieure à 1%, le codage de son pourcentage en masse n'est plus nécessaire (sauf pour certaines nuances).

*Dans certain cas, un pourcentage supérieur à 1% peut ne pas être codé (par exemple : cas du 35NiCrMo16 ou 1,60<%Cr<2,00) .

* **EN CAS DE DOUTE**, il est important de se référer à la norme.

Symboles chimique	symbole métallurgique	facteur multiplicateur de pourcentage
Cr	C	4
Co	K	4
Mn	M	4
Ni	N	4
Si	S	4
W	W	4
Al	A	10
Be	Be	10
Cu	U	10
Mo	D	10
Nb	Nb	10
Pb	Pb	10
Ta	Ta	10
Ti	Ti	10
V	V	10
Zr	Zr	10
N	N	100
P	P	100
S	F	100
B	B	1000

3).Aciers fortement alliés :

Un acier est considéré comme fortement allié si au moins un de ces éléments d'addition a une teneur supérieure à 5 % en masse.

X 8 Cr Ni 18-9

La lettre X : précise que l'alliage qui va être codé est un acier fortement allié

Valeur numérique : Cette valeur représente le pourcentage de carbone multiplié par 100 ici 8/100 0,08%

Symbole chimiques : Ce sont les symboles chimiques des éléments d'addition placés dans l'ordre décroissant de leur teneur. Ici Cr , le chrome a une teneur > à Ni le nickel

Valeur numérique : la valeur indique la teneur % en masse des éléments d'addition depuis le premier symbole chimique. Ici Cr = 18% et Ni = 9% les valeurs sont séparées par un tiret

N.B. Si une teneur n'est pas indiquée, elle est inférieure à 5%.

Cas des aciers à outils

On appelle acier à outils tout acier servant à mettre en forme un matériau par coupe, par frappe, par pression,... etc.

Dans la norme Française, les nuances d'aciers à outils étaient répertoriées en quatre classes selon le mode de travail de l'outil :

Classe 1 : Aciers non alliés pour travail à froid
Classe 2 : Aciers alliés pour travail à froid
Classe 3 : Aciers alliés pour travail à chaud
Classe 4 : Aciers à coupe rapide

Classe 1 : aciers non alliés pour travail à froid (codage aciers non alliés)

C 140 E2 U Cr4

La lettre C : Cette lettre indique qu'ils'agit d'un acier non allié.
Valeur numérique : il s'agit du pourcentage de carbone multiplié par 100 Ici : 1,4%
Indice de qualité : E : teneur max. garantie en soufre
2 : pourcentage de soufre en 1/100° de pour-cent
Code U : pour acier à outils (Cf. acier non alliés)
Élément d'alliage : symbole chimique suivi de la concentration en 1/10° de %
N.B.
L'acier est codé comme un acier non allié

Classe 2 ou 3 : Aciers alliés pour travail à froid ou à chaud (codage faiblement ou fortement alliés)

Les aciers des classes 2 et 3 se désignent de la même façon que les aciers faiblement alliés et les aciers fortement alliés. Par exemple : 100 Cr6, X 160 CrMoV 5, etc.
Remarque : Rien n'indique ici que ce sont des aciers à outils …

Classe 4 : Aciers à coupe rapide (codage spécifique)

HS 7 - 4 - 2 – 5

Les lettres HS : Ces lettres indiquent qu'il s'agit d'un acier à coupe rapide (HS = high speed)
Valeur numérique N°1 : la première valeur correspond au pourcentage de tungstène.
Valeur numérique N°2 : la deuxième valeur correspond au pourcentage de molybdène
Valeur numérique N°3 : la troisième valeur correspond au pourcentage de vanadium
Valeur numérique N°4 : la dernière valeur correspond au pourcentage de cobalt si elle vaut 0, on ne la note pas.
N.B. :
L'ordre est toujours le même, si un élément d'alliage n'est pas présent, on note la valeur 0
Le pourcentage de carbone n'est pas indiqué
La désignation peut être terminée par une série de lettres, symboles d'un traitement thermique particulier, par exemple. : TQB : trempe étagée bainitique. [4]

Chapitre : II

Les traitements thermiques des aciers

1. Introduction :

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations Combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

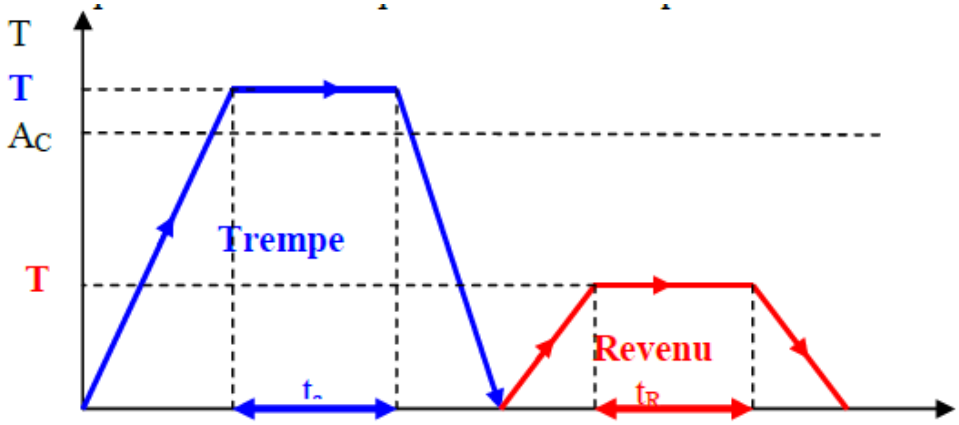
D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limitée élastique, Re, A % en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subit le forgeage. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour les quels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité.

En général les traitements thermiques ne Changent pas la composition chimique de l'alliage.[5]

2.Le cycle thermique :



Le cycle thermique :

Les effets des traitements thermiques, pour une pièce, dépendent :

- de la température maximale
- de la durée de maintien de la pièce à cette température
- du milieu dans lequel se trouve la pièce à cette température
- de la vitesse de variation de la température lors du chauffage et surtout lors du refroidissement

• des dimensions de la pièce à traiter (effet de masse).

3.Les traitements thermiques de l'acier :

Nous présentons dans cette section les principaux types de traitements thermiques liés à l'acier offerts sur le marché. Ceux-ci sont exposés sous forme de fiches signalétiques dans Les quelles on retrouve de l'information sur le but du traitement, sur le champ d'application, le cycle thermique et les technologies de chauffe qui y sont associés.

3.1 Définitions et procédés des traitements thermiques :

3.1.1 L'austénitisation :

L'austénitisation consiste d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés (30-50°C) au-dessus de son point de transformation. Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritique (α, cc) en austénite (γ, cfc) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.

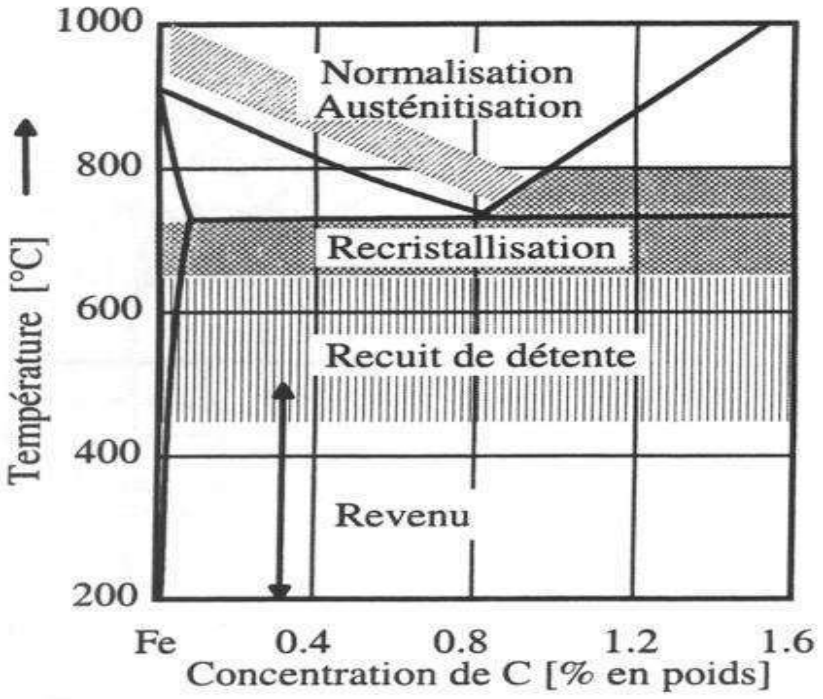


Figure 2.1 : Domaines de températures d'austénitisation et d'autres traitements thermiques des aciers au carbone [6]

3.1.2 La Trempe :

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine.

La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur

en carbone de l'acier; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C. La trempe s'effectue en général soit :

3.1.2.a) Trempe à l'eau :

L'eau constitue le milieu de refroidissement le moins cher qui permette, dans la pratique de tous les jours, de réaliser les refroidissements les plus énergiques. Toute fois, il faut noter qu'au cours d'une trempe à l'eau la vitesse de refroidissement n'est pas constante. L'eau a l'avantage de faire éclater la calamine au début du refroidissement et donc de nettoyer la surface et d'améliorer l'échange thermique.
Lorsque la géométrie de la pièce le permet, l'eau peut former facilement des bulles de vapeur prisonnières qui ralentissent localement le refroidissement du métal et donnent naissance à des points doux ; la circulation de l'eau, l'agitation de la pièce ainsi que sa présentation doivent donc être adaptées. Si la température de l'eau s'élève, son pouvoir refroidissant diminue très sensiblement (la période de caléfaction est prolongée).

Ainsi donc, l'exécution d'une bonne trempe à l'eau exige le contrôle permanent :
- de la température de l'eau
- de l'agitation des pièces
- de la circulation de l'eau et de son renouvellement éventuel. Par ailleurs, il est nécessaire d'éviter toute contamination de l'eau par des produits étrangers (sels notamment), qui changerait sa sévérité de trempe et empêcherait d'obtenir des résultats constants. [7]

3.1.2.b) Trempe à l'huile :

Il existe une très grande variété d'huiles de trempe qui peuvent différer :
- par l'huile de base (minérale ou synthétique)
- par les additifs qu'elles contiennent, additifs qui ont pour objet soit de modifier le pouvoir refroidissant, soit d'améliorer certaines propriétés (notamment la résistance à l'oxydation). [7]

Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante; elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée et généralement comprise, suivant les propriétés de l'huile considérée, entre 400 et 600 °C, soit à un niveau bien supérieur à celui correspondant à la trempe à l'eau. La viscosité de l'huile diminue quand sa température augmente .

3.1.2.c) Trempe à l'air :

Est le cas le plus simple à mettre en ouvre et il doit être choisi en priorité dans le cas des aciers à outils de bonne trempabilité, car les risques de déformations sont d'autant plus grandes que le monde de refroidissement est plus rapide .

Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier.

Pour les aciers au carbone , la trempe se fait dans l'eau de 20-40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérant à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente.

Le refroidissement rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable. [7]

L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion.

Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, appelés plans d'accolement, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de même orientation.

Un plan d'accolement est un plan cristallographique dans lequel la disposition des atomes est aussi identique que possible dans l'ancienne et la nouvelle structure (minimum de distorsion).

Lors de la transformation les atomes ne se déplacent que d'une distance nettement inférieure au paramètre de la maille.

