REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'étude de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Ingénierie des matériaux et des surfaces

Élaboration et caractérisation d'un acier moulé faiblement allié (42CD4)

Présenté par :

Khelifa billal

Abdallahoui el hannachi

Proposé et Dirigé par :

Mr.HABIRECHE Mohamed.

Promo 2019



Nous dédions ce Travail à

Nos chers parents, Nos chères Sœurs et Frères, Nos Familles

A tous Nos Enseignants et Nos Collègues de la Section Ingénierie des matériaux et des surfaces

A tous Ceux qui Nous Aimes

BILLAL ET HANNACHI

Remerciements

Nous remercions notre créateur Allah, Grand et Miséricordieux, le tout puissant pour le courage qu'il nous a donné pour mener ce travail a terme.

Nous remercions aussi chaleureusement tout l'ensemble du personnel de Ingénierie des matériaux et des surfaces, nos professeurs Dr . HABIRECHE M. Nous remercions Mr AZZIZI et Mr derbali S et Md

ben choucha F

pour son orientations et son précieux conseils.

Nous remercions l'équipe de UNITE FONDRIE DE TIARET et UNITE DE POVAL DE BERROUAGHIA.

Nous remercions du fond du cœur, nos familles nos parente et nos amies qui nous ont soutenues

Encouragées et motivées toute au long de ce travail.

Finalement, nous remercions tous nos collègues, pour leurs orientations.

الملخص

وصف لتصميم الصلب المصبوب منخفض المزج السبيكة المستخدمة في تصنيع أجزاء مختلفة ، مع الأخذ بعين الاعتبار المعايير التالية:
وصف الفرن القوسي ، (التكرير ، إزالة الكبريت ، إزالة الكبريت ، تشكيل الخبث ، تطوير التكوين) ، تكوين السبائك ، هيكل التصلب ، تسلسل التصلب ومخطط المرحلة ، تحويل الطور ، الخصائص المعالجة الحرارية ، والخصائص الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية : ضعيف المزج- إزالة الكبريت -الفرن القوسي - المعالجة الحرارية الخصائص الميكانيكية - التكرير.

Résumé :

Description de l'élaboration de l’acier moulé faiblement allié employé pour la fabrication de diverses pièces, en tenant compte des paramètres suivants :

Description du four à arc, conduite métallurgique (affinage, déphosphoration, désulfuration, formation de laitier, mise au point de la composition), composition de l'alliage, structure de solidification, séquence de solidification et diagramme de phase, transformation de phase, caractéristiques du traitement thermique, et caractéristiques mécaniques.

Mot clé : faiblement allié - affinage, déphosphoration – désulfuration - formation de laitier, mise au point de la composition- traitement thermique

abstract

Description of the design of low-alloy cast steel used in the manufacture of various parts, taking into account the following parameters:
Description of arc furnace, metallurgical pipe (refining, dephosphorization, desulfurization, slag formation, composition development), alloy composition, solidification structure, solidification sequence and phase diagram, phase transformation, characteristics heat treatment, and mechanical characteristics.

Keyword : low-alloy cast steel - arc furnace - (refining, dephosphorization, desulfurization - slag formation, composition development – heat treatmen

Sommaire

Introduction générale……..1

Chapitre I Généralité sur les aciers

I.1. L'ACIER……..……..2
I.2.Différentes « familles » d'aciers……..…...3
I.2.1.Aciers non alliés ……..3
I.2.1.1.Aciers spéciaux (type C)……..……...3
I.2.1.2.Aciers patin ables……..3
I.2.2.Aciers faiblement alliés…….3
I.2.3.Aciers fortement alliés…….3
I.2.3.1.Aciers inoxydables……..4
I.3 Composition des aciers non alliés et faiblement allies……..4
I.4 Les différentes phases de l'acier……4
I.4.1 Austénite……....4
I.4.2. Ferrite……..5
I.4.3. Perlite……6
I.4.4. Cémentite ……..6
I.4.5.Bainite……6
I.4.5.1.Bainite supérieure……7
I.4.5.2.Bainite inférieure……8
I.4.5.3.Transformation bainitique……8
I.4.5.4. Utilisation des aciers bainitiques:……8
I.4.6. Martensite……8
I.5.Diagramme d'équilibre Fer-Carbone……9
I.5.1 Analyse du diagramme Fer-carbone……9
.5.2.Les points caractéristiques du diagramme d'équilibre Fe-Fe_3c……10
I.6.Composition chimique de l'acier ……12
I.6.1.Influence des éléments chimiques sur l'acier ……12
I.6.2.Influence des éléments chimiques constants (normaux) ……13
I.6.3.Influence des éléments d'addition ……..14
I.7. Influences des éléments d'alliage sur les propriétés des aciers……16
I.8.Influence de l'azote, de l'oxygène et de l'hydrogène ……..17
I.9.Eléments gamma gènes (Ni, Mn) ……...17
I.10. Eléments alpha gènes ……..18
I.11.Désignation normalisée des aciers ……...19
I.11.1 Désignation des aciers ……...19
I.11.2 Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique……..19
I.11.3.Désignation des aciers pour traitements thermiques ……21
I.11.4.Modes de traitement thermique pour les aciers au carbone……...22
I.11.5.Désignation des aciers alliés……..22
I.11.6. Désignation des aciers faiblement alliés ……23
I.11.7. Désignation des aciers fortement alliés ……..24

I.12. Soudabilité des aciers non alliés et faiblement allies ……25
I.12.1. Soudabilité……..…25
I.12.2.Coefficient de soudabilité (s)…….……26
I.12.3.Calcul du carbone équivalent d'après L'IIS……27
Chapitre II Elaboration De l'acier Au Four Electrique
II.1.Elaboration De L'acier ……..…….28
II.2. Processus d'élaboration de l'acier ……..29
II.3. Introduction……31
II.4.Four à arc (Caractéristiques)……32
II.4.1.L'arc électrique……32
II.4.1.1.Principe ……32
II.4.2.L'amorçage……..32
II.4.3. La fusion…….33
II.4.4.Haute température……...33
II.4.5.Elimination du soufre et du phosphore……..**.....**33
II.4.6.Abaissement du taux en oxygène (réduction) ……..33
II.4.7.Pas d'oxydation des éléments d'alliage…….**.....**34
II.5.Four Héroult(Four à arc électrique et sole non conductrice)……34
II.5.1.Principe……..34
II.6.Description technologique de four a arc……..35
II.6.1.Four……35
II.6.2.Four à arc à courant alternatif ……...35
II.6.2.1.La cuve du four à arc ……...36
II.6.2.2.Les réfractaires ……37
II.6.2.3.Le berceau de basculement ……37
II.6.2.4.La voûte ……38
II.6.2.5.Les électrodes ……38
II.6.3.La charge s'effectue en une seule fois……..39
II.6.4.Conduite des opérations……39
II.7.ConduiteetOpérations métallurgiques au four électrique à arc……..40
II.7.1.L'affinage……40
II.7.2.Intérêt d'un affinage poussé(travail du bain)……..…..41
II.7.2.1.l'effet mécanique de brassage ……..……41

II.7.3.Arrêt de l'affinage ……..……..41
II.7.4.Conduite pratique de l'affinage……..……42
II.7.4.1. composition visée de la charge ……42
II.7.4.2. contrôle de l'affinage……42
II.7.4.3. évolution de bain……..……42
II.7.4.4. divers ……43
II.7.5. La déphosphoration……43
II.7.6..La décarburation……..……..44
II.7.7. La désulfuration……...……44
II.7.8. Les additions métalliques……45
II.7.9.La chaux……...……45
II.7.10.Le laitier……...……45
II.8.les traitement thermiques des acier……45
II.8.1.Le cycle thermique ……...……46
II.9. Définitions et procédés des traitements thermiques……...46
II.9.1. L'austénitisation……46
II.9.2.La Trempe……47
II.9.2.1.Trempe à l'eau……47
II.9.2.2. Trempe à l'huile……48
II.9.2.3. Trempe à l'air……....48
II.9.3.Le Revenu……..…50
II.9.4.Recuit et traitements connexes……..51
II.9.4.1.Types de recuit……...52
Chapitre III matériau et résultats expérimentaux
III.1. Introduction……59
III.2. Définition……...59
III.2.1.Norme standard…… ……..59
III.2.2.Désignation de 42CD4 ……..60
III.2.3.Applications……60
III.2.4.Propriétés d'emploi……60
III.3. Echantillonnage ……60
III.4.Composition chimique général……..61
III.5. influence des éléments d'alliages sur les aciers étudies……61
III.5.1. Le carbone……...61
III.5.2. Le chrome……61
III.5.3. Le molybdène……..62
III.6. Diagramme de coefficient de dilatation thermique……..62
III.7.Diagramme de conductibilité thermique ……..63
III.8.Diagramme TT d'un acier faiblement allié (42CD4)……63
III.9.Diagramme de revenu……...64
III.10.Diagramme TRC d'un acier faiblement allié ……64

III.11.Adaptation al soudabilité ……65
III.12.lait de fusion ……...65
III.13.Composition chimique de la acier étudie ……...67
III.14.Solidification :Etude de taux de formation des phases selon le diagramme d'équilibre Fe-C…….……..68
III.15.Essais de dureté …….……70
III.15.1.Résultats obtenus par l'essai de dureté avent traitement thermique de normalisation……71
III.16.Métallographie……72
III.16.1Microscope métallographique ……..73
III.16.2.Résultats obtenus par essai de Métallographiques avent traitement thermique de normalisation ……74
III.17.Traitement thermique de normalisation……..75
III.17.1. La trempe……75
III.17.2. Le revenu……...75
III.17.3.Résultats obtenus par essai de dureté après traitement thermique ……77
III.17.4.Résultats obtenus par l'essai de Métallographiques après traitement thermique …….……..……...77
III.18. Essais de résilience ……..…78
III.18.1.But de I 'essai de résilience……..78
III.18.2.Dimension de l'éprouvette……...78
III.18.3.Résultats obtenus par essai de résilience après traitement thermique ……79
III.19.Essai de traction……..80
III.19.1 Objectifs de l'essai……...80
III.19.2 Principe de l'essai……81
III.19.3.Eprouvette……..81
III.19.4.Résultats obtenus par essai de traction après traitement thermique ……82
Conclusion générale……..84

Liste des tableaux

Chapitre I Généralité sur les aciers

Tableaux 1: Influences des éléments alliage sur les propriétés des aciers……..……16

Tableaux 2: sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers non alliés et alliées…….19

Tableaux3 : les valeurs des d'éléments addition volontaire ……..……19

Tableaux.4 : pureté chimique en soufre et phosphore ……...21

Tableaux.5 : Les éléments d'addition sus- mentionnés agissent de deux façons principales sur l'acier…….22

Chapitre II Elaboration De l'acier Au Four Electrique

Tablaeux.1 :le pourcentage des éléments essentiels…….31

Tableaux.2 :l'évolution de la composition…….42

Chapitre III matériau et résultats expérimentaux

Tableaux 1 : Composition chimique général……..……61

Tableux.2 : la charge de four……..……66

Tableaux.3 : Composition chimique de la acier étudié……...67

.

Chapitre III matériau et résultats expérimentaux

Figure.1: éprouvette en Y ……61
Figure.2 ;Diagramme de coefficient de dilatation thermique ……..62
Figure .3 : Diagramme de conductibilité thermique ……63
Figure.4 :Diagramme TT d'un acier faiblement allié (42CD4)…….63
Figure.5 : Diagramme de revenu…….64
Figure.6 : Diagramme TRC d'un acier faiblement allié……64
Figure.7 :graphe Coefficient de soudabilité (s)…….65
Figure.8 : diagramme d'équilibre Fe-C……68
Figure.9:transformation de la acier hypoeutectoide ……70
Figure.10 : machine de dureté (d'uromètre type T.2M)……71
Figure.11 : échantillon brute de coulée de 42CD4…….72
Figure.12 :polisseuse avec disque abrasif…….73
Figure.13 : polisseuse fin (avec pate diamantée)…….73
Figure.14 : microscope optique (unité de berrouaghia)……..74
Figure.15 : structure de wedmenstaitn……..74
Figure.16 : cycle thermique……..76
Figure.17: échantillon trempé à l'air Souffler…….76
Figure.18 : échantillonaprès trempe……..76
Figure.19 :structure de wadmnstaiten après (T.Th)……77
Figure.20 : Dimension de l'éprouvette ……78
Figure.21 : machine de résiliences…….79

Figure.22 : photo des éprouvettes avant et après l'essai de résilience…….80

Figure.23:dessin technique de l'éprouvette de traction……82

***Figure*.24 :**Courbes conventionnelles typiques de traction…….**....**82

Figure.25 : l'éprouvette de traction ……83

Figure.26 : machine de traction(unité tiaret)……..83

Introduction générale

Introduction générale :

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 sections (arbres, essieux ,crémaillères, vilebrequins ,bielles, engrenages) . cet acier et parfois utilisé pour des pièces trempées superficiellement.

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.

Chapitre I

Généralité sur les aciers

I.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 modifie 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]

I.2.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).

I.2.1.Aciers non alliés :

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.

I.2.1.1.Aciers 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.

I.2.1.2.Aciers patin ables:

Les aciers à résistance améliorée à la corrosion sont des aciers faiblement alliés appelés également aciers patin ables ou aciers auto protecteurs, 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 .

I.2.2.Aciers faiblement alliés:

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

I.2.3.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.

I.2.3.1.Aciers 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 (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.

I.3 Composition des aciers non alliés et faiblement allies.

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).

I.4 Les différentes phases de l'acier :

austénite, bénite, cémentite, ferrite, martensite, perlite

I.4.1 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 1147°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 suffisant, 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 férritique.D'autres éléments (silicium, molybdène ou chrome par exemple) tendent à déstabiliser l'austénite.On appelle ces éléments «alphagènes ».

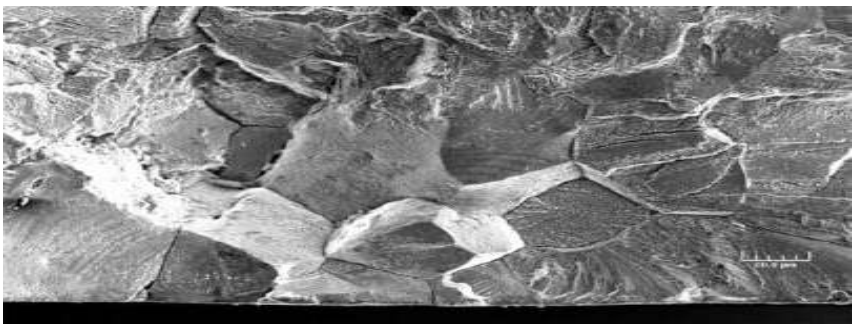


Figure 1 : structure de l'austénite [17]

Ductile 22a 31 HV

I.4.2. 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.

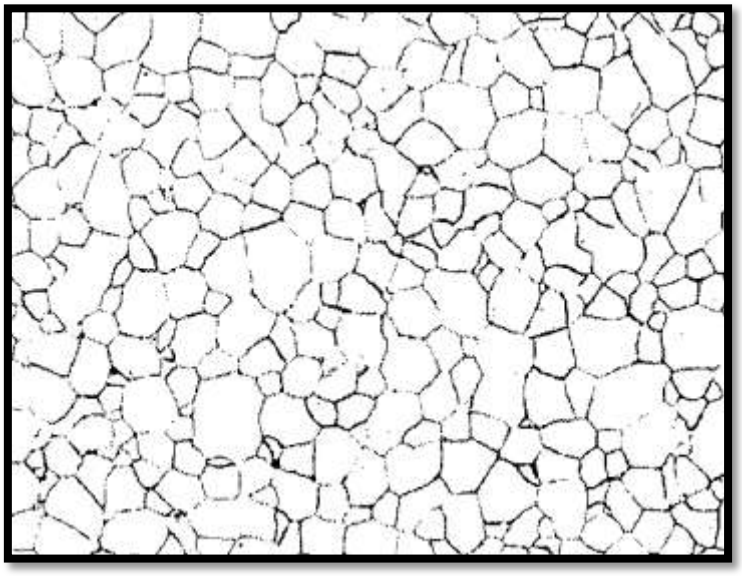


Figure 2 : structure de ferrite [17]

Ductile malléable

dureté (80 à 100HV) R_m = 300MPa .allongement A% =35%

I.4.3. 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.A 727 °C, formation du composé eutectoïdeappelé perlite. Alternance très fine de ferrite et de cémentite.

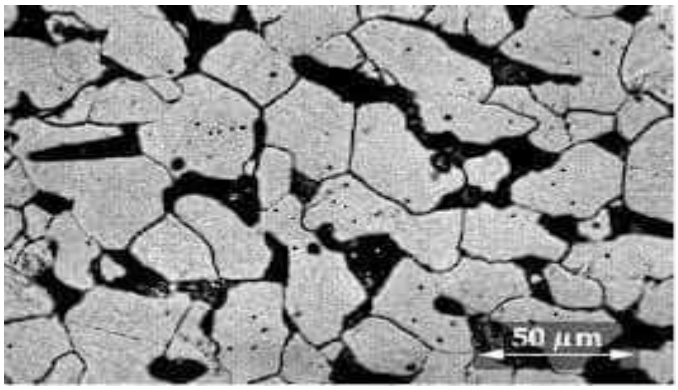


Figure 3 : structure de perlite [17]

I.4.4. 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.

I.4.5.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, 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.[1]

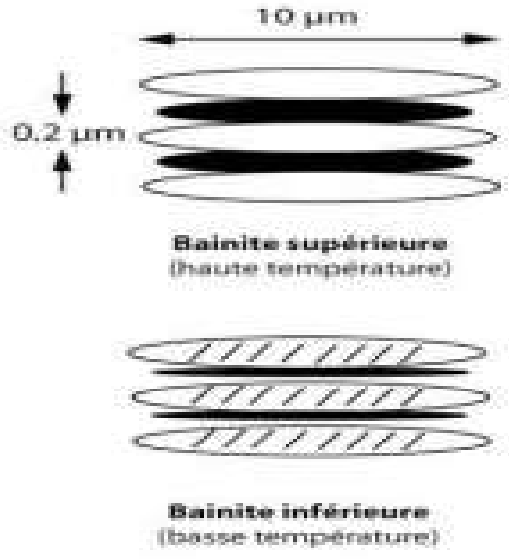


Figure 4 : structure de bainite [12]

I.4.5.1.Bainite supérieure :

La bainite supérieure présente une structure sous forme de fines plaquettes de ferrite d'une épaisseur de 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.



Figure 5 : structure de bainite supérieure [17]

I.4.5.2.Bainite inférieure:

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



Figure 6 : structure de bainiteinféreure [17]

I.4.5.3.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.

I.4.5.4. 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'élémentsd'alliage.

I.4.6. 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 feα, 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. La martensite cristallise dans le système quadratique (prisme droit à base carrée qui est ici très

voisin d'un cube). La martensite est ferromagnétique. 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 suivanttrois 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]

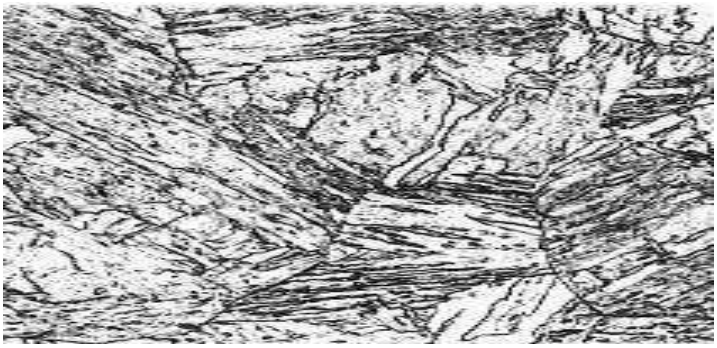


Figure 7 : structure de martensite [17]

I.5.Diagramme d'équilibre Fer-Carbone:

I.5.1 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).

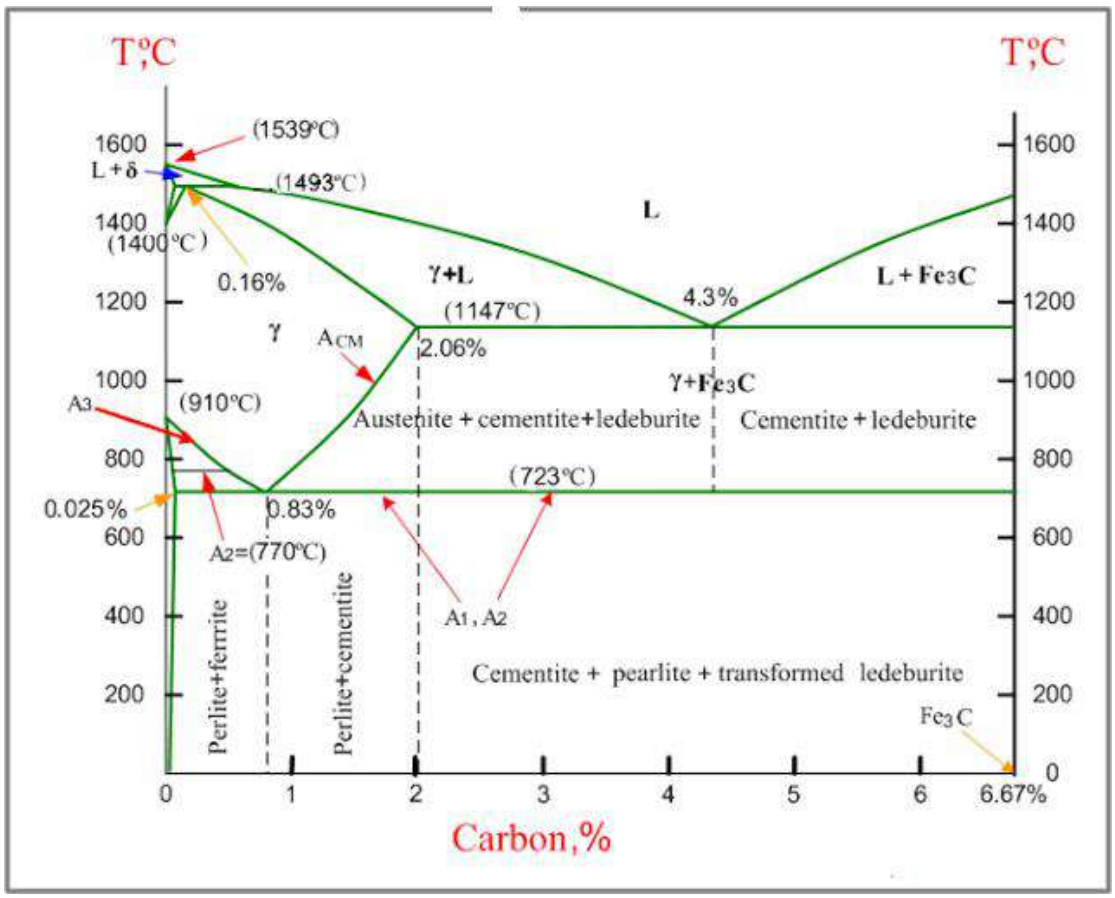


Figure 8 : diagramme fer_carbone [17]

I.5.2.Les points caractéristiques du diagramme d'équilibre Fe-Fe_3c:

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 ($\delta \rightleftarrows \gamma$).

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.

* **A_0 :** (210°C) précise la température de la transformation magnétique de la cémentite.

* **A_1 :** précise la fin de la transformation au refroidissement de l'austénite. L'austéniten'existe plus au-dessous de cette ligne.

* **A_2 :** (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.

* **A_3 :** précise la fin de la transformation au chauffage de la ferrite en austénite .La ferriten'existe plus au-dessus de cette ligne.

* **A_4 :** 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 :

B.1.Palier ECF (Eutectique à 1147°C):

Il marque la température minimale d'existence du liquide.

B.1.1.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.$\mathbf{Liq \rightleftarrows \gamma_{2.11} + fe_3c_{6.67}}$

B.2.Palier PSK(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

B.2.1.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]

$\mathbf{\gamma_{0.8} \rightleftarrows \propto_{0.02} + Fe_3c_{6.67}}$

B.3.Palier HIS Péritectique à 1487°C

Mais d'importance négligeable de point de vue industrielle.

B.3.1.Réaction péritectique

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

I.6.Composition chimique de l'acier :

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2%C outre le fer et le carbone qui en sont les éléments principaux rentrant dans sa composition, un acier ordinaire contient principalement du silicium ; du manganèse, du soufre et du phosphore.[4]

I.6.1.Influence des éléments chimiques sur l'acier :

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% outre le fer et le carbone qui en sont les éléments essentiels rentrant dans leur composition, ils se composent de plusieurs autres inclusions ou impuretés constantes ou inévitables telles que Mn, Si, P, S, O, M, H, etc. . . qui influent sur leur propriétés. La présence de ces inclusions s'explique :

- Soit par la difficulté de l'élimination de certaines d'entre elles lors de l'élaboration (S,P).

- Soit par leur passage dans l'acier lors de l'opération de désoxydation (Mn , Si).
- Soit encore par addition en vue d'améliorer les propriétés de l'acier (Cr, Ni, Mo, etc.).

Les fontes contiennent ces mêmes inclusions ou impuretés mais en quantité plus grande. L'influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier peut être divisée en deux groupes : les éléments chimiques constants et les éléments d'alliages.[4]

I.6.2.Influence des éléments chimiques constants (normaux) :

La fragilité et la plasticité sont les propriétés essentielles de l'acier, le même métal peutêtre ductile ou fragile suivant :

- La composition chimique.
- L'état de surface.
- Et la température.