L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation $\alpha - \gamma$. Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagramme de transformation de l'austénite en conditions isothermes, Température - Temps - taux de Transformation, Figure 2.2) et surtout des TRC (diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, voir Figure 2.3**)** dans le cas des trempes. [7]

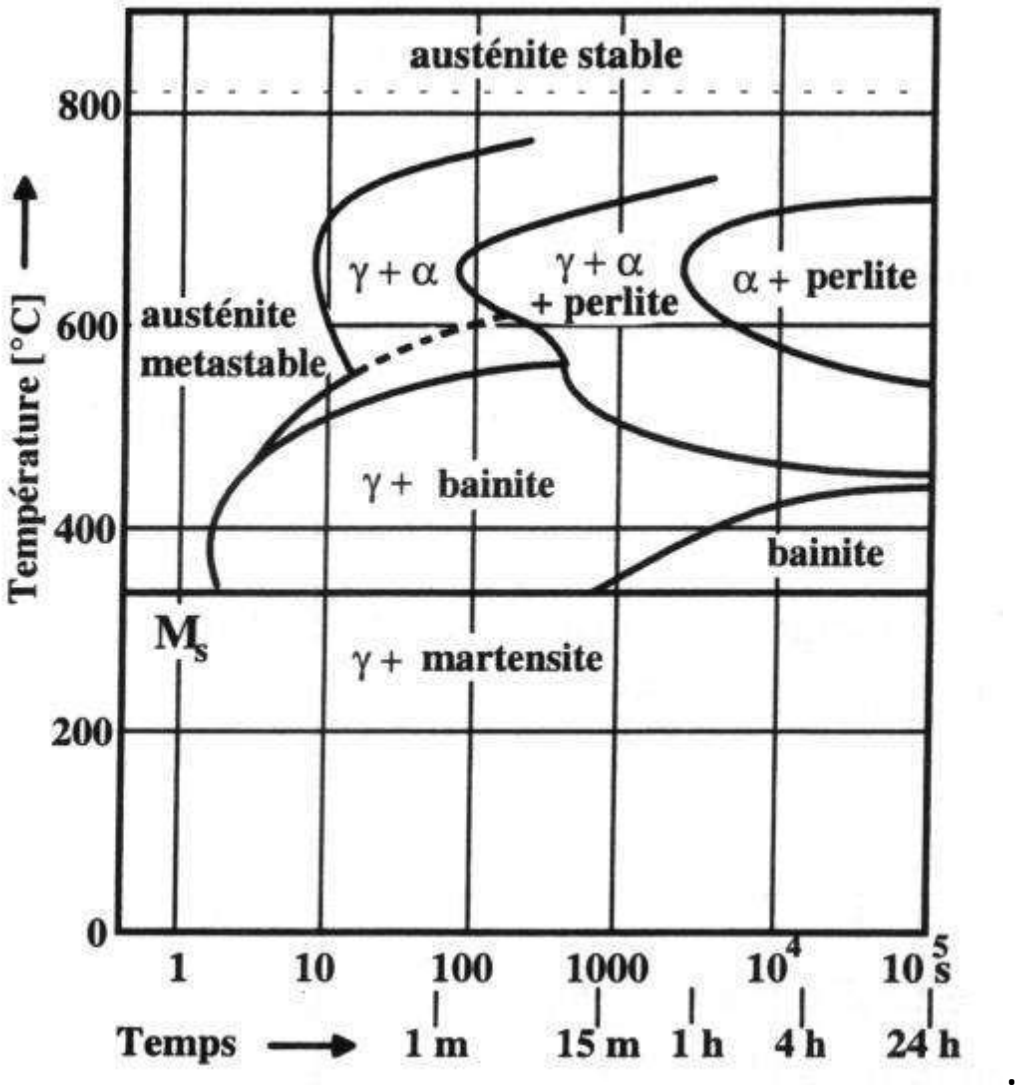


Figure 2.2 : Courbe TTT (acier faiblement allié 0,42 % C) : Ce diagramme se lit en suivant une isotherme. [6]

2.1.3 Le Revenu :

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité.

Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le coeur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe). [6]

D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance

lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

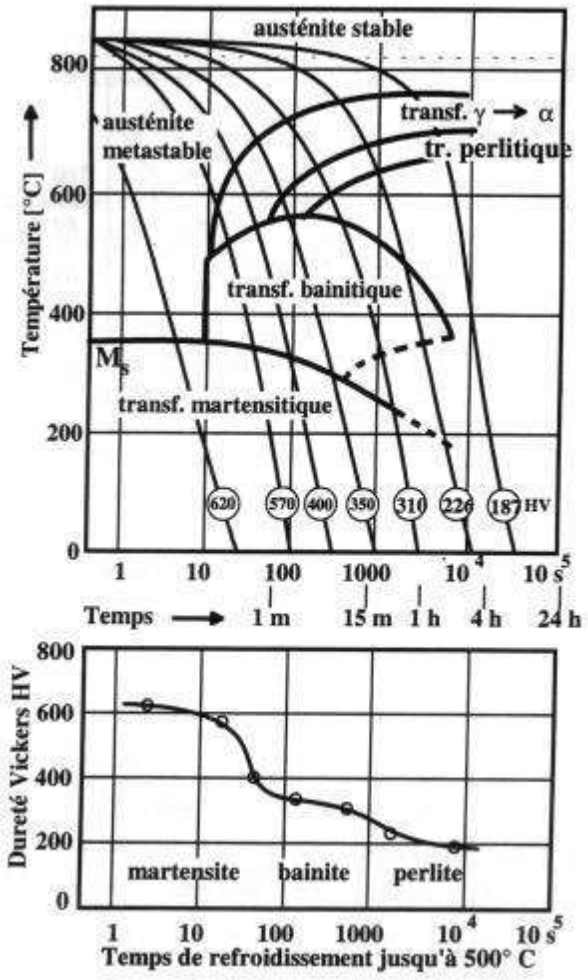


Figure 2.3 : Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement [6]

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers unétat d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 01 h sont représentées dans le diagramme de revenu et qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier.

Le diagramme montré en Figure 2.4 correspond à celui d'un acier d'amélioration que l'on utilise pour la réalisation des pièces de construction fortement sollicitées (arbres, engrenages).

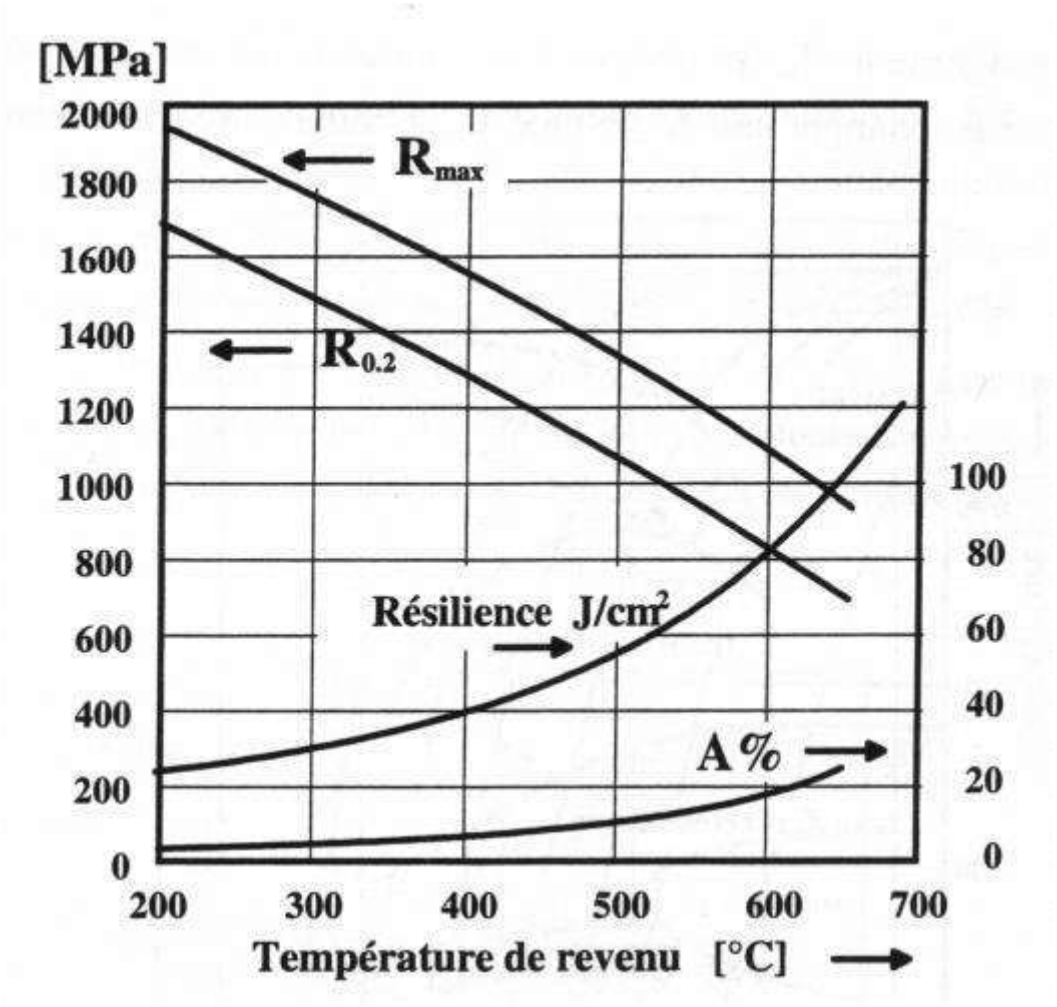


Figure 2.4 : Diagramme de revenu de l'acier 42CrMo4.
Évolution des propriétés en fonction de la température de revenu (température de trempe 820°C) [6]

2.2 Recuit et traitements connexes :

Au cours de son histoire, un acier peut se trouver dans des états hors équilibre provoqués par des traitements thermiques ou mécaniques antérieurs (ségrégation au cours du processus de solidification, écrouissage par déformation à froid, contraintes de soudage, etc.). Un certain nombre de traitements thermiques sont adaptés à la réduction, voire à l'élimination des effets nefastes de tels etats, en vue d'operations ultérieures du matériau ou de son utilisation appropriée de mise en service.

Parmi ces traitements, les recuits forment un ensemble visant l'obtention d'etats proches de l'equilibre stable.