Parmi les éléments chimiques, généralement contenus dans les aciers ordinaires, on peut citer[4]

A. le carbone :

Un faible pourcentage peut conduire à une matrice férritiquet, aux grandes valeurs , on peut obtenir une quantité importante de perlite et de cémentite(C% > 0.8) a la température ambiante , en présence des éléments carburigenes , il forme des carbure durs.

B. le manganèse :

Il forme des carbure en se substituant dans la cémentite $(Mn,Fe)_3$.IL est introduit dans les alliages ferreux pour neutraliser l'effet négatif du soufre , sa teneur limite dans les aciers ordinaires est de 1.2%

C. le silicium :

il a un grand pouvoir graphitassent, il ne forme pas de carbure, dissout dans la ferrite il provoque son durcissement et élevé la résistance au revenu des aciers trempes, sa tenure limite dans les aciers au carbone est de 1%.

D. Le soufre :

Sa tenure limite dans les aciers ordinaire est 0.1%. il forme des sulfures (FeS) qui, combines au fer donne un eutectique fusible a 988 °C . Cet eutectique apparait a des faibles tenures en « S ». il augmente la fragilité chaud, qu'on peut éviter par l'ajout du Mn.

E. le phosphore :

IL augmente la résistance R et RM, diminue la plasticité et la ductilité(A% ; Z%) en favorisant la fragilité froid, sa teneur est limite dans les aciers non alliés a 0.12 % , un acier de qualité doit assurer très faible quantité en « S » et « P » .

I.6.3.Influence des éléments d'addition

A. Le chrome :

A une action nette sur la trempabilité, en autre a une tendance croissante à la formation de carbures. Les carbures peuvent être de type M_3C (substitution du chrome à une partie de fer dans la cémentite) ou Cr_7C_3 et $Cr_{23}C_6$, plus durs que la cémentite et ont tendance à améliorer la résistance à l'usure, et s'opposent au grossissement du grain lors de l'austénitisation. Il provoque, par ailleurs, un certain retard à l'adoucissement lors du revenu, ce qui améliore la résistance à chaud.

Le chrome diminue beaucoup la solubilité du carbone dans l'austénite c'est-à-dire déplace vers la gauche le point E du diagramme Fer-carbone (voir figure 1. 7), on voit qu'avec 5% de chrome l'austénite dissout moins de 1.4% de carbone, avec 12% la solubilité et inférieur à 1%. Pour des teneurs supérieurs, il restera donc, quelque soit la température de chauffage, des carbures eutectiques non dissous dans une structure dite lédeburite. C'est le cas d'un acier très courant contenant 2% de carbone et 12% de chrome.

A partir de 13%, c'est le constituant de base des aciers inoxydables. Nous le rencontrerons dans certains outils de coupe, tels que les instruments de chirurgie sous réserve que cet élément ne soit pas trop fixé sous forme de composé défini du type carbure ou nitrure.

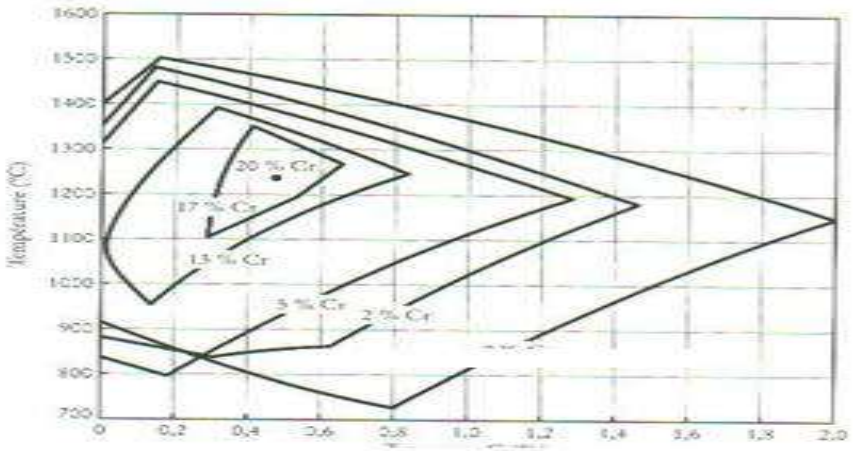


Figure 9 : Influence de diverses teneurs en chrome sur les teneurs limites en carbone. Conduisant à la formation d'austénite pure [5]

B. Lemolybdène :

Ila tendance comme le chrome à former des carbures du type M_2C ou M_6C. IL augmente la résistance l'adoucissement lors des revenus et provoque le durcissement structurel du matériau. Sa teneur limite dans les aciers au carbone est de 0.1%.

C.Le Nickel :

Très soluble dans la solution solide férritique ,il accroit la dureté et amélioré la ductilité , sa teneur minimale dans les aciers allies est 0.5%.

D. l'Aluminium :

Iles ajoute pour la désoxydation du liquide, il tendance se combine avec l'azote en formant le ALN, ce dernier provoque la fragilité de l'acier.

E. Le Cuivre :

Améliore les caractéristiques mécaniques des aciers et modifie leur teneur à la corrosion jusqu'à une teneur de 1 – 1.5%.

F. Le Vanadium :

IL a une grande affinité pour le carbone en formant des carbures du type MC M_4C_3très durs il, provoque comme le molybdène un fort durcissement secondaire au

cours du revenu et favorise la résistance l'adoucissement a haut température .Dans notre acier sa teneur maximale est de 0.03% [5]

I.7. Influences des éléments d'alliage 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'alliages se répartissent le fer γ . 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]

Tableaux 1:Influences des éléments alliage sur les propriétés 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	↗	↗		↗	↗	↗		

I.8.Influence de l'azote, de l'oxygène et de l'hydrogène :

L'azote et l'oxygène sont contenus dans un acier sous forme d'inclusions non métalliques fragiles tels que FeO, Si02, AI2O3 (oxydes) et Fe4N (nitrures)...., de solution solide ou à l'état libre dans les volumes défectueux du métal (retassures, criques etc...). Les inclusions d'insertion (azote, oxygène), en se concentrant aux joints de grains, forment le long de ces joints des nitrures et des oxydes, en élevant ainsi le seuil de fragilité à froid et en alternant la résistance à la rupture fragile. Les inclusions non métalliques (oxydes, nitrures, scories) étant des concentrateurs de contraintes sont susceptibles de réduire sensiblement, si leur quantité est importante ou s'ils s'accumulent en agrégats, la limite de fatigue est la résilience. L'hydrogène dissout dans l'acier est un élément très nocif qui exerce une forte action fragilité. Absorbé pendant la fusion, l'hydrogène non seulement rend l'acier plus fragile, mais détermine dans les laminés et les grosses pièces de forge la formation des flocons. Les flocons sont des criques très fins et d'une forme ovale ou arrondie qui apparaissent dans une cassure sous la forme de taches ou flocons argentés. Ils altèrent brusquement les propriétés de l'acier. Leur présence rend le métal inutilisable dans l'industrie. La fragilisation par H2 s'observe souvent lors du soudage, l'hydrogène est alors une source de criques à froid dans le métal d'apport et de base. La coulée et fusion sous vide, diminuent sensiblement la teneur en H2 dans l'acier.[4]

I.9.Eléments gamma gènes (Ni, Mn) :

Ces éléments abaissent le point A3 et élèvent le point A4 ce qui donne une extension du domaine de la phase y et une réduction du domaine de la phase a. montre que l'addition de ces éléments fait monter le point A4 jusqu'à la ligne du solidus. Alors que dans les conditions d'une concentration élevée de l'élément d'alliage le point A3 descend jusqu'à l'ambiante empêchant ainsi la transformation[4]

$$\alpha \rightleftharpoons \gamma$$

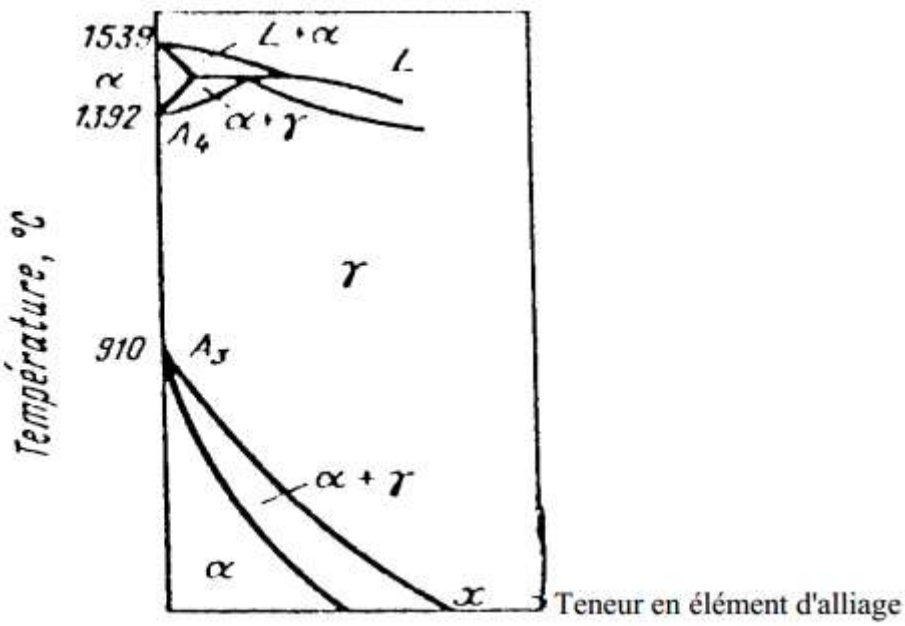


Figure.10 : influence Eléments gamma gènes[4]

I.10. Eléments alpha gènes :

Ce sont les éléments tels que Cr, W, Mo, V, Al, Si...ces éléments abaissent le point A4 et élèvent le point A3. Il en résulte que pour une concentration déterminée des éléments d'alliages, les lignes de transformation A3 et A4 se rencontrent et le domaine de la phase γ, se trouve complètement fermé, c'est à dire il y a extension du domaine de la phase α (ferritique) et un rétrécissement du domaine γ (eutenitique). Les alliages de ce type sont dits " ferritique ". Lorsque la transformation **αγne se** produit que partiellement, les alliages s'appellent semi-ferritiques.[4]

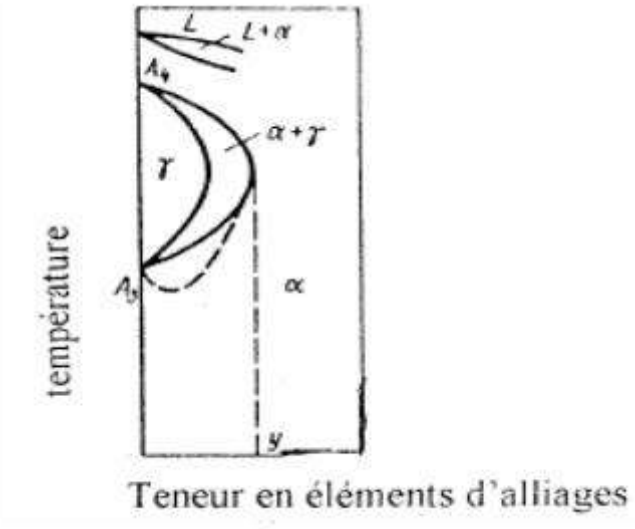


Figure.11: influence Eléments alphagènes**[4]**

I.11.Désignation normalisée des aciers :

I.11.1 Désignation des aciers :

Les aciers sont classés en deux groupes :

- Aciers non alliés (aciers ordinaires, aciers spéciaux,...).
- Aciers alliés (faiblement et fortement alliés).

Le tableau ci-dessous nous donne un aperçu sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers non alliés et alliées [4]

Tableaux 2:sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers non alliés et alliées

%de l'élément d'addition	Acier non allié	Acier faiblement Allié	Acier fortement allié
Al	<0.3	-	>0.3
B	-	-	>0
Co	<0.2	0.2…..0.3	>0.3
Cr	<0.3	0.3…..0.5	>0.5
Cu	<0.4	-	>0.4
Mn+Si	<1.5	1.5……3	>3
Mo	<0.05	0.05…..0.1	>0.1
Ni	<0.3	0.3……0.5	>0.5
Pb	<0.4	-	>0.4
V	<0.5	0.05…..0.1	>0.1
W	<0.2	0.2……..0.3	>0.3

I.11.2 Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique :

Les aciers ordinaires correspondent à des produits de grande consommation. ils sont obtenus dans les convertisseurs, four martin...