Le cycle thermique de traitement comprend:

- un chauffage jusqu'a une temperature dite de traitement dependant du type de "correction" à réaliser;
- un maintien isotherme à la température de traitement;
- un refroidissement a l'air calme ou au four selon les besoins [7]

2.2.1 Types de recuit :

2.2.1.a)Recuit de normalisation :

Chauffage dans le domaine austénitique (50°C au-dessus de la température d'austenitisation, A_3) et maintien pendent environ une heure suivi d'un refroidissement a l'air. La structure obtenue est un melange de ferrite et de perlite fine. Une microstructure uniforme (affinement du grains) et une amélioration des proprietes de l'acier après une déformation à chaud sont recherchées. [7]

2.2.1.b) Recuit complet :

Semblable à la normalisation ce traitement est toutefois destiné à l'obtention d'une perlite plus grossière et à un adoucissement plus marqué des propriétés; le refroidissement est dans le four. [7]

2.2.1.c)Recuit de coalescence :

Chauffage et maintien prolongé à une température légèrement inférieure à la température de début de transformation A_1. L'obtention d'une perlite globularisée est visée, afin de rendre les aciers durs plus facilement usinables. La structure obtenue est moins dure que celle d'une perlite lamellaire. [7]

2.2.1.d) Recuit de recristallisation :

Chauffage dans le domaine ferritique (entre 500 et 700 °C) et contrôle du refroidissement; ce traitement est appliqué aux produits déformés à froid afin d'éviter les structures d'ecrouissage et faciliter ainsi une mise en forme ultérieure. [7]

2.2.1.e) Recuit de détente :

Chauffage dans le domaine ferritique (entre 500 et 650 °C) avec refroidissement lent. Ce traitement est destiné à réduire, voire éliminer les contraintes internes engendrées au cours de la fabrication. [7]

2.2.1.f) Recuit d'homogénéisation :

Lors de la première solidification, des phénomènes de ségrégation ont lieu se traduisant par une répartition hétérogène a l'echelle du grain austenitique des éléments d'addition et du carbone. Cette hétérogénéité chimique, qui se conserve . [7]

Chapitre III:

Matériau et méthode expérimentales

3.Le matériau utilisé :

Le matériau utilisé est un acier de construction faiblement allié au chrome-molybdène pour trempe et revenu. Il présente une bonne trempabilité à l'eau, bonne résistance aux surcharges à l'état traité. C'est un acier à usinabilité améliorée, apte au chromage. Acier tés employé en mécanique, pour des pièces de moyennes à fortes sections : croisillons, arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles, pignons. Son aptitude à la trempe par induction le prédestine à la fabrication des pièces trempées superficiellement, sa dureté superficielle atteindra au minimum 53 HRC (580 HV). Son aptitude à la trempe par induction le prédestine à la fabrication des pièces trempées superficiellement, sa dureté superficielle atteindra au minimum 53 HRC (580 HV). [8]

3.1. Désignations normalisées :

UNI 7845	DIN 17200	ISO 683-1	AFNOR 35-552	AISI-SAE
42CrMo4	42CrMo4	42CrMo4	42CD4	4140

Tableau 3.1 la Désignations normalisées

Dans l'entreprise ils ont utilisé la norme DIN, la nuance utilisée pour la fabrication de croisillon différentiel est livrée sous forme d'une barre cylindrique 22 mm de diamètre et de 1.75 m de longueur à l'état trempé revenu à haute température. [8]

3.2. Analyse chimique moyenne :

eléments	C%	Si %	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%
% en poids	0.38/0.45	0.40 au max	0.60/0.90	0.035 au max	0.035 au max	0.90/1.20	0.15/0.30

Tableau 3.2 ***Composition chimique moyenne de la nuance.***

3.3.PROPRIETES :

a)Soudabilité:

Mauvaise soudabilité à cause du danger élevé de formation de criques.

B)Aptitude à la trempe:

Moyenne-bonne aptitude à la trempe, apte aussi pour les emplois à chaud jusqu'à la température de 500°. Apte à la trempe en huile.

c)Caractéristiques mécaniques moyennes (état trempé revenu) :

Rm	Re	A%
750/1300 N/mm²	500/900 N/mm²	10/14

3.4. La gamme de traitement thermique :

3.4.1. La trempe

Une charge de15pièces enfournée dans un four de trempe à chambre pendant (30 min) (la montée de température) pour égaliser la température de coeur avec celle de surface jusqu'à une température de 820C˚ (la température d'austénitisation de la nuance 42CD4), a cette température les pièces sont maintenues durant (30min,45min et 1 heur) en suite elles sont trempées dans un bain d'eau . [8]

3.4.2. Le revenu :

La charge donc enfournée dans un four de revenu à une température de 550C˚. (Figure 3.1) Le revenu est donc pratiqué après l'opération de trempe (Ce traitement double est appelé amélioration) qui améliore, par rapport à l'état normalisé (Recuit), les limites de rupture et d'élasticité, la striction et surtout la résilience. Cela consiste à réchauffer de nouveau le métal (souvent 550C˚) après une trempe énergique pour augmenter son usinabilité en lui rendant de la ductilité.

Comme l'opération de trempe, le réchauffement de l'acier provoque une modification de sa structure (de la martensite à la sorbite). L'effet le plus remarquable du revenu est la diminution notable des contraintes internes existant dans la pièce suite à la trempe. On obtient ainsi des caractéristiques de résistance et de ductilité bien équilibrées. [8]

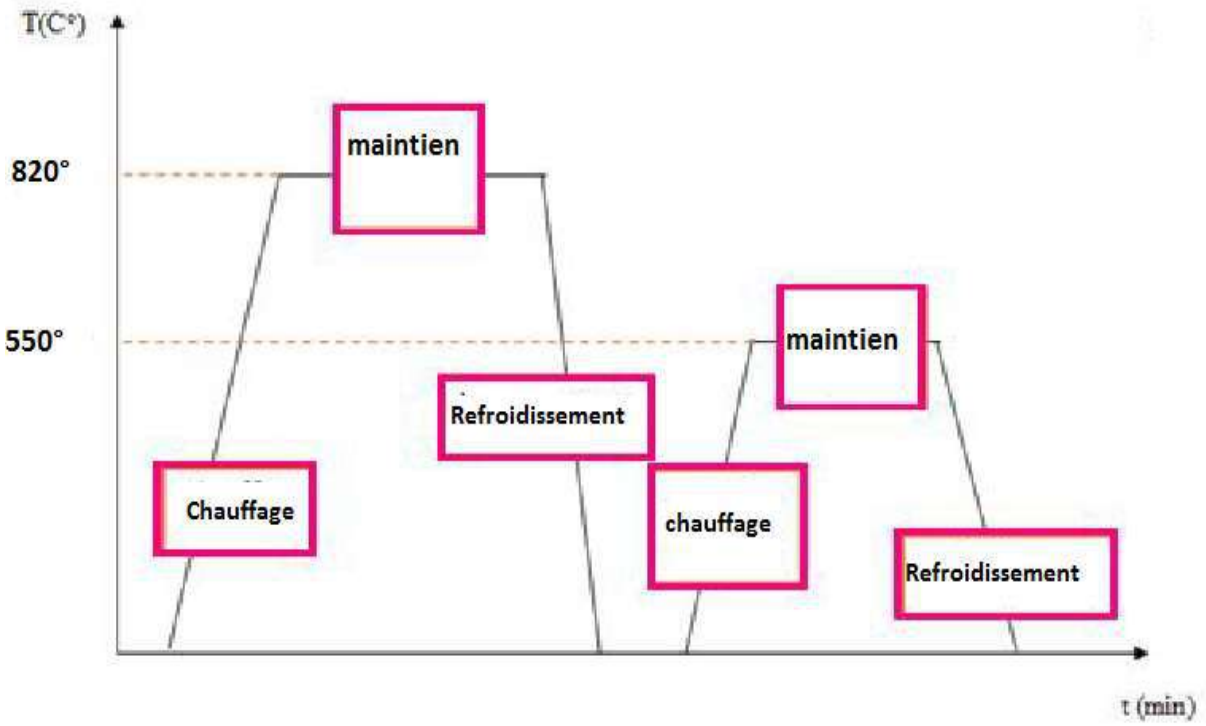


Figure :3.1 le cycle de traitement

3.5.Essai de traction :

3.5.1. Objectifs de l'essai :

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. Cette dernière, gouverne le processus majeur de mise en forme, par ou sans enlèvement de matière, des matériaux dans la plus part des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique. [9]

3.5.2. Principe de l'essai :

Des éprouvettes du matériau concerné, en forme de barreau cylindrique ou prismatique comportant une partie centrale calibrée à section constante S0 et longueur L0 raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction. Sauf indications contraires, l'essai est effectué à la température ambiante dans les limites comprises entre 10°C et 35°C. Des essais de traction peuvent être effectués à des différentes températures allant de la température cryogénique à celle des hautes températures inférieures à la moitié de la température de fusion pour modéliser le comportement du matériau en fonction de la température. [9]

3.5.2.1 Eprouvette :

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la forme et des dimensions des produits métalliques dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques. L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement d'un produit ou d'une ébauche moulée. Cependant, les produits de la section constante (profilés, barres, files, etc.), ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (par exemples : fontes, alliages non ferreux) peuvent être soumises à l'essai sans être usinées.

Les éprouvettes usinées doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée lorsque celles-ci sont de dimensions différentes. Les dimensions de ce congé peuvent être importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la spécification du matériau. Les têtes de fixation peuvent être de toute forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine. Les éprouvettes non usinées (par exemple celles brutes fonderie) doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée. Les dimensions de ce congé sont importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la norme de produit.

On note :

***S0** : section initiale en mm2*
***Su** : section minimale après rupture*
***L0** : longueur initiale entre repères*
***Lu** : Longueur ultime après rupture*
***LC** : longueur de la partie calibrée*

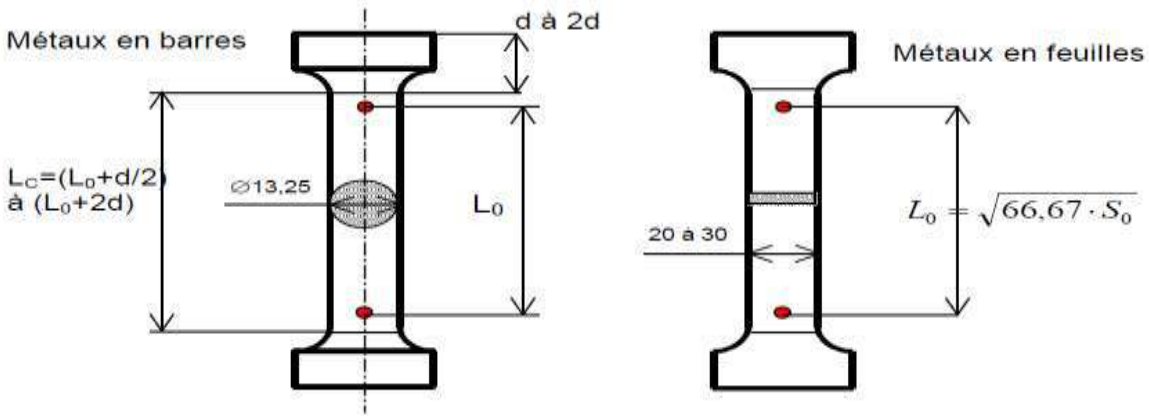


Fig3. 2. ***Dimension de l'échantillon pour l'essai de traction***

Tous les paramètres qui sont déduits de l'essai de traction traduisent les propriétés de l'acier dans la direction de l'essai. Ces valeurs dépendent donc de la direction de prélèvement de l'éprouvette par rapport à d'éventuelles directions d'anisotropie (par exemple en carrosserie, la direction de laminage de la tôle mince). Pour les tôles laminées, la direction de prélèvement doit donc toujours être précisée :

- •Sens long SL (repéré par l'indice 0°)
- • Sens travers ST (repéré par l'indice 90°)
- • Sens "oblique" (repéré par l'indice 45°).[9]

3.5.2.2. Exécution de l'essai :

Une machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré soit par une commande hydraulique, soit des vis sans fin. La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre. Ceci, permettra d'aboutir à des résultats d'enregistrement de la courbe brut de traction, **F=F(Δl)**, caractéristique de l'échantillon et de sa géométrie. [9]

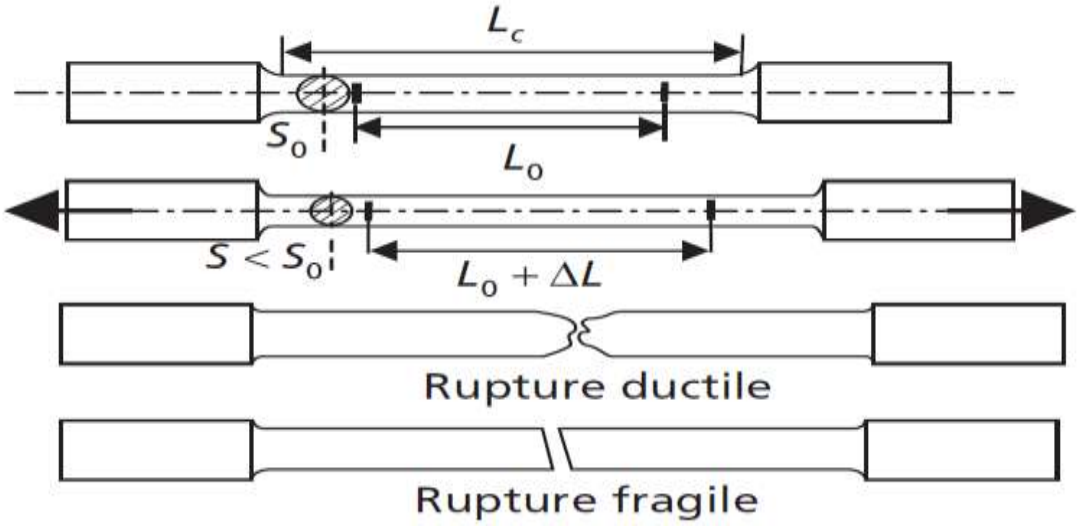


Fig. 3.4. Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai.



Fig. 3.5. Machine de traction

3.5.3 Exploitation des résultats de l'essai :

3.5.3.1. Courbe conventionnelle :

Afin de pouvoir utiliser les courbes brutes de traction, on doit les modifier pour que les résultats obtenus soient fonction que de matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette. Pour ce faire, on rapporte la charge **F**(N) à la section initiale S0 (mm2) de l'éprouvette en vue d'obtenir la contrainte conventionnelle σc(MPa). Et on rapporte l'allongement $\Delta 1$ (mm) à la longueur initiale, l_0, pour obtenir la déformation conventionnelle (ε_c), soient :

$$\sigma_C = \frac{F}{S0} \quad [\text{Mpa}] \qquad \varepsilon_c = \frac{\Delta l}{\Delta l0} \quad [\%]$$

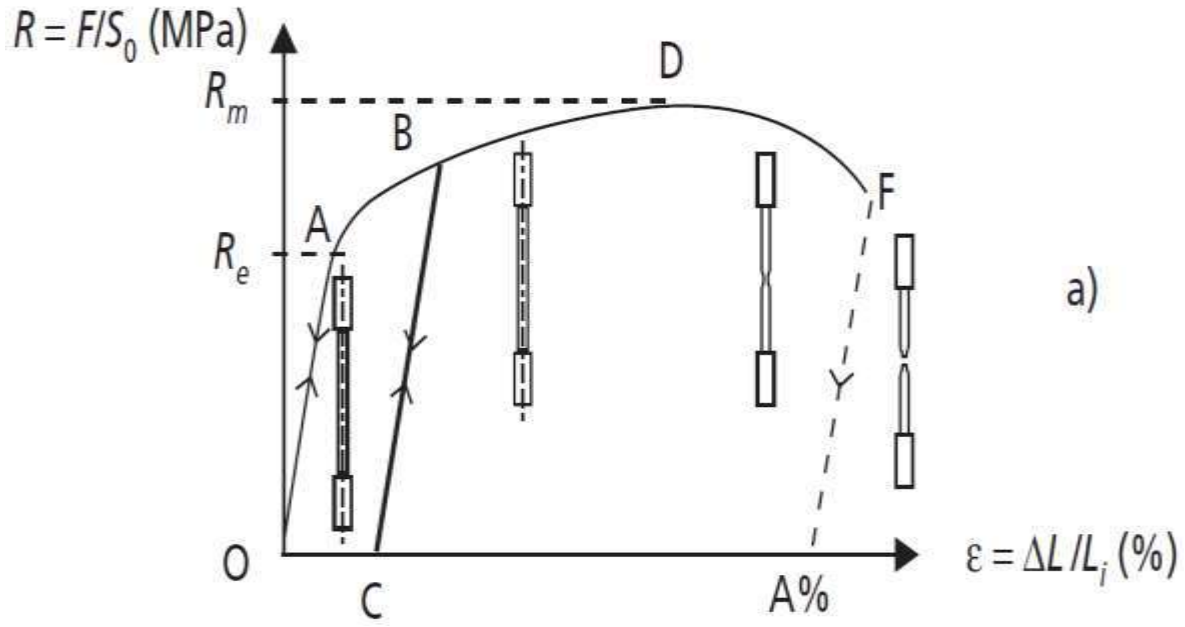


Fig. 3.6. Courbes conventionnelles typiques de traction

OA : allongement élastique linéaire, réversible.
Au-delà de A : déformation plastique permanente + déformation élastique.
La suppression de la force appliquée (BC) laisse apparaître un allongement plastique rémanent **(OC).** Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (CB).
Re = Fe/ S0 : limite apparente *d'élasticité (MPa) :*

$$\sigma_C = \frac{F}{S0}$$

Rp0,2 : limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement plastique; sa détermination nécessite souvent l'usage d'un extensomètre.
AD : allongement élastique + allongement plastique réparti.
Rm = Fm/S0 : résistance à la traction (MPa).
DF : apparition et progression d'une striction (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles. En F : la rupture de l'éprouvette.
Z% : Coefficient de Striction, Avec **Su** : la section à la rupture :

$$Z\% = 100 \times \frac{S_\circ - Su}{S_\circ}$$

A % = ΔLu/Li : allongement pour cent après rupture (%) :

$$A\% = 100 \times \frac{Lu - L_\circ}{L_\circ}$$

E = Re/εe : module de Young. En pratique, seule l'utilisation d'un dispositif extensométrique très précis permet d'exploiter la pente de la montée élastique pour la mesure de E. [9]

3.6. Essai de dureté :

3.6.1. Objectif et principe de dureté :

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière est fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, le frottement pénétrateur-surface indentée, la géométrie de pénétrateur, ses propriétés mécaniques et la charge qui y est impliquée. Le tableau 2. Résume les caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté utilisée : la dureté Brinell (HB), la dureté Vickers (HV), les duretés Rockwell C et B (HRC et HRB). Bien que les valeurs de dureté soient données sans dimensions, les duretés Brinell et Vickers, de par leur définition, sont homogènes à des contraintes. [10]

3.6.2. Eprouvettes :

La surface de l'éprouvette doit être propre, plane et lisse soigneusement préparée. Plus des dimensions du pénétrateur sont petites, plus l'état de la surface doit être lisse. Une application du polissage en mode automatique est parfois obligatoire. La préparation de l'éprouvette doit être faite sans provoquer des altérations des propriétés du matériau dues, par exemple, au chauffage ou à, l'écrouissage.

L'épaisseur de l'éprouvette doit être suffisante pour qu'aucune trace d'une déformation ne soit visible sur la surface opposée à celle de l'application de la charge. D'après une règle générale, l'épaisseur minimale est au moins dix fois supérieure à la profondeur de l'empreinte. [10]

3.6.3. Exécution de l'essai :

On emploi pour l'exécution de l'essai un dispositif qui est suffisamment rigide et stable. L'essai doit être fait sans choc et sans vibrations, autrement les résultats sont erronés. L'éprouvette doit être installée sur un support rigide du dispositif pendant l'action de la charge.

Les essais les plus courants se font par pénétration, les essais les plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell. [10]



Fig. 3.7.MACHINE ESSAI Rockwell [11]

Mode Opératoire (Cas de l'essai Rockwell) :

- Préparer de la surface à tester
- Monter l'indenteur adéquat
- Régler la charge et les paramètres d'essai
- Monter l'éprouvette sur son support (de révolution ou plate)
- Appliquer la pré-charge de 10N (Indication lumineuse)
- Appliquer la charge de l'essai en appuyant sur la manette
- Retirer la charge
- Lire la valeur de dureté correspondante
- Pour la précision de la mesure : effectuer au moins 3 reprises pour chaque essai.

3.7.Essai Rockwell :

3.7.1.Principe de l'essai :

le pénétrateur est soit une bielle en acier trempé, soit un cône en diamant, et la charge d'essai peut prendre plusieurs valeurs. La dureté définie à partir de la différence de profondeur de pénétration après application de la charge. Le pénétrateur est appliqué sur la surface de la pièce avec une précharge F0=10kg.

Il descend alors à un niveau qui sert d'origine aux mesures de profondeur ultérieures

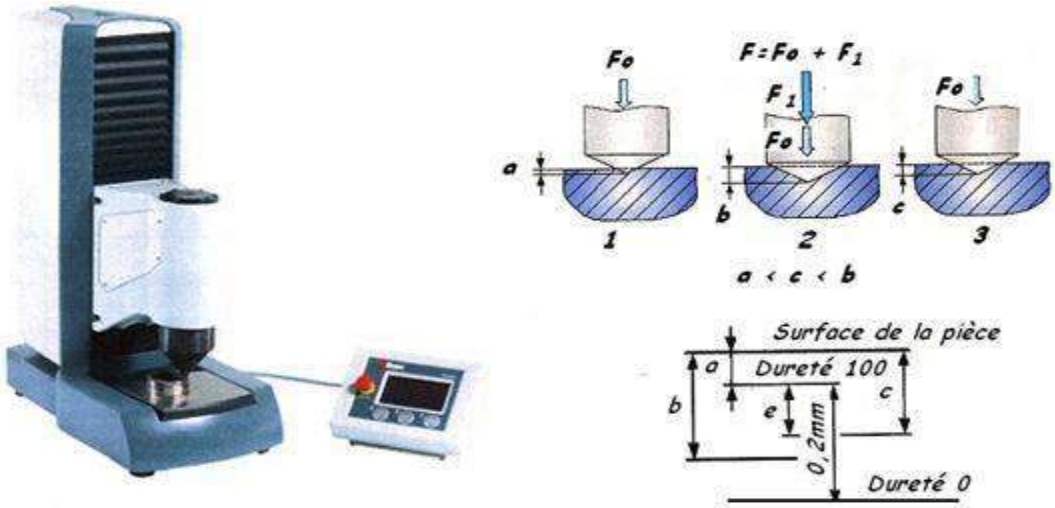


Fig3.8. Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell : Cas d'un Rockwell C

- Une surcharge F1=140kg est appliquée, pour atteindre la valeur de la charge totale F
- La surcharge est retirée, entraînant une remontée du pénétrateur (retour élastique)
- On mesure alors à l'aide d'un comparateur l'accroissement h de la profondeur de pénétration, entre le début et la fin de l'essai sous précharge F0.