Ce sont des aciers qui n'ont pas fait l'objet d'une addition volontaire d'éléments d'alliage et qui ne doivent pas dépasser les valeurs limites ci-dessous :[4]

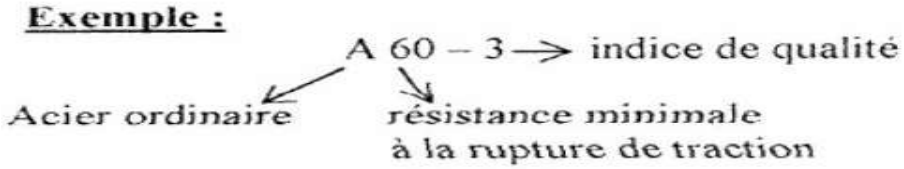
Tableaux3 : les valeurs des d'éléments addition volontaire

élément	P+S	Si+Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Al	Ti	Cu	Pb
%	0.20	2	0.5	0.25	0.10	0.05	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.10

Deux solutions se présentent pour les désigner :

1) lettre A pour les aciers de constructions mécaniques.

Cette nuance est indiquée par la lettre A suivie d'un nombre correspondant à la limite minimale de résistance à la rupture par traction Rm en daN/mm^2 , éventuellement suivi des chiffres 1, 2, 3, ou 4 (indice de qualité des propriétés mécaniques). Le chiffre 4 indique la plasticité la plus élevée, on utilise ces chiffres, car deux aciers ayant la même charge de rupture peuvent avoir des plasticités différentes.[4]



Leur désignation peut être aussi suivie des indices d'utilisation :

S— soudable

M — moulable.

L'indice de qualité est définit selon l'expression suivante :

N = 2,5 A + R

N : nombre définissant l'indice de qualité.

A : allongement en %.

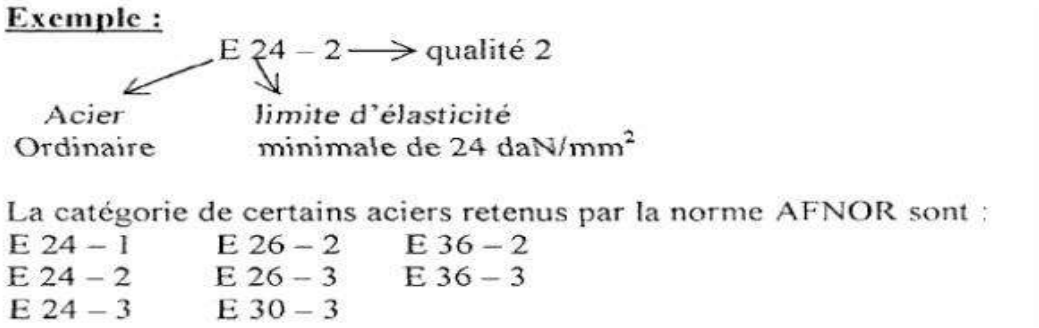
R : résistance en hbar

Qualité	1	2	3	4
N≥	96	108	114	118

Exemple de nuances normalisées : A33, A34, A50, A52, A60 etc..

2) lettre E pour les aciers destinés à la construction métallique.

Cette nuance est désignée par la lettre E suivie d'un nombre correspondant à la limite d'élasticité minimale à la traction et éventuellement suivie d'un chiffre 1, 2, 3, 4.



Pour distinguer la pureté chimique en soufre et en phosphore des aciers, leur désignation peut être éventuellement suivie d'une lettre minuscule indiquant la pureté en (P+S), voir tableau ci- dessous :

Tableaux.4 : pureté chimique en soufre et phosphore

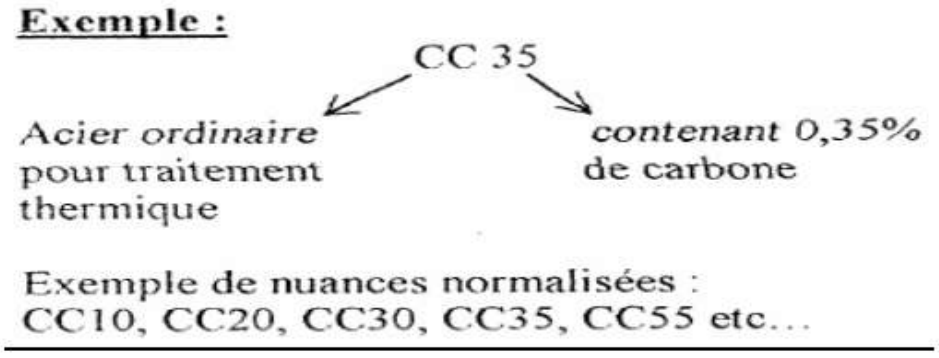
Symbole	A	b	C	d	e	f	g	H	K	M
P+S	0.140	0.120	0.100	0.090	0.070	0.065	0.060	0.055	0.045	0.035

I.11.3.Désignation des aciers pour traitements thermiques :

Cette catégorie d'aciers est apte aux traitements thermiques, la teneur en carbone est impuretés est contrôlée, on distingue deux nuances :[4]

A. Les aciers courants :

Ils sont désignés par les lettres CX suivies d'un nombre qui désigne la teneur moyenne du carbone en centième pour cent (100 fois la teneur en carbone).



I.11.4.Modes de traitement thermique pour les aciers au carbone :

- L'acier contenant moins de 0,30% C est destiné à subir une cémentation (appelé acier trempé).
- Les aciers contenant 0,35% *à* 0,50% C sont destinés à l'amélioration (trempe + revenu à haute température).
- Pour les aciers contenant 0,60% à 0,75% C (trempe + revenu à température moyenne).
- De 0,8% + 1,3% C, aciers à outils destinés à subir une trempe suivie d'un revenu à température basse.[4]

I.11.5.Désignation des aciers alliés :

Ces types d'aciers sont obtenus par l'addition volontaire d'éléments d'alliage. Ce sont des aciers contenant outre le fer et le carbone un ou plusieurs éléments destinés à améliorer leurs propriétés mécaniques. Ce sont des aciers de grande pureté, leur élaboration s'effectue dans le four martin, four électrique ou creuset. Les principaux éléments d'alliages et leurs symboles normalisés sont présentés dans le tableau ci-dessous. La teneur des éléments d'alliages C,K,M,N,S est multipliée par 4 et pour tous les autres éléments par 10 [4]

Tableaux.5 : Les éléments d'addition sus-mentionnés agissent de deux façons principales sur l'acier.

élément	Symbole		coefficient
	Chimique	métallurgique	
Aluminium	Al	A	*4
Chrome	Cr	C	*4
Cobalt	Co	K	*4
Cuivre	CU	U	*10
Etain	Sn	E	*10
Magnésium	Mg	G	*10
Manganèse	Mn	M	*4
Molybdène	Mo	D	*10
Nickel	Ni	N	*10
Phosphore	P	P	*10
Plomb	Pb	Pb	*4
Silicium	Si	S	*10
Soufre	S	F	*10
Titane	Ti	T	*10
Tungstène	W	W	*10
Vanadium	V	V	*10
Zinc	Zn	Z	*10
Antimoine	Sb	R	*10
Cadimium	Cd	Cd	*10

a)Leur action sur la formation de l'austénite :

Les éléments alphagènes tels que Si, Cr, Al, W, Mo, et V, s'opposent à la formation de l'austénite, pour une teneur suffisante l'alliage demeure à l'état perlitique depuis la température ordinaire jusqu'à la température de fusion.

Les autres éléments gamma gènes Ni, Mn, Co facilitent la formation de l'austénite au point de la rendre stable à la température ordinaire lorsqu'ils sont en proportion suffisante.

b)Leur action sur la formation de carbures complexes :

Ils facilitent la naissance de carbures complexes généralement plus durs que le carbure de fer et qui demeurent noyés et non dissous dans le reste de l'alliage. Ces carbures influent sur les propriétés mécaniques de l'acier. Selon les éléments d'addition et leurs quantités d'addition, on distingue deux types d'aciers :

- Aciers faiblement alliés.
- Aciers fortement alliés.

I.11.6. Désignation des aciers faiblement alliés :

Ce sont des aciers dont la teneur en n'importe quel élément d'addition ne doit pas dépasser 5%. Ils sont désignés par :

- Un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone, exprimée en % (multiplié par 100).
- Suivie de symboles normalisés des éléments alliés dans l'ordre des teneurs décroissantes (c'est à dire le premier élément indique toujours l'élément dont la teneur est la plus élevée).
- Les symboles sont suivis par des nombres indiquant la teneurs moyenne des éléments d'additions multiplié par 4 pour les éléments C, K, M, N, S et par 10 pour tous les autres éléments.

Remarque :

La désignation des éléments mentionnés ci-dessous est négligée, dans le cas où leur teneur est égale ou inférieure à celle mentionnée ci-dessous.

M, S	N	C	D,V
1%	0,5%	0,25%	0,10%

Exemple

45 CD 20 – 04

C'est un acier faiblement allié contenant :

- 0,45% de carbone.
- 20/4 = 5% de chrome (c).
- 04/10 = 0,4% de molybdène (D).

20 NC 6

- 0,20% de carbone.
- 6/4 = 1,5% de nickel (N).
- Le % du chrome (c) est inférieure à 1,5%.

Exemple de nuances d'aciers faiblement alliés selon AFNOR :

18 CD 4,	10 NC 6,	16 NC 6,	14 NC 11	
20 NCD 2,	45 S 7,	38 C4,	100 C6,	25 CD 4
35 CD 4,	42 CD4,	20 NC 6,	30 NC 11,	etc…

I.11.7. Désignation des aciers fortement alliés :

Ce sont des aciers caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs éléments d'addition et au moins un de ces éléments a une teneur supérieure à 5%. Dans cette catégorie on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique etc.

Leur désignation normalisée est toujours précédée par le lettre Z ou X suivie : - D'un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone au centième pour cent. -Des symboles normalisés des éléments d'addition rangés dans l'ordre de teneur - Des chiffres indiquant la teneur moyenne en % des éléments d'addition. Dans le cas des aciers fortement alliés les chiffres indiquent directement la teneur en % des éléments d'addition, donc il n'est pas nécessaire de diviser par les coefficients 4 ou 10 comme dans le cas des aciers faiblement alliés

Exemple

Z 160 CDV 12

Z : symbole de l'acier fortement allié contenant :

- 1,6% de carbone.
- 12% de chrome.

Z 6 CN 18 – 09 (c'est l'acier inoxydable courant)

- 0,06% de carbone.
- 18% de chrome.
- 9% de nickel.

Exemple de nuances d'aciers fortement alliés :

Z115WC05, Z200C13, Z200CKDV14,

Z 150 CKD 14, Z 85 WDCV 06-05-04-02, Z 130 WCV 12-04-04, Z 110 DKCVVV 09-08-04-02.

I.12. Soudabilité des aciers non alliés et faiblement allies :

I.12.1. Soudabilité :

On désigne par soudabilité l'aptitude des métaux à être assemblés par fusion. La soudabilité varie en sens inverse de la teneur en carbone et en Céq. Le Céq détermine le pouvoir trempant d'un acier ($\%C_{éq}$ = %C + % de certains éléments d'addition coefficients).

Si l'on représente cette soudabilité par un coefficient : **S** variant de 0 à 10, la courbe représente la variation de **S** en fonction de la teneur en carbone de l'acier. [6]

I.12.2.Coefficient de soudabilité (s) :

Pour les aciers au carbone et faiblement alliés.