La dureté Rockwell, noter HRC dans la figure 1.14, est un nombre sans dimension compris entre 0 et 100 (ou 130), défini comme le complément de h à une profondeur de référence de 0.2mm (respectivement 0.26mm) partagée en cent (respectivement 130) graduation identiques. [11]

3.8.Examens Métallographiques:

L'examen métallographique à pour but la mise en évidence de la microstructure de l'échantillon. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies attaquées chimiquement. L'obtention de ces surfaces nécessite une suite d'opérations allant du prélèvement des échantillons à l'attaque chimique. Dans ce qui, nous donnons le détail de chaque opération. [12]

3.8.1.Examens Macrographique:

a)Introduction :

L'attaque chimique d'un échantillon pour relever la structure macrographique fait apparaître entre les zones constitutives de la soudure qui se manifestent par des intensités d'attaque ou de coloration différentes les unes des autres. Ces différences traduisent les variations de constitution et de structure engendrées par l'opération de soudage.

De plus l'examen macrographique fournit des informations sur les anomalies (défauts) géométriques, compte tenu des renseignements qu'il fournit l'examen macrographique des soudures sont utilisé pour diverses raisons

b)Découpage des échantillons:

De chaque eprouvette nous avons prélevé une éprouvette.

c)Polissage:

Après le découpage, nous passons les éprouvettes sur une surfaceuse à disque abrasif (polisseuse). C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui d'un miroir. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques en papiers abrasifs de différentes granulométrie des grains abrasif en carbure de silicium (du plus gros au plus fin : 180, 400, 600, 800, 1000, 1200 et 4000) qui tournent avec une vitesse de 150 tr/mn, cette opération se fait sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon.

Le polissage fin est terminé de finition à la pâte diamantée répartie sur un feutre fin imbibé d'éthanol. Après chaque polissage les échantillons sont nettoyés à l'éthanol.





Figure 3.9:appareil de polissage

d)Attaque chimique:

Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance pour mettre en évidence les structures. Cette opération donne une différence de couleur entre les différentes phases, car elle est directement liée à la différence de vitesse de réaction des constituants.

Le réactif chimique utilisé pour notre acier (acier faiblement allié) est le Nital 4 % (4 ml d'acide nitrique et 100 ml d'éthanol) une fois étalée sur la surface de l'échantillon, un temps de maintien de 2 à 5 seconds est respecté; cette opération doit être suivie d'un rinçage à l'eau distillée. [12]

3.8.2.Microscope métallographique

L'ensemble des observations métallographiques ont été réalisés au microduromètre (Zwick HV 10 et *Zwick-M et ZHV2-M)* .Pour le microduromètre Zwick HV 10 est équipé d'une caméra CCD, l'ensemble et relié à un ordinateur qui permet le traitement des images. [12]

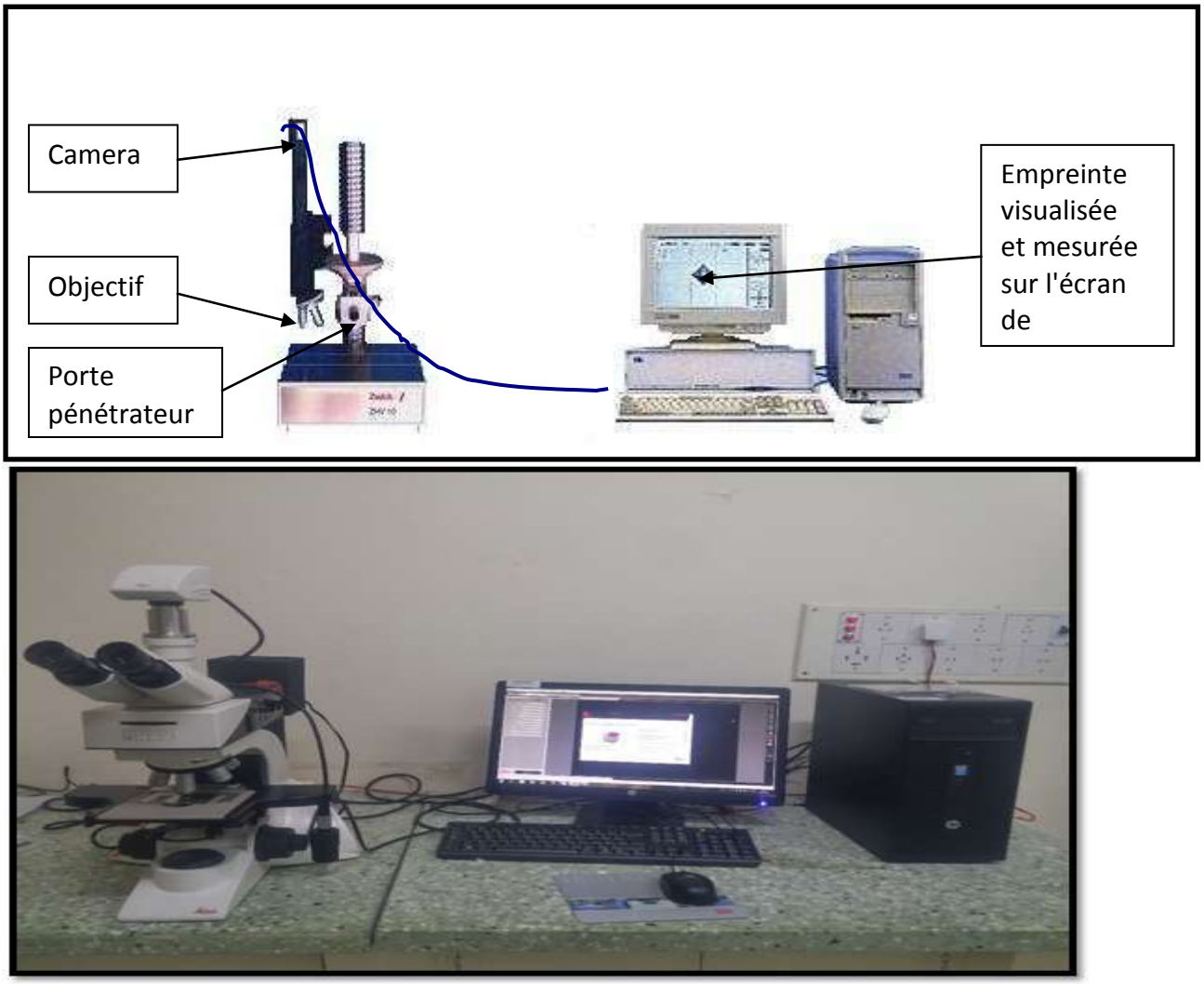


Figure 3.10: microduromètre (Zwick HV 10 et Zwick-M et ZHV2-M) **[12]**

3.8.3.Examen au microscope:

La métallographie microscopique a pour but de mettre en évidence les constituants de la microstructure. La microscopie est faite à l'aide d'un microscope optique utilisant une source lumineuse qui envoie la lumière sur l'échantillon à travers un dispositif optique. Les rayonnements réfléchis par l'échantillon sont repris par la lentille objective qui donne une première image intermédiaire qui grâce à un miroir semi-réfléchissant, elle est renvoyée vers l'œil du manipulateur à travers une lentille oculaire. L'appareil permet également d'obtenir des photos sur un microordinateur à travers une caméra solidaire. [12]

Chapitre IV :

Résultats expérimentaux et interprétation

4-1. Introduction :

L'expérience est complément essentiel à la théorie et représente l'argument de toutes lesquestions du comportement mécaniques des aciers avant et après traitement thermique.

Dans cette étape on a pu faire une série d'expérience (analyse chimique, traction, Dureté et Microscope optique). Les résultats sont enregistrés et commentés convenablement.

4-2. Résultats obtenus :

- 1^{ér} échantillon représenté acier 42CrMo4 avant le traitement thermique ou l'acier à l'état recuit
- Les échantillon (1.2.3) représentés acier 42CrMo4 pendant à température d'austenisation (820 °C) du temps de maintien (30,45,60 min) et trempe dans l'eau.
- Les échantillons (4.5.6) représenté acier 42CrMo4 pendant à température d'austenisation(780,820,850 °C) du temps de maintien (45min) et trempe dans l'eau
- Les échantillons(7,8,9)représenté acier 42CrMo4pendant à température d'austenisation (850 ,760°C) trempe étagé du temps de maintien (30,45,60 min) et trempe dans l'eau.
- Pour trouvée les résultats suivant on à appliquée le revenu pendant 550 °C.(voir page 31)

4-2-1 Résultats avant traitement :

Résultats obtenus par essai detraction

Ø$_o$ (mm)	**S$_o$ (mm²)**	**l$_o$ (mm)**	**Fe (Kg.F)**	**Re (N/mm²)**	**Fm (Kg.F)**
5	**78.5**	**50**	**42**	**524.3**	**52**

Rm (N/mm²)	**Lu (mm)**	**A (%)**	**Ø (mm)r$_o$**	**Su (mm²)**	**Z (%)**
650	**56**	**12**	**3.5**	**38.5**	**51**

Résultats obtenus par essai de dureté :

- **HR 5/750/20 : 229**
  5 : Ø de la bille
  750 : la charge
  20 : maitien 20 s
- **HRC : 19**

Résultats mecrscopique

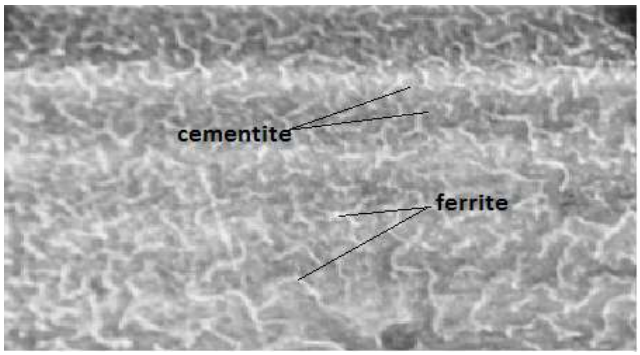
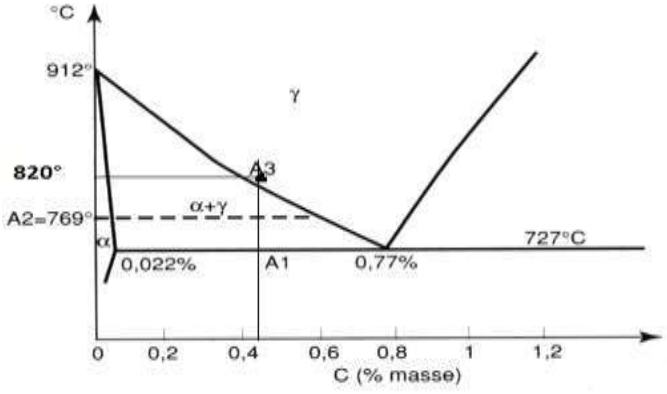


Figure 4.1 :résultats mecrscopique avant traitement

Selon le diagramme d'equilibre
pour lire le diagramme d'equilibre il faut utiliser Fe carbonne Equivalent

Ceq= C + $\frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cr+Ni}{15}$

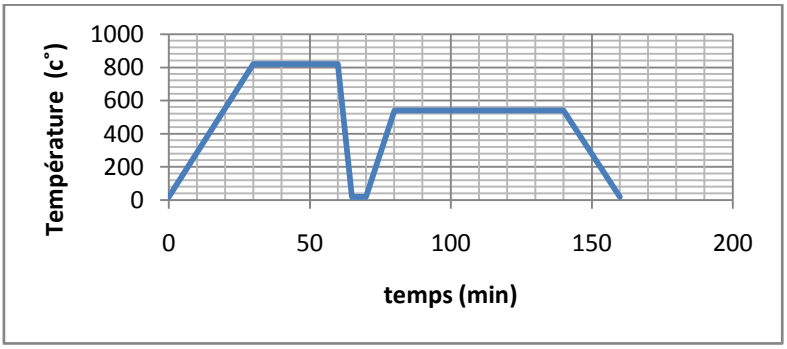


Par la régle des réjuent inversse . nous donner % ferrite et le % perlite en terme de consultation et le % ferrite (Fe.Cr)3c en terme de phase.