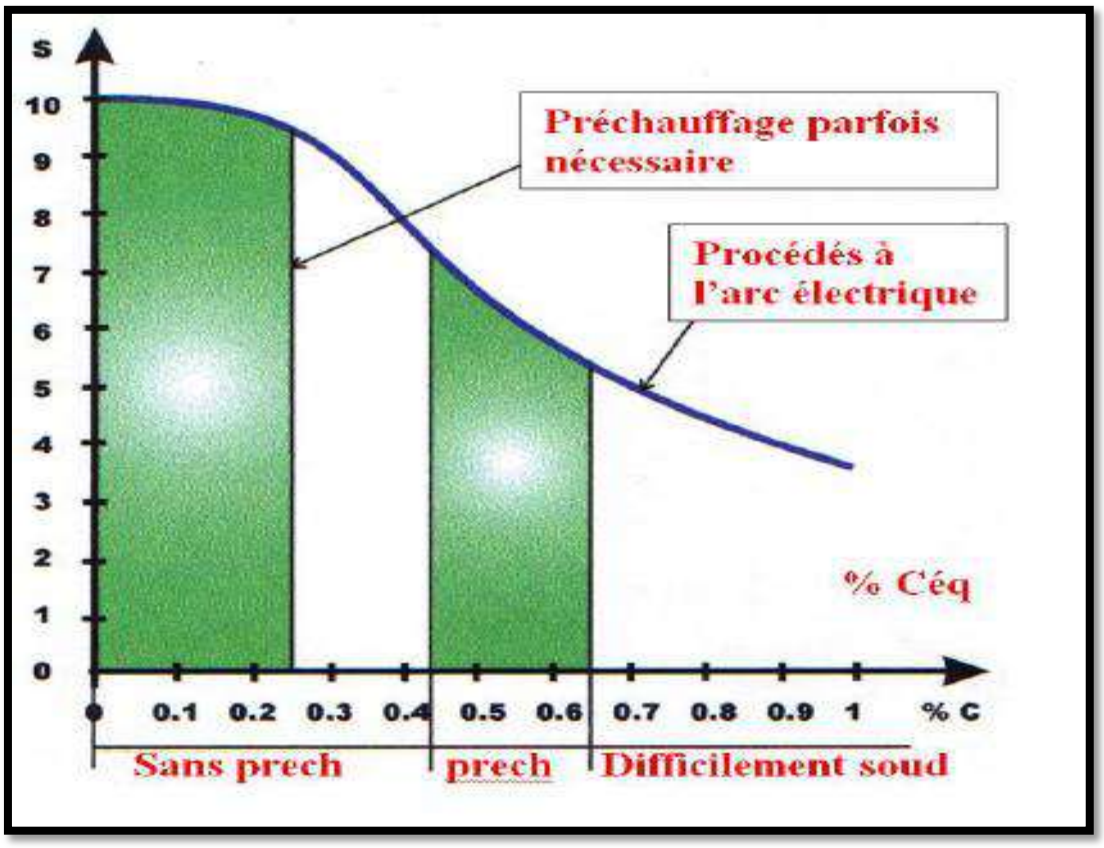


Figure.13 :graphe Coefficient de soudabilité (s) [6]

A. Parfaitement soudable

C = 0 à 0,25 %

S 9 à 10

B. Moyennement soudable

C = 0,25 à 0,45 %

S 7 à 9

C. Soudable avec préchauffage

C = 0,45 à 0,65 %

S 5 à 7

D. Soudage difficile

Soudage sous conditions (préchauffage) indispensable

S < 5

I.12.3.Calcul du carbone équivalent d'après L'IIS :

L'**I**nstitut **I**nternational de **S**oudure a mis au point une formule permettant de calculer le carbone équivalent :

Céq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15

II.1.Elaboration De L'acier :

L'acier est définit comme un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% (voir diagramme Fe-C). Dans l'industrie l'acier est plus utilisé que la fonte, car il possède des propriétés mécaniques relativement bonnes par rapport à ceux de la fonte. Les procédés de fabrication modernes de l'acier sont assez nombreux. Ils donnent des produits de qualités différentes. La majorité d'entre eux consiste pour affiner la fonte de première fusion à la décarburer dans un premier temps, puis de rétablir par des additions convenables les teneurs de ces éléments au niveau désiré. L'acier est obtenu dans des fours ou convertisseurs par différentes opérations métallurgiques tels que l'oxydation des différents éléments d'impuretés, décarburation de la fonte et addition d'éléments alliés nécessaire pour améliorer les différentes propriétés.

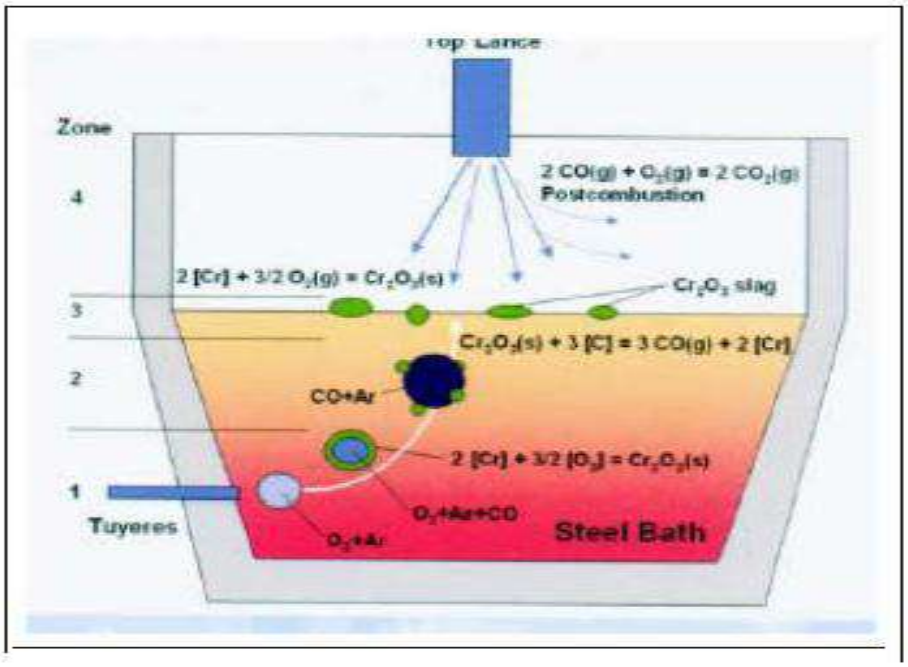


Figure.1 : Elaboration De L'acier

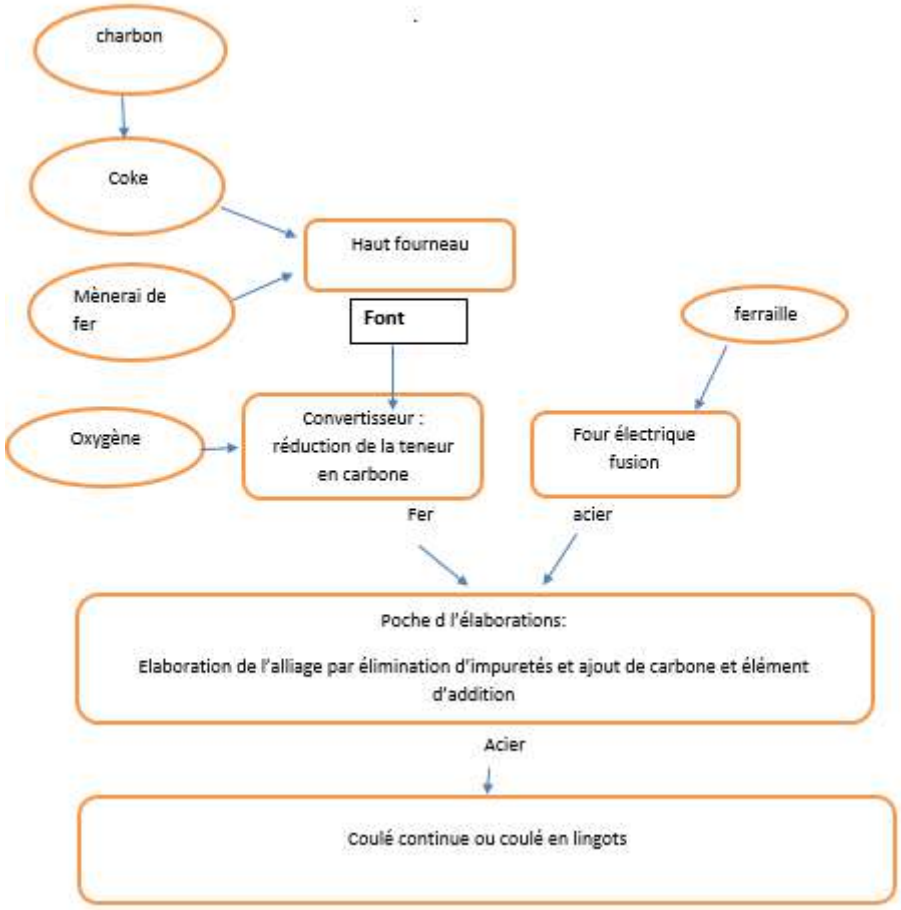


Figure.2 :schéma des étapes d' Elaboration de acier

Les matières premières nécessaires pour l'élaboration de l'acier : - Fonte liquide ou solide (selon le procédé). - Ferraille. - Additions. - Ferro-alliages (alliages de métaux). La masse principale de la charge (90% à 95%) se compose de la fonte et de la ferraille, la composition de la fonte doit correspondre aux exigences du procédé utilisé. Les métaux alliés sont utilisés le plus souvent sous forme de ferro-alliages, destinés à obtenir des aciers de propriétés bien définit. Les additions sont le calcaire sous forme de CaC03 ou CaO ou CaF2 utilisé pour l'affinage électrolytique. La ferraille, le calcaire, les ferro-alliages et CaF2 sont introduits dans les fours ou convertisseurs à l'état solide, dans certains cas sont chauffés au préalable. La fonte est introduite soit à l'état liquide (1250°C) dans le cas des procédés par soufflage d'air ou d'oxygène ce qui nécessite un préchauffage du four. La chaleur est obtenue lors de l'oxydation des éléments alliés au fer dans la charge, ce procédé ne nécessite aucun apport de chaleur extérieure pour atteindre la température de fusion de l'acier (1600°C), soit à l'état solide, dans le cas des procèdes des fours à sole, ce qui exige à fournir de la chaleur en grande quantité pour la fusion de la charge solide at atteindre la température de fusion de

l'acier, la chaleur utilisée est la chaleur de combustion du combustible tels que mazout, gaz naturel ou énergie électrique. Comme il a été déjà mentionné que l'acier est élaboré principalement à partir de la fonte liquide ou solide ou à partir de la ferraille, l'utilisation de l'un ou de l'autre procédé dépend de l'éloignement de l'aciérie du haut-fourneau. Si l'aciérie est loin du H-F, la fonte subit une seconde fusion. Si l'aciérie est près du H-F il est évidemment économique d'utiliser la fonte liquide, laquelle est coulée directement du H-F dans un vaste réservoir sur rail appelé mélangeur Le mélangeur rend donc la marche de l'aciérie indépendante de celle du H-F.[4]

II.2. Processus d'élaboration de l'acier :

Le principe de l'élaboration de l'acier est l'oxydation des éléments accompagnant le fer, tels que le carbone, le silicium, le phosphore, la manganèse etc. jusqu'à la teneur désirée dans l'acier, ainsi que l'élimination des différents oxydes du métal liquide. Ces éléments sont éliminés soit sous forme de scorie ou de gaz. Donc le métal liquide est toujours en contact avec la scorie formée et la phase du gaz. Les réactions chimiques se passent entre ces trois systèmes auxquels on peut ajouter un quatrième système qui est le garnissage du fer. L'acier liquide-scorie-phase de gaz est une condition idéale facilitant le transfert et la transformation de la matière. Au point de vue thermodynamique, les transformations des matières et énergétiques entre les systèmes s'effectuent en une direction donnée définit par la force motrice de réaction, mais toutes les transformations des matières sont limitées par un état d'équilibre qui est caractérisé par l'enthalpie libre AG° (unité de mesure de la force motrice). Généralement il n'est pas possible de laisser dans un système ferme, des transformations métallurgiques s'effectuant dans une seule direction jusqu'à ce que toute la matière s'épuise et sera transférée dans le produit final correspondant pour cela il est très important de connaître :
a) quelle concentration sous les conditions extérieures (P,T) caractérise l'équilibre de la réaction.

b) Jusqu'à quel point l'équilibre d'une transformation peut être changé sous l'influence de l'extérieur. Revenons à l'oxydation des différents éléments, pour cela le métal doit absorber l'oxygène de l'air ou l'oxygène pur ou l'oxygène contenu dans les oxydes de fer de minerais ou des riblons selon les procédés d'affinage. A la fin de l'affinage la teneur en oxygène (02) dans le métal liquide est généralement près de 0,1%, l'utilisation d'un acier avec une telle teneur en oxygène n'est pas économique à cause des propriétés plastiques, coulabilité etc. Donc après l'opération d'oxydation il est nécessaire de désoxyder le métal liquide, l'opération de désoxydation est effectuée avant ou après la coulée de l'acier liquide, par addition d'éléments

de désoxydation. Le tableau ci-dessous nous montre le pourcentage des éléments essentiels tels que Fe, C, et 02 avant affinage, avant et après l'opération de désoxydation.[4]

Tablaeux.1 :le pourcentage des éléments essentiels

Opération	%Fe	% [0]	% C
Fonte + ferraille	93	0,005	3,2-4,5
Oxydation des éléments avec l'oxygène	99	0,05	0,2
Métal liquide (acier non allié)	>99	0,05-0,1	0,01-0,6
désoxydation du métal liquide			
Acier non allié	> 99	0,001-0,01	selon le % désiré

II.3. les aciers électriques :

Les aciers électriques sont élaborés dans des fours chauffes par l'énergie électrique. La différence existante entre ce procédé et le procédé Martin réside dans le mode de chauffage et la construction du four. La matière première destinée à la fusion est constituée essentiellement de ferraille. Les réactions d'oxydation et d'affinage s'effectuent sensiblement de la même façon, seulement l'atmosphère neutre ne peut pas contribuer à la formation d'oxyde de fer à la surface du bain des aciers électriques. Lors de l'élaboration des aciers électriques, l'opération de réduction joue un rôle très important. La température du bain peut dépasser 1800°C ce qui facilite la fusion des inclusions et favorise la réduction des oxydes, la température peut être facilement réglée. Grâce à l'élimination poussée du phosphore, du soufre et de l'oxygène, le procédé électrique est le seul procédé permettant l'élaboration des aciers de qualité supérieure avec des concentrations de P = 0,01%, S = 0,008% et O2 = 0,003%, ainsi que tous types d'aciers alliés et en particulier les aciers à forte teneur en métaux réfractaires.