La microstructure est contitueé d' une phase de cementite modifieé dans une matrice de ferrite (Fe. Cr)3c+α

4-2-2 résultats de traitements de trempe (température d'austénisation) T°= 820°C

a/ Temps de maintien 30 min :



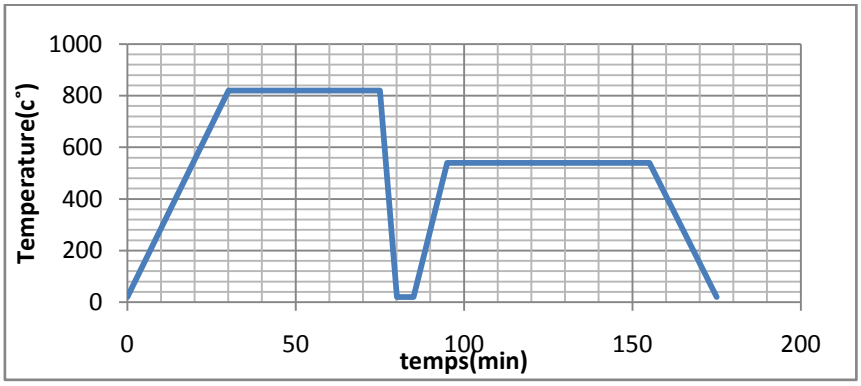
a l'etat le materiau : est a l'etat (Fe.Cr)3c+α
aprés austenitisation :100% austenite
aprés trempe : martensite + austenite residuelle

aprés revenu : martensite de revenu(dégajemment de carbure) + austenite residuelle + (Fe.Cr)3c localisé

Résultats de l'essai de dureté :

- **HRc : 32**

b/Temps de maintien de 45 min



Résultats expérimentaux d'essai de traction

Ø$_0$ (mm)r	S$_0$ (mm²)	l$_0$ (mm)	Fe (Kg.F)	Re (N/mm²)	Fm (Kg.F)
5	78.5	50	50	624	84

Rm (N/mm²)	Lu (mm)	A (%)	Ø (mm)r$_0$	Su (mm²)	Z (%)
1048	54	8	4	50.24	36

Résultats expérimentaux d'essai de dureté :

- **HRC : 34**

Résultats mecrscopique

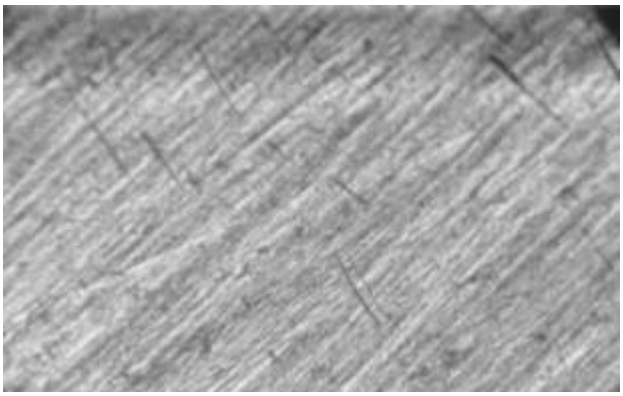
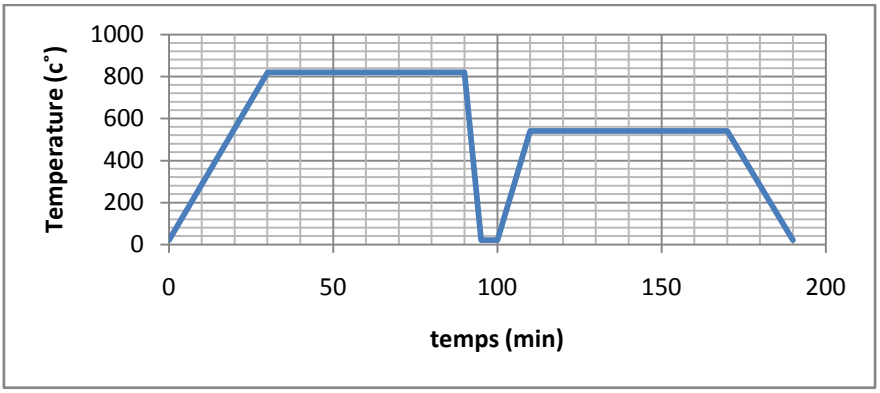


Figure 4.2:Résultats mecroscopique aprés traitements T°= 820°C Temps de maintien de 45 min

c/ Temps de maintien 60 min

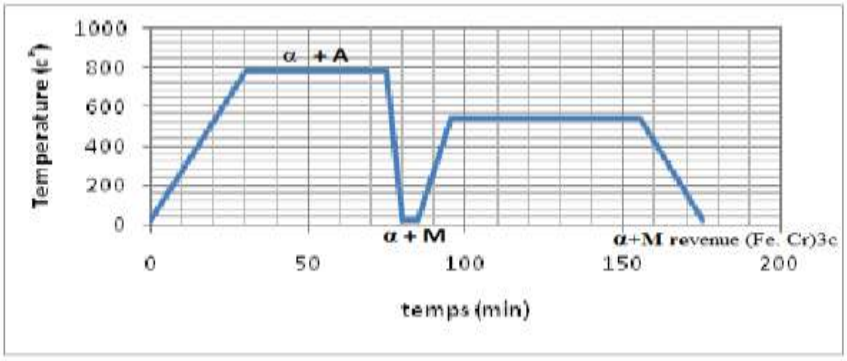


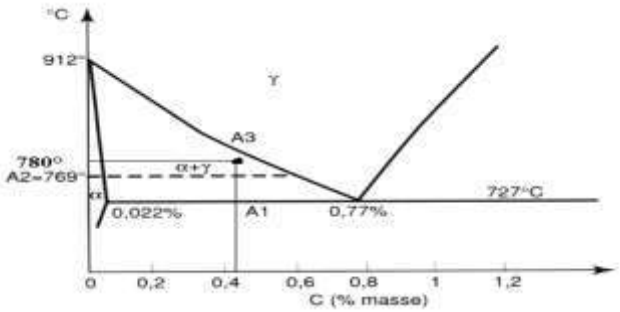
Résultats expérimentaux d'essai de dureté :

- **HRc : 33**

4-2-3 Résultats de Traitement de trempe pour différent température de chauffage

a/ Température de chauffage T°= 780°C avec un temps de maintien de 45 min





L'etat unitaile :(Fe.Cr)3c+α 0% c $\xrightarrow{700°} \alpha_{0.02\%} + A_{0.55\%}$

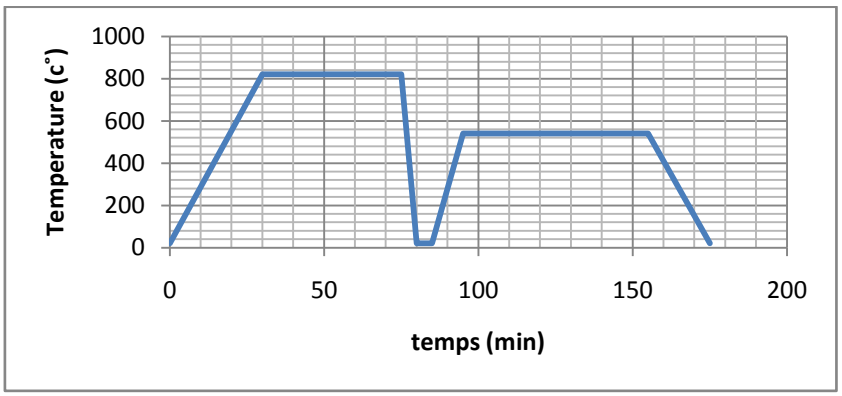
à la trempe α + M → au revenu (780˚)

$\alpha_{0\%c}$ + martansite de revenue + (Fe,Cr)3c

Résultats expérimentaux d'essai de dureté :

- **HRc : 32**

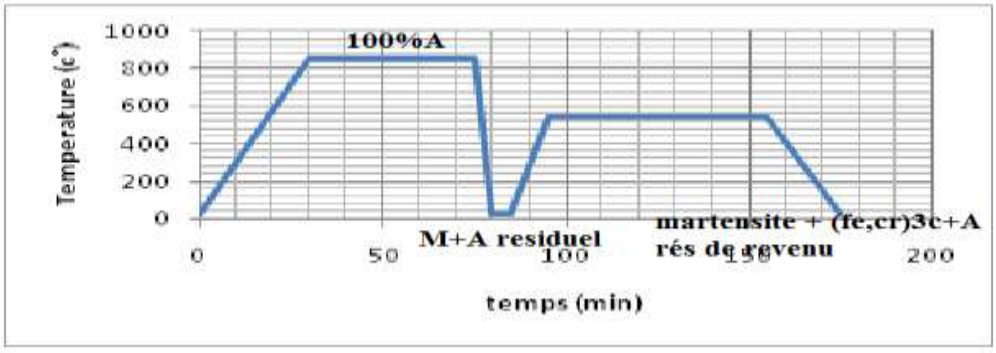
b/ Température de chauffage T˚= 820˚Cavec un temps de maintien de 45 min



Résultats expérimentaux d'essai de dureté :

- **HRc : 32**

c/ Température de chauffage T˚= 850˚C avec un temps de maintien de 45 min



T° :d' austenitisation ↑ dissolution αu c, et αu

Cr ↑ → Ms↓ → le taux d'austenite residuelle ↑ → HRc ↓ parapport à 820°

Avec unmartensite plus dur que la martensite optenu à 820°

Résultats expérimentaux d'essai de dureté :

- **HRc : 31**
  Résultats mecrscopique

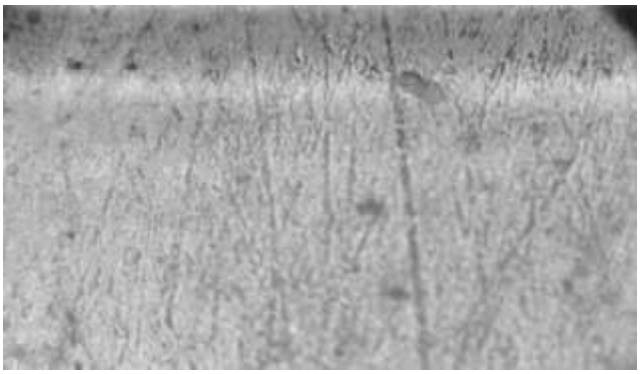
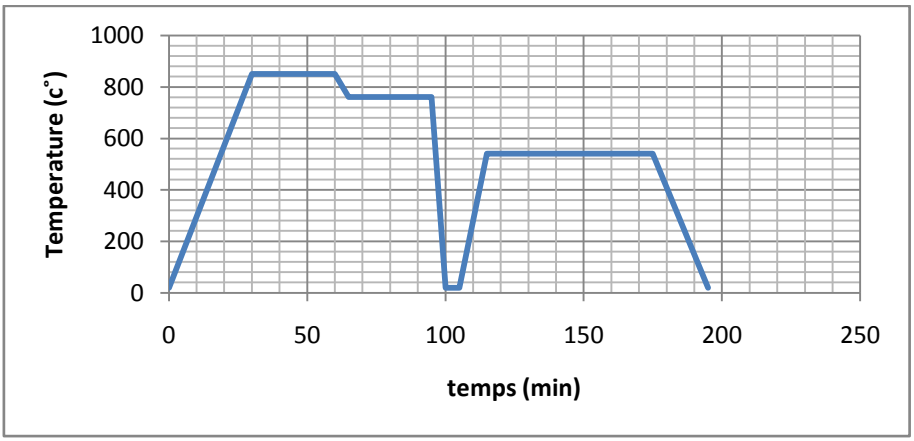


Figure 4.3:résultats mecroscopique aprés traitements T°= 850°C Temps de maintien de 45 min

4-2-4 Traitement thermique de trempe étagé :
Température d'austénisation de T°= 850°Cavec 30 min de maintient

a/Refroidissement jusqu'au T°=760°C avec un temps de maintien de 30 min



(Fe, Cr)3c+α → 100%γ a 850° → α+ γ a 760° → tremp → α+M → apré revenue → martenssite de revenue + α + residuelle

Résultats expérimentaux d'essai de traction

$Ø_0$ (mm)r	S_0 (mm^2)	l_0 (mm)	Fe (Kg.F)	Re (N/mm^2)	Fm (Kg.F)
5	78.5	50	51	637	70

Rm (N/mm^2)	Lu (mm)	A (%)	$Ø (mm)r_0$	Su (mm^2)	Z (%)
874	53	6	4.25	56.72	28

Résultats expérimentaux d'essai de dureté :

- **HRC : 29**
  Résultats mecrscopique

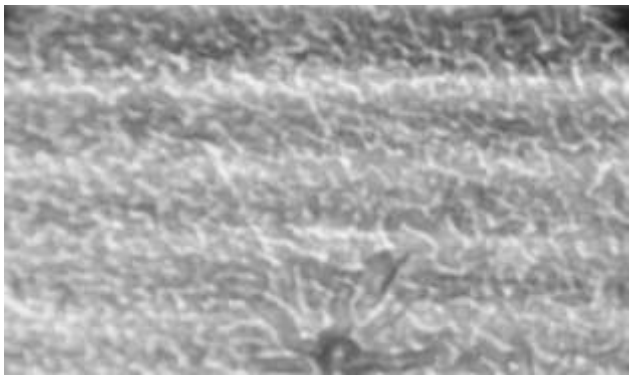
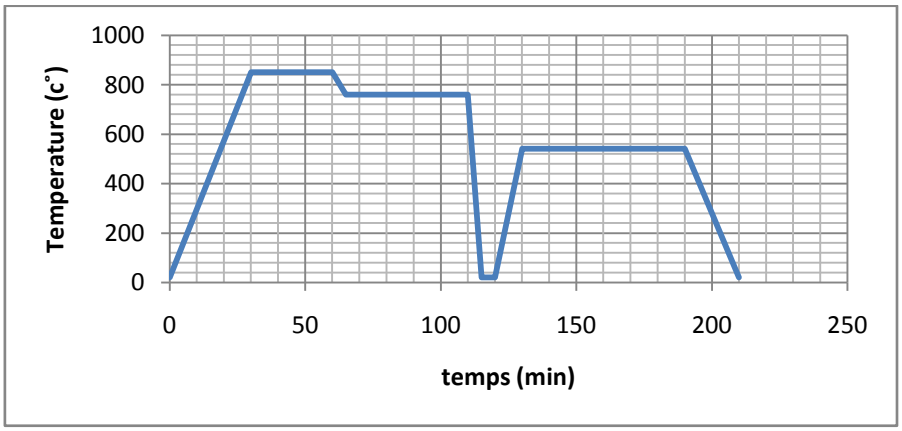


Figure 4.4:résultats mecroscopique aprés traitements de tremps étagé T°= 760°C Temps de maintien de 30 min

B/ Refroidissement jusqu'au T°=760°C avec un temps de maintien de 45 min



Résultats expérimentaux d'essai de traction

$Ø_{\circ}$ (mm)r	$S_{\circ}$ (mm^2)	$l_{\circ}$ (mm)	Fe (Kg.F)	Re (N/mm^2)	Fm (Kg.F)
4.95	76.94	49.5	55	700.5	79

Rm (N/mm^2)	Lu (mm)	A (%)	$Ø (mm)r_{\circ}$	Su (mm^2)	Z (%)
1006.24	54	9	4.25	56.72	26

Résultats expérimentaux d'essai de dureté :

- **HRc : 27**

Résultats mecroscopique

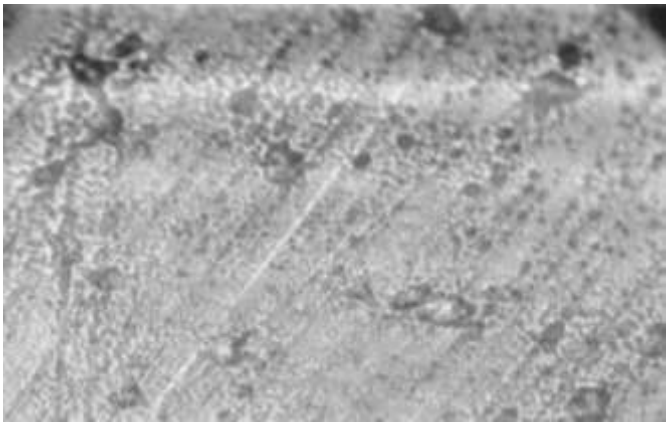
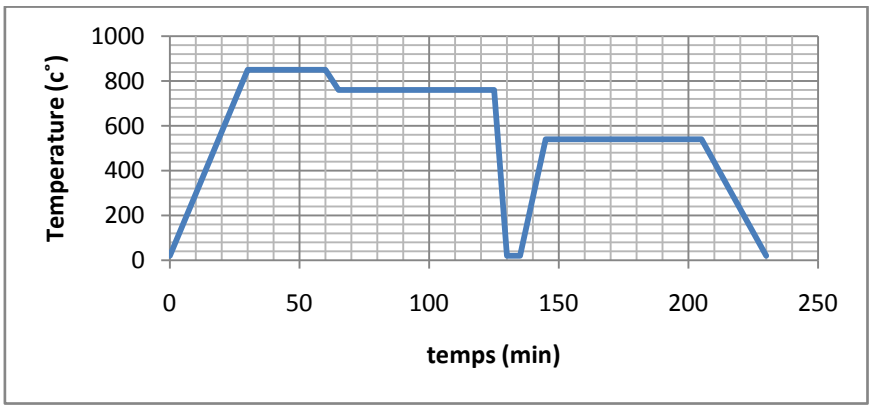


Figure 4.5:résultats mecroscopique aprés traitements de tremps étagé T°= 760°C Temps de maintien de 45 min

c/ Refroidissement jusqu'au T°=760°C avec un temps de maintien de 60 min



Résultats expérimentaux d'essai de traction

$Ø_0$ (mm)r	S_0 (mm^2)	l_0 (mm)	Fe (Kg.F)	Re (N/mm^2)	Fm (Kg.F)
5	78.5	50	52	650	78

Rm (N/mm^2)	Lu (mm)	A (%)	$Ø (mm)r_0$	Su (mm^2)	Z (%)
973.75	53	6	4.25	56.72	28

Résultats expérimentaux d'essai de dureté :

- **HRc : 29**

4-2-5 résultats métallographiques :

La métallographie de l'acier faiblement allié 42CrMo4 nous montre dans la figure 4-1 la structure

4-3 Interprétation des résultats :

4-3-1 Effet du temps de maintien sur la dureté

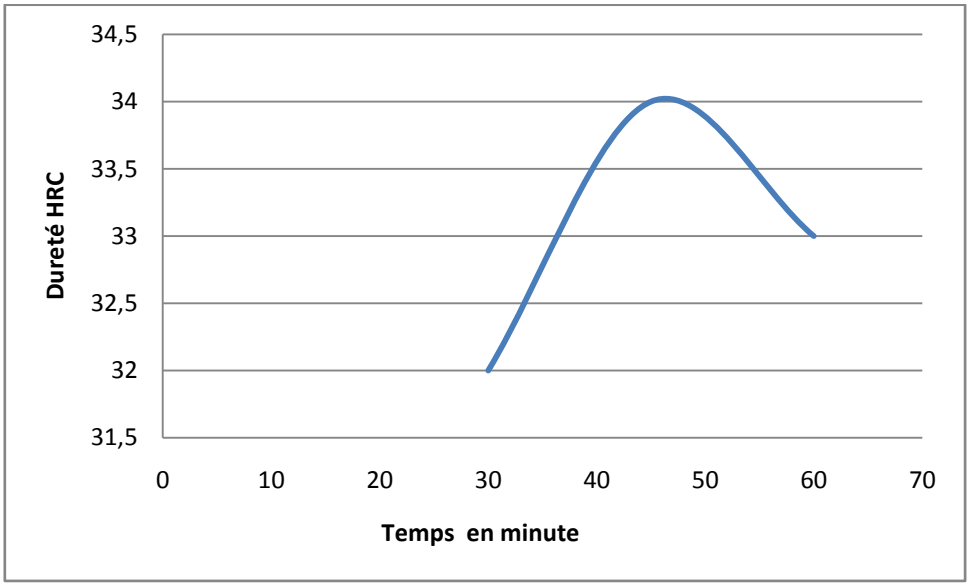


Figure 4-6 : Evolution de dureté en fonction du temps de maintien d'un acier 42Cr Mo4 après de température 820°C de temps de maintien(30,45,60 min)

On remarque dans la figure.4-6 une augmentation de dureté en fonction du temps de maintien au cours d'un traitement thermique de trempe pour l'acier 45CrMo4 dans l'eau avec une température d'austénisation de 820°C.

La meilleure dureté après traitement thermique de trempe de 820°C est 34HRC pour un temps de maintien de45min.