II.4.Four à arc (Caractéristiques) :

II.4.1.L'arc électrique :

Le plus important parmi les procédés de fabrication d'acier à l'aide de l'énergie électrique comme source de chaleur est le procédé du four à arc électrique. L'aciériste se sert, au lieu d'une flamme, d'un arc électrique produit entre d'énormes électrodes de graphite et le contenu du four.

Le four à arc se compose d'une cuve garnie de réfractaires et l'énergie nécessaire est fournie par des arcs électriques jaillissant entre des électrodes en graphite et la charge.

Les principaux éléments constitutifs du four électrique sont :

— l'alimentation électrique ;

— l'enceinte du four proprement dite capable de contenir d'abord des ferrailles à fondre, de densité relativement faible (donc nécessité d'UN grand volume disponible), puis de l'acier liquide porté à des températures de 1600 à 1700 °C (donc nécessité d'un revêtement intérieur de cuve à l'aide de réfractaires), notamment au fond de cuve (sole réfractaire) ;

— les installations annexes, telles que le système d'aspiration et traitement des fumées et le système d'additions. L'élaboration de l'acier dans un four à arc se déroule en trois phases[7]

II.4.1.1.Principe :

- Le champ électrique entre l'électrode et la ferraille anime les entités chimiques présentes de mouvement à très grande vitesse
- Les entités entrent en collision les unes contre les autres et libèrent beaucoup de chaleur (énergie cinétique = ½ mv^2).
- La quantité totale de chaleur = la sommation de toutes les énergies de collisions + autres formes de chaleur dégagées(réactions chimiques, photochimiques).[7]

II.4.2.L'amorçage :

c'est la première période de la fusion pendant laquelle les électrodes creusent leurs puits à travers la ferraille froide. La puissance électrique et la tension d'arc ne sont généralement pas maximales par souci de stabilité électrique de l'arc.

Dans cette première période, on cherche surtout une vitesse de descente des électrodes rapide, de façon à augmenter la distance arc- voûte et donc à limiter le rayonnement thermique sur la voûte.

II.4.3. La fusion:

dans cette phase, la charge est fondue par rayonnement direct de l'arc sur les ferrailles, ou par échanges de chaleur(rayonnement, conduction) du bain avec les ferrailles. Au début de cette phase, l'arc électrique étant complètement entouré par la charge, il n'y a pas de risques de dégradation pour les réfractaires.

La puissance et la tension d'arc sont pratiquement à leur niveau maximal . Au fur et à mesure de l'avancement de la fusion, les ferrailles situées entre les arcs et les parois sont fondues ou s'affalent dans le bain. Progressivement, les parois du four sont exposées au rayonnement de l'arc et la puissance est alors réduite si ce rayonnement devient trop intense.

II.4.4.Haute température :

Grâce à la température élevée de l'arc électrique (3500° C) on peut atteindre de hautes températures de fusion et dépasser 1800° C.

Elle favorise également la dissolution de matières et d'alliage à fusion difficile.

II.4.5.Elimination du soufre et du phosphore :

La haute température de fusion permet la formation de scories très liquides fortement basiques, grâce auxquelles on obtient une élimination particulièrement bonne du soufre et du phosphore.

II.4.6.Abaissement du taux en oxygène (réduction) :

La teneur en oxygène du bain peut être abaissée à un taux minimum car on peut utiliser des laitiers carburés.

Non intervention de l'atmosphère du four. Le laboratoire du four électrique est pratiquement clos. L'atmosphère au-dessus du bain peut être oxydante au début ; mais pour peu que l'on prenne soin d'éviter tout tirage l'atmosphère ne se renouvelle pas, les gaz oxydants sont remplacés progressivement par les gaz réducteurs où neutres qui se dégagent du bain.

II.4.7.Pas d'oxydation des éléments d'alliage :

L'atmosphère est donc neutre et les réactions s'effectuent uniquement entre le métal et les additions On peut fondre les éléments oxydables (Cr ,W , Ni, Mo) sans craindre de perte par oxydation.

En résume :

Élimination poussée du phosphore, du soufre et de l'oxygène. On arrive aux teneurs limites suivantes : **P** 0,01% **S** 0,008% **O** 0,003%

ACIERS ELECTRIQUES :

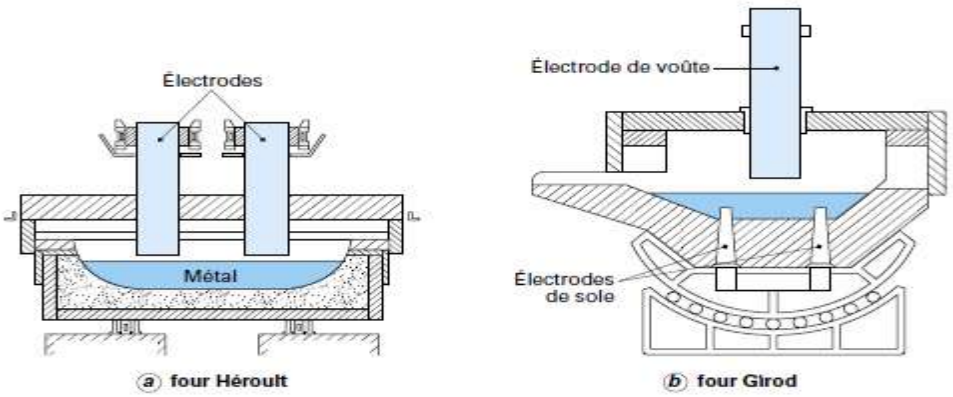
- Aciers au carbone
- Aciers alliés
- Aciers rapides
- Aciers inoxydables
- Aciers réfractaires
- Aciers électriques

II.5.Four Héroult(Four à arc électrique et sole non conductrice) :

Le principe Héroult , selon lequel la formation d'un arc électrique entre les électrodes et passant par la charge, s'est imposé par rapport à d'autres systèmes.[7]

II.5.1.Principe :

par oxydation du carbone de la fonte au moyen d'un oxyde de fer (minerai). Par mélange et fusion de ferrailles et de fonte. Par mélange et fusion des matériaux nécessaires à l'obtention du produit désiré : acier et métaux d'addition.



ⓐ four Héroult ⓑ four Girod

Figure.3: four héroult et four gird[7]

II.6.Description technologique de four a arc :

II.6.1.Four:

Le four a la forme d'une poche en acier revêtue intérieurement d'un garnissage réfractaire. La voûte est amovible et son garnissage siliceux doit résister aux très hautes températures Elle comporte des alvéoles laissant traverser trois électrodes de graphite. Les électrodes sont montées sur potence de hauteur réglable. Toute la construction est montée sur un chemin de roulement en arc de cercle facilitant le basculement du four pour la coulée de l'acier ou du laitier.

Le four d'affinage en poche est un four de puissance plus réduite et fonctionne toujours sur un bain plat d'acier liquide issu du four de fusion. Généralement, ce four poche est un four à courant alternatif.[7]

II.6.2.Four à arc à courant alternatif :

Dans le four à arc à courant alternatif triphasé, les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal. Le métal fond par attaque directe des arcs qui creusent des puits dans la charge métallique solide. Lorsque ces puits sont formés, les arcs travaillent sur un bain liquide dont le volume augmente au cours de la fusion.[8]

Le four se compose des éléments suivants :

- la cuve ;
- le berceau de basculement
- la voûte.

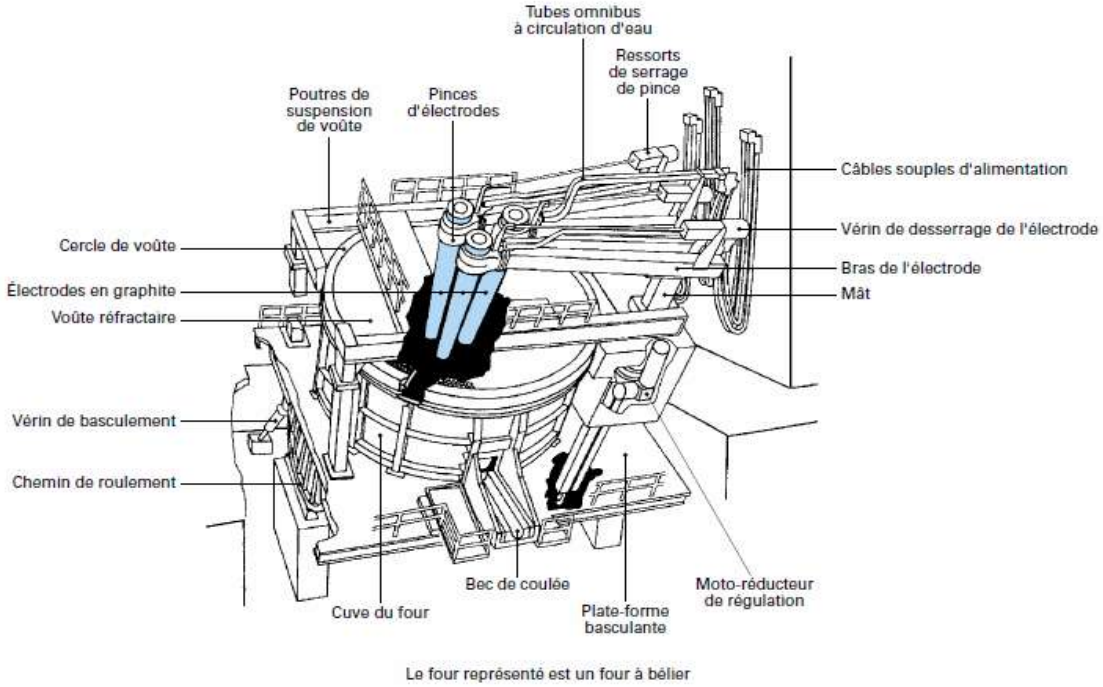


Figure.4 : Schéma d'un four à arcs[7]

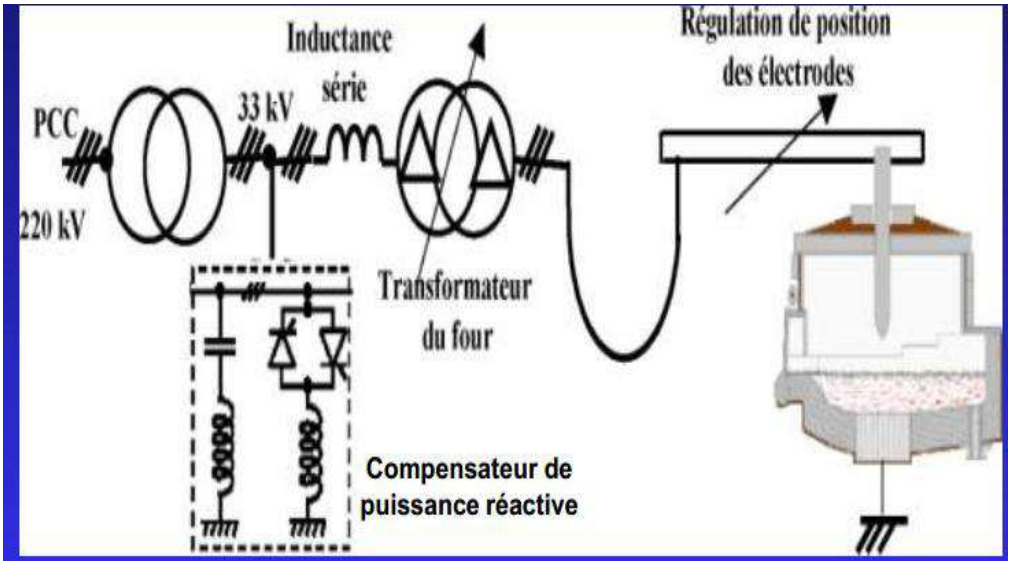


Figure .5 : four à arc à courant alternatif [8]

II.6.2.1.La cuve du four à arc :

La cuve en tôle d'acier renforcée par des nervures est revêtue intérieurement d'un garnissage réfractaire. Cette cuve est composée de deux parties : le fond ou « sole » et la virole. Sur de nombreux fours, cette virole est amovible et il existe une virole de rechange. De cette manière, on gagne un temps précieux, le four pouvant continuer à être utilisé pendant la réfection du garnissage réfractaire.

La technique de garnissage a connu une évolution importante vers les années 1975 par l'apparition de viroles composées de panneaux refroidis par circulation d'eau (water-jackets) en lieu et place de la tôle revêtue de réfractaire.

Deux ouvertures sont prévues dans la cuve pour la porte de décrassage et le bec de coulée.[8]

II.6.2.2.Les réfractaires :

Le garnissage de la cuve du four à arcs est basique Certaines parties peuvent être des panneaux refroidis à l'eau (boites chaudronnées ou serpentins).[8]

Les différentes sollicitations des réfractaires du four sont :

•Mécaniques : impact des ferrailles

•Thermiques :

•impact de l'arc (rayonnement)

•impact de l'oxygène (en cas de soufflage)

•choc thermique

•Chimiques : action du laitier

II.6.2.3.Le berceau de basculement :

Le four à arc possède deux positions de basculement :

— en avant, pour la coulée, avec un angle suffisant pour que le four se vide bien ;

— en arrière, pour le décrassage.