Relation entre temps de maintien et la dissolution du C et Cr et la teneur en austenite residuelle et la baisse au point Ms

4-3-2 Effet de température de chauffage sur la dureté :

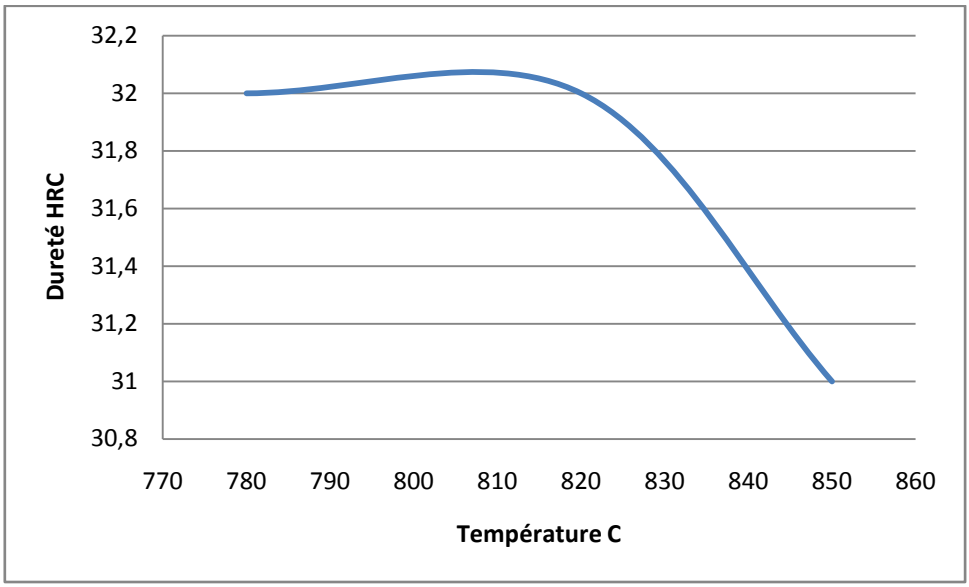


Figure 4-7 : Evolution de dureté en fonction du Température chauffage avec un de temps de maintien de 45min pour un acier 42CrMo4.

On observe dans la figure.4-7 que la courbe soit stable dans un intervalle de température d'austénisation entre (780à 820°C) de valeur de dureté 32HRC, en revanche une petite diminution de dureté de 31 HRC pour une température d'austénisation de 850°C.

- Relation entre la T° d'austinitisation et l'austinite residuelle
- Relation entre la T° d'austinitisation et la dissolution du C et Cr
- Relation entre la T° d'austinitisation et le point Ms

Bonne dureté dans ce traitement thermique 32HRC de température d'austénisation (780°C et 820°C) du temps de maintien 45 minute.

.4-3-3 Effet de temps de maintien sur la dureté au cours d'une referoidissement :

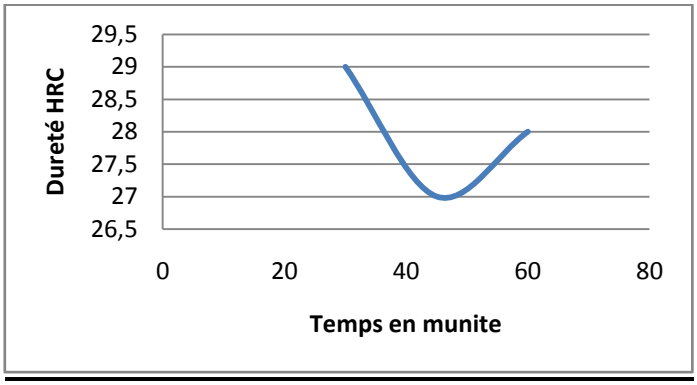


Figure. 4-8 : Evolution de dureté en fonction du temps de maintien d'un acier 42CrMo4 après refroidissement de température 850°C à 760°C avec revenu à 550 °

La figure.4-8 nous montre que la dureté diminue après une trempe étagé de température 850°C à 760°C à une dureté de 27 HRC pour un temps de maintien de 45 minutepuis augment à un dureté de 28HRC pour un temps de maintien de 60 minute. D'autre part la diminution de la dureté en comparaison avec le traitement thermique de trempe précédent est remarquable.

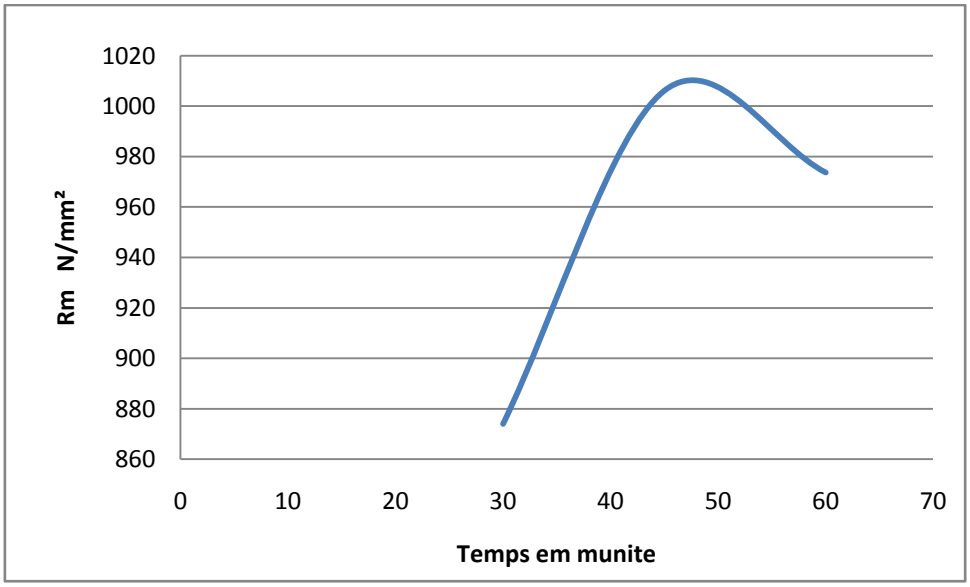


Figure. 4-9 : courbe de résistance mécanique (Rm) en fonction du temps de maintien(trempe étagée) d'un acier 42CrMo4.

La figure 4.9 représente la courbe de la résistance mécanique à la traction (Rm) en fonction du temps de maintien (trempe étagée) d'un acier 42CrMo4, qui nous montre l'augmentation de la résistance à une valeur maximum pour un temps de maintien de de 45 minutes lors d'une trempe étagé de température d'austénisation 850°C à 760°C.

Conclusion

Notre étude a concerné un acierde la nuance 42CD4 de construction faiblement allié au chrome-molybdène pour trempe et revenu.

Il présente une bonne trempabilité à l'eau, bonne résistance aux surcharges à l'état traité. C'est un acier à usinabilité améliorée, apte au chromage. Acier trés employé en mécanique, pour des pièces de moyennes à fortes sections : croisillons, arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles, pignons.

Dans ce travail de mémoire, nous avons portée sur l'influence de traitement thermique sur les propriétés mécaniques de dureté et traction de l'acier 42CD4 .

On a mettre en évidence l'effet de la température d'austénitisation et temps de maintiensur le comportement mécanique.
nous avons utilisé plusieurs techniques conventionnelles à savoir la dureté et traction.

Les résultats essentiels de ce travail de caractérisation se résument comme suit :

- La dureté augmente après traitements thermiques de trempe ;
- La Résistancesmécanique augmente après traitements thermiques de tempe ;
- Après les traitements thermiques de trempe étagé la dureté doit avoir des valeurs minimums ;
- La dureté dans la trempe étagé diminue en fonction du temps de maintien ;
- La résistancemécanique(Rm)augmenteà une valeur maximum de 1048 N/mm^2après un chauffage de traitement thermiquede trempe de 820 °C et un temps de maintien de 45 min ;
- Pendant le traitement thermique de trempe étagée de 850 à 790 °C et de temps de maintien de 45 min la résistance mécanique a une valeur maximum >1000 N/mm^2, et vice versa sa dureté a une valeur minimale.

Liste des figure

Figure 1.1 : Daigramme Fer et Carbone 6

Figure 2.1 : Domaines de températures d'austénitisation et d'autres traitements thermiques des a ciers au carbon..... 26

Figure 2.2 : Courbe TTT (acier faiblement allié 0,42 % C) : Ce diagramme se lit en suivant une isotherme 29

Figure 2.3 : Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement 30

Figure 2.4 : Diagramme de revenu de l'acier 42CrMo4. Évolution des propriétés en fonction de la température de revenu (température de trempe 820°C).....31

Figure :3.1 le cycle de traitement 35
Figure3. 2*Dimension de l'échantillon pour l'essai detraction.....37*
Figure3. *Figure.3.3 : évaluation des caractéristiques d'un cordon desoudur.....37*
Figure. 3.4. Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai.....38
Figure. 3.5. Machine de traction.....38
Fig. 3.6. Courbes conventionnelles typiques de traction.....39
Fig3.7. Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell : Cas d'un Rockwell C.....41
Figure 3.8 :appareil de polissage.....42
Figure 3.9: microduromètre (Zwick HV 10 et Zwick-M et ZHV2-M).....43
Figure 4.1 :résultats mecrscopique avant traitement.....48
Figure 4.2:résultats mecroscopique aprés traitements T°= 820°C Temps de maintien de 45 min.....49
Figure 4.3:résultats mecroscopique aprés traitements T°= 850°C Temps de maintien de 45 min.....51
Figure 4.4:résultats mecroscopique aprés traitements de tremps étagé T°= 760°C Temps de maintien de 30 min.....52
Figure 4.5:résultats mecroscopique aprés traitements de tremps étagé T°= 760°C Temps de maintien de 45 min.....53
*Figure 4.**6**: courbe de dureté en fonction du temps de maintien d'un acier 42Cr Mo4après de température 820°C de temps de maintien(30,45,60 min).....54*
*Figu re 4.**7** : courbe de dureté en fonction du Température d'un acier 42Cr Mo4 après de température de chauffage(780°C, 820°C,850°C) de temps de maintien(45min).....55*
Figure 4.8 : courbe de dureté en fonction du temps de maintien d'un acier 42CrMo4 après trempe étagé de température 850°C à 760°C avec revenu à 550 °.....55
Figure 4.9: courbe de résistance a latraction (Rm) en fonction du temps de mantien (trempe étagée) d'un acier 42CrMo4.....56

Références bibliographiques

[1] les aciers dans la construction Achevé d'imprimer en october 2006 par l'imprimerie CUSIN-38300 Meyrie

[2] www.technologuepro.com/cours.../chapitre-3-etude-du-diagramme-fer-carbone.pdf

[3]www.philippe.berger2.free.fr/productique/ressources/metallurgie/trait_thermic/influence_des_elements_d.htm

[4] Cours désignation des métaux Enseignants:, Arfaoui Ali, Chaker Med Amir Année 2009/2010

[5] Fatima Zohra Lemmadi, thèse de magistère, Rapporteur Mr. A. Chala, Univ. De Biskra.

[6] J.Philibert, A.Vignes, Y. Bréchet et P. Commrade, Métallurgie du mierai au matériau Masson 1998 Paris, p. 717
M. Massin, "Métallurgie Pratique pour Mécaniciens", tome 1, Pyc édition 1982, p 87-162.
H-J. Bargel und G. Schultze (ed.), Werkstoffkunde, Springer Verlag 2000

[7] guide_hors_production_operateur_traitement_thermique Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2015.
Dépôt légal – Bibliothèque et Archives Canada, 2015

[8] Guy Murry, Transformations dans les aciers, Normalisation (AFNOR), Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M 1 115, Centre français d'exploitation 2002.

[8] www.chm.ulaval.ca/gecha/chm2904/presentations/hiver_2016/acier.pptx

[9] https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier

[10] Lycée Édouard Branly de Créteil – cours de technologie
http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/index.htm

[11] Société Instron – les duretés Rockwell, Vickers et Brinell
http://www.instron.tm.fr/wa/applications/test_types/hardness/rockwell.aspx

[12] Mémoire de MAGISTER en Génie Mécanique Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier anti-usure NAXTRA70 utilisé par l'Unité Grue de Bejaïa dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation Présenté par **Hanifa MAROUF**