Le basculement est assuré par des vérins hydrauliques, dont la course limite celui-ci. D'autre part, la disposition du centre de gravité et du centre de basculement est telle que le four a toujours tendance à revenir dans sa position normale de travail, de manière à limiter le risque d'accident en cas de défaillance du système décommande.[8]

A. Sécurité :

le centre de gravité du four est étudié pour prévenir les incidents dus à une éventuelle défaillance de son mécanisme de basculement (le four revient automatiquement à la position horizontale)

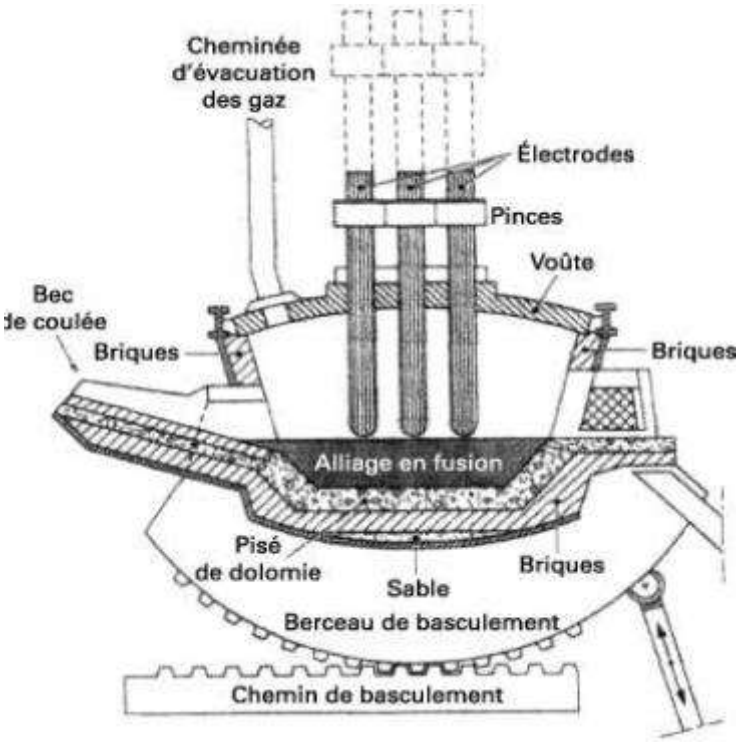


Figure.6 :triphasé basculant [8]

II.6.2.4.La voûte :

La voûte, ou couvercle du four, est réalisée en briques réfractaires maintenues par un anneau de voûte. Elle est percée de trois trous destinés au passage des électrodes ; un quatrième trou sert à l'aspiration des fumées qui sont filtrées avant d'être rejetées dans l'atmosphère.[8]

II.6.2.5.Les électrodes :

Les électrodes sont constituées d'une pâte de carbone avec un traitement de graphitisation. Elles s'usent au cours de la fusion.

Cette fusion d'électrodes est due à deux types d'usure :

· L'usure de pointe est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la durée de fonctionnement. ·

L'usure latérale : cette usure est due à l'oxydation du graphite porté au rouge et est proportionnelle au temps de cycle de fusion.[8]



Figure.7: Les électrodes [8]

II.6.3.La charge s'effectue en une seule fois :

la capacité des fours est très variable de 0.5 à 200 tonnes environ. Pour un four possédant une cuve de 7400 mm^2il faut une puissance du transformateur de 50 000-68 000 k V A. Les tensions s'étagent en général entre 80 et 500V. Pour un grand four, la tension maximale en période de fusion peut atteindre 560 V. Les diamètres des électrodes sont de 600 mm. La capacité maximum est de 180 tonnes. [8]

II.6.4.Conduite des opérations :

1° Chargement des matières :

Le four est chargé à l'aide du panier de riblons, de minerai oxydé et de chaux pour la formation du laitier.[9]

2° Fusion et oxydation :

Le phosphore passe au laitier et le fer s'oxyde après élimination complète du phosphore Le bain est recouvert d'une scorie noire oxydée. La teneur en carbone du bain est alors basse Une prise d'éprouvette renseigne sur la fin de cette phase.

3° Décrassage complet :

La déphosphoration étant terminée, le bain suffisamment chaud et le laitier suffisamment fluide, on arrête le courant et on décrasse soigneusement . Car il est nécessaire que pendant la période suivante, qui ne sera plus oxydante, le phosphore ne puisse pas repasser du laitier dans le métal.

4°Désoxydation et désulfuration :

On rétablit le courant et l'on ajoute de la chaux et des fondants (spath-fluor, silice alumine) pour refaire un deuxième laitier La haute température réalisée permet la formation de carbure de calcium, excellent réducteur, qui se diffuse dans le laitier où il accélère la désoxydation et par la suite la désulfuration On ajoute également des déchets d'électrodes ou de l'anthracite dont le rôle est de désoxyder le laitier. Il est facile de reconnaître que le laitier est pauvre en oxyde : il devient blanc.

5° Additions finales :

Après les essais technologiques sur les échantillons et l'analyse chimique de l'acier , on procède aux additions finales en ajoutant des ferro-alliages, ou les éléments alliés (Ni, Cr, W , Co, etc.) pour ajuster l'acier à la composition voulue.

6° La coulée :

Le métal amené à la température et à la composition recherchée peut être coulé après le décrassage.

II.7.ConduiteetOpérations métallurgiques au four électrique à arc:

On distingue 4 groupes d'opérations :

1/- réglage analytique du bain : corriger % en C, Mn, Si,…

2/- Elimination des impuretés : réduire les teneurs en éléments indésirables tels que P, S, O_2, H_2, N_2, …

3/- Obtention d'une certaine propreté du métal : contrôler l'état inclusion aire (nature et forme des inclusions non-métalliques)

4/- Dilution des éléments résiduels tels que Ni, Cr, Cu,…[9]

II.7.1.L'affinage :

durant l'affinage sont effectuées la montée en température de l'acier jusqu'à la température de coulée ainsi que les différentes opérations métallurgiques. Dans cette dernière phase, la puissance et la tension d'arc sont abaissées à un niveau compatible avec l'usure des réfractaires des parois latérales.

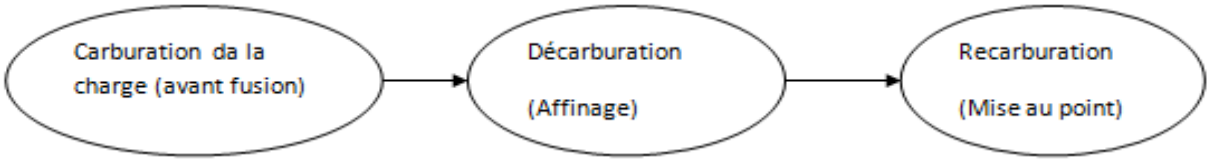
Traditionnellement, les aciéries électriques sont équipées de deux fours à arc :

— un four pour la fusion des ferrailles ;

— un four pour l'affinage en poche.

L'aspect le plus spectaculaire de l'affinage est naturellement la, décarburation son action ne se limite cependant pas la cela

L'Expérience industrielle a amené les aciéristes électrique a recherche au four a arc l'évolution suivante



A priori on aurait pu par contre rechercher un passage aussi direct .que possible de la nuance de la charge a la nuance visée tout au moine pour le carbone .[9]

Nous allons voir et après les raisons essentielles de cette situation qui sont de quatre ordre

_élimination d'élément nuisible.

_ Effet mécanique de brassage.

_ meilleure maitrise et contrôle de l'affinage.

_ limite inférieure en carbone a ne pas dépasser.

II.7.2.Intérêt d'un affinage poussé(travail du bain) :

avant d'éliminer le phosphore, il faut avoir oxydé les éléments plus réducteur que lui, qui risqueraient de la protéger. c'est la un intérêt de l'affinage poussé au four basique .[9]

II.7.2.1.l'effet mécanique de brassage :

correspondant au dégagement de co, semble cependant être l'action essentielle :

_pour l'homogénéisation du bain (température, composition).

_ pour l'accélération des réactions chimique.

_ pour l'entrainement des gaz ou des inclusion.

II.7.3.Arrêt de l'affinage :

Noun avons vu les argument qui amènent a effectuer un affinage poussé qui se traduit par une fort décarburation, nous allons voir maintenant que cette décarburation ne doit pas se terminer a n'importe quel niveau final, ce qui revient a choisir ce fait un niveau de départ assez élevée en carbone avant l'affinage.

La décarburation conditionne le taux d'oxygène, pour une température et une pression données.[9]

II.7.4.Conduite pratique de l'affinage :

II.7.4.1. composition visée de la charge :

La principe de base retenu pour avoir un acier de qualité est donc un bon travail de bain, c'est-à-dire une décarburation a l'affinage de l'ordre de **0.20%**.

A cette décarburation contrôlée, il faut ajouter la décarburation inévitable pendant la fusion qui sera de l'ordre de **0.15%** par exemple.

Un troisième élément est le niveau minimal en carbone en deçà duquel il est préférable de ne pas descendre **0.10%_0.15%_**soit**0.12%**environ.

Au total nous sommes donc amenés a viser une teneur de départ en carbone de la charge , qui pourrait être de :**0.12+0.20+0.15 = 0.47%**

II.7.4.2. contrôle de l'affinage :

A l'oxygène ou au minerai, le bouillonnement du bain (dégagement de co), la couleur du laitier,(noir avec l'oxyde de fer) traduisent l'avancement de l'affinage.

Avec l'oxygène , le moyenne classique de contrôle consiste à observer l'allure des flamme et des fumés au four , la « chute « des flamme traduisant le passage du bain à l'extra-doux (0.10%de carbone). Insistons ici sur le fait que dans les élaboration courantes ce stade ne doit sous aucune prétexte être dépassé et qu' il conviendrait même d'arrêter, l'affinage l'légèrement avant.

II.7.4.3. évolution de bain :

En résumé , l'évolution de la composition serra en moyenne le suivante

Tableaux.2 :l'évolution de la composition

Charge	C% 0.40-0.60	Si%	Mn% 0.60-0.80	P%	S%
fin de fusion	0.30-0.40	basique 0 acide variable	0.30-0.40	0.020-0.25	0.025
après affinage	0.10-0.115	basique 0 acide 0-0.10	1.15-0.25	0.010-00.015	0.020

L'affinage permet également l'éliminations totale ou partielle des éléments plus oxydables que le fer, dans l'ordre Al , Ti , SI , Mn , Cr, p, Fe.

Et cela d'autant mieux qu'ils sont plus réducteur, que leur teneur est plus élevée et que leur activité est plus grande par rapporte aux constituants du laitier selon leur basicité ou d'acidité.

L'action la plus nette de l'affinage est celle sur l'hydrogène qui peut être abaissé jusqu'' a 2.5 cm^3/100 g dans les aciers au carbone.

II.7.4.4. divers :

Les consommations d'agents comburants pour l'affinage sont de l'ordre de 16-25 kg /t de minerai et de 5*13Nm^3 /t avec l'oxygène , les valeurs les plus faibles correspondent sans doute a une utilisation conjuguée minerai/oxygène les valeurs les plus élevée à un affinage basé uniquement sur l'un ou l'autre :

20-250kg/t……..…avec minerai seul

6-9 kg/t …….. avec oxygène seul

La durée de l'affinage est d'environ 1 h - 10 h avec minerai et de 3 – 9 mn avec oxygène

II.7.5. La déphosphoration :

elle se fait par insufflation au moyen d'une lance émergée, refroidie à l'eau, d'un mélange de chaux et de spath en poudre véhiculé par l'oxygène pur. Le débit de poudre et le débit d'oxygène, contrôlés automatiquement, apportent ainsi à l'intérieur du four les éléments nécessaires à la composition du laitier.

$2P + 5FeO + nCaO \longrightarrow P_2O_5, nCaO$

Le Phosphore augmente la fragilité de l'acier. Pour un acier de coulée continue dont le C est > 0,25%, il est recommandé que le P soit < 0,030%car il augmente sa criquabilité.

A. La déphosphoration est favorisée par :

♦ une température « basse »

- la réaction étant exothermique
- à basse température le phosphore s'oxyde avant le carbone
- la température doit être suffisamment élevée pour avoir un laitier fluide :

en pratique 1550 –1600^0 C assure un bon avancement de la réaction.

♦ un laitier basique : la chaux fixe le P_2O_5 formé.

♦ un laitier suroxydé : Le FeO est un réactif de la réaction.

♦ un laitier non saturé en P_2O_5.

Réaliser autant que nécessaire la séquence :

- décrassage du laitier formé
- addition de CaO et de FeO (successivement ou simultanément)

Au FA, la déphosphoration commence dès le début de la fusion des ferrailles, car toutes les conditions favorables sont pratiquement satisfaites (chaux, basse température, FeO).
■ En fin de fusion, le déchiquetage de la ferraille encore non fondue, par soufflage d'oxygène favorise la formation de FeO dans le laitier et accélère de ce fait la déphosphoration.
■ Le décrassage du laitier formé constitue le moyen le plus sûr d'éliminer définitivement le phosphore du métal.

II.7.6..La décarburation :

elle s'effectue par insufflation, au moyen d'une lance immergée, de poudre de graphite ou de coke véhiculée par l'air dans le bain d'acier recouvert ou non de laitier.

II.7.7. La désulfuration :

Le soufre est présent dans le métal sous forme d'inclusions (sulfures, oxysulfures). L'inclusion principale est la pyrite [FeS].
- La solubilité du Soufre dans le fer étant limitée, les sulfures précipitent au niveau des joints des grains lors de la solidification du métal.
- Le fer et la pyrite forment un eutectique ($T_f = 988^0$ C), et en présence d'oxygène le soufre forme des oxysulfures de température de fusion encore plus basse.
- Les couches inter-granulaires riches en sulfures se ramollissent pendant le chauffage (laminage à chaud ou forgeage); les joints de grains sont détruits et des criques peuvent apparaître lors du travail plastique : c'est le phénomène de fragilisation à chaud de l'acier

La désulfuration est la réaction d'élimination du soufre du métal.
■ Le soufre s'élimine essentiellement par des réactions chimiques d'interface métal/laitier.
■ Le transfert du soufre du métal dans le laitier est régit par l'équilibre :

$$[S] + (O^{2-}) \longrightarrow [0] + (S^{2-}):$$

dans l'acier: [ ] dans le laitier :( )

II.7.8. Les additions métalliques :

Produit de réduction. Ferro-alliages les additions s'effectuent ainsi par insufflation, véhiculées par air ou par azote, toujours au moyen d'une lance immergée.

II.7.9.La chaux :

La chaux favorise :

• la formation d'un laitier basique protecteur

• la réaction de déphosphoration

• La réaction de désulfuration

La chaux doit être :

- Réactive (se dissout rapidement)
- Propre(minimum d'impuretés)
- Résistante (non friable pour éviter les fines)
- Cuisson appropriée (ni d'incuits ni de surcuits)

II.7.10.Le laitier :

Les caractéristiques physico-chimiques et thermiques du laitier sont variables. La plupart des réactions chimiques se produisent à l'interface métal/laitier et dépendent de ce fait de la nature du laitier et du niveau de brassage du bain. Selon son indice de basicité, le laitier peut être plus ou moins agressif vis-à-vis du garnissage réfractaire du four.[9]

II.8.les traitement thermiques des acier :

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.[10]

II.8.1.Le cycle thermique :

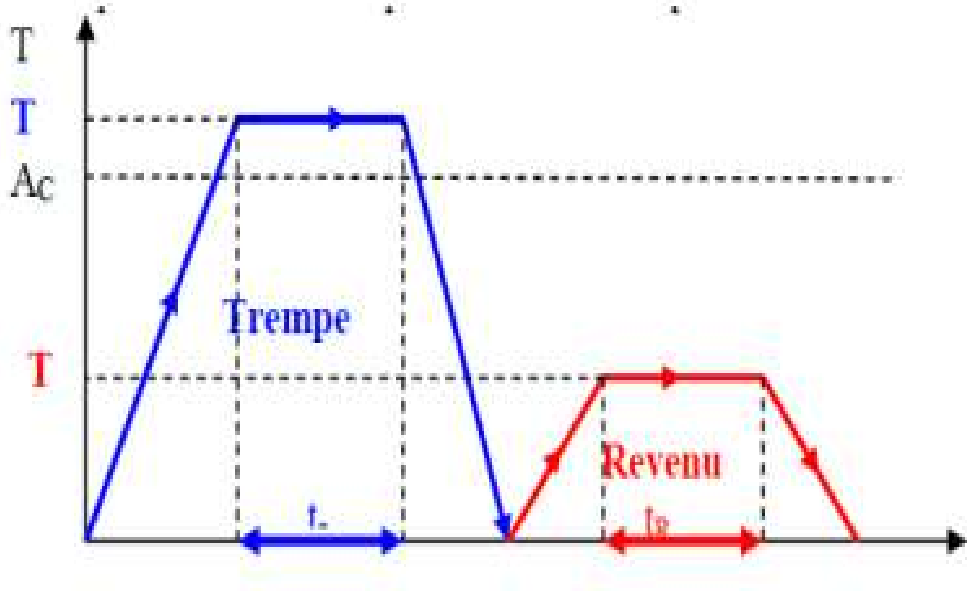


Figure.8: Le cycle thermique [1]

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).

II.9. Définitions et procédés des traitements thermiques :

II.9.1. 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.

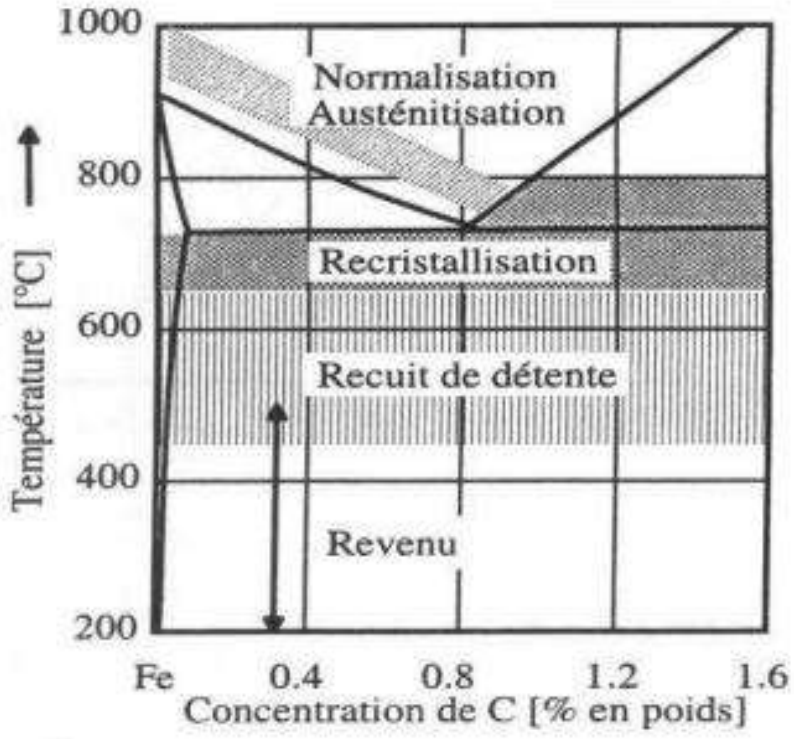


Figure.9 : Domaines de températures d'austénitisation et d'autres traitements thermiques des aciers au carbone [12]

II.9.2.La Trempe :

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénites 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 :[11]

II.9.2.1.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.

II.9.2.2. 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). 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 .

II.9.2.3. 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.

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, et surtout des TRC (diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, dans le cas des trempes.

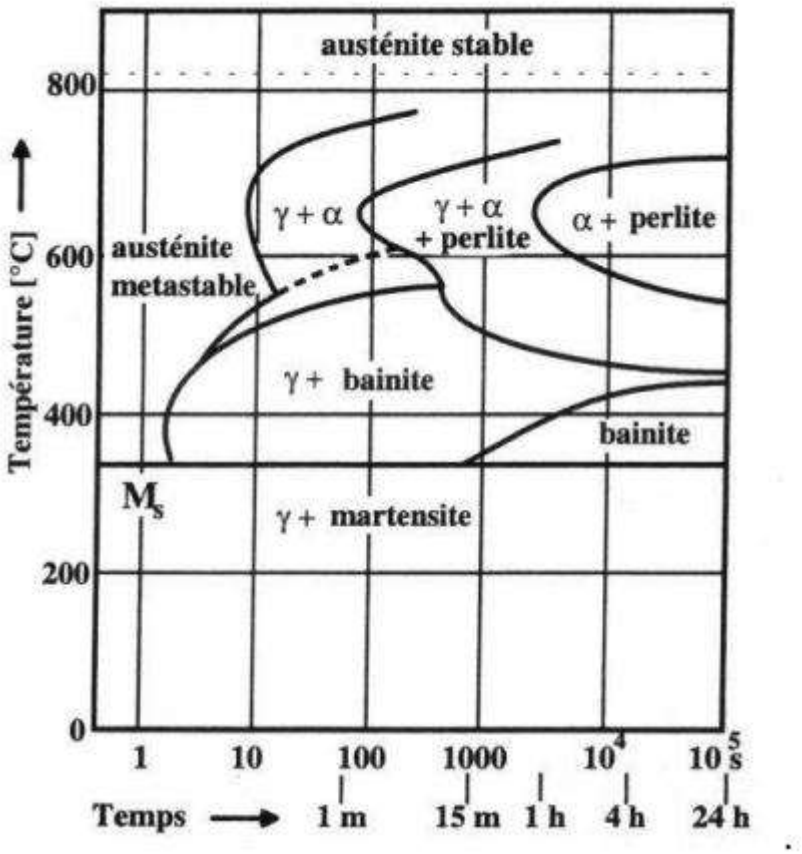


Figure.10 : Courbe TTT [12]

II.9.3.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).

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.[12]

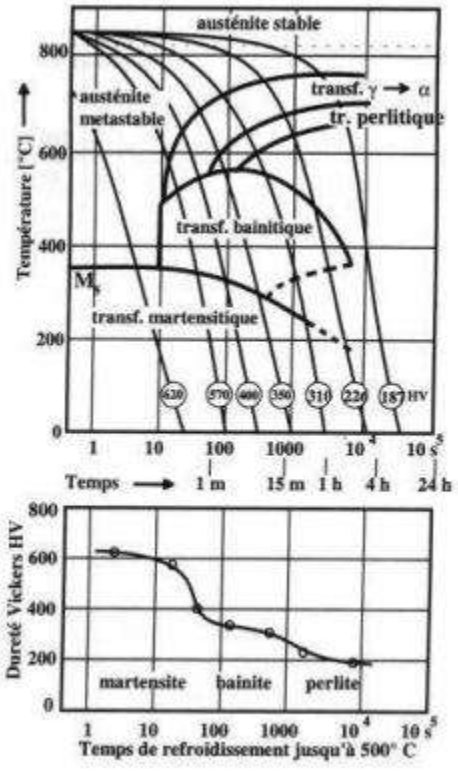


Figure.11 : Courbe TRC et dureté après trempe [12]

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état 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).

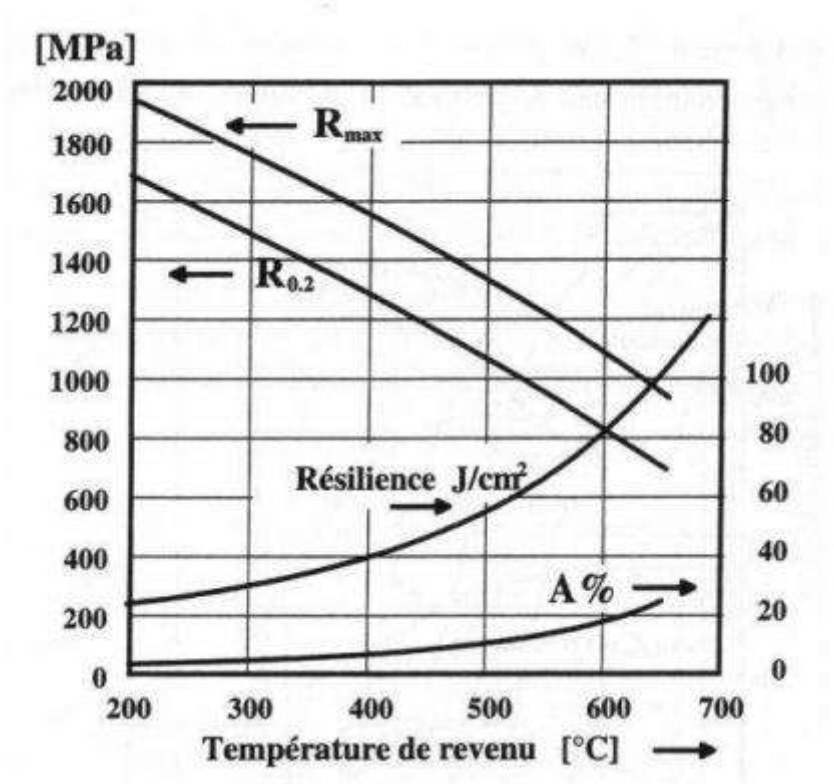


Figure.12 : Diagramme de revenu [12]

II.9.4.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 néfastes de tels états, 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'états proches de l'équilibre stable. Le cycle thermique de traitement comprend: - un chauffage jusqu'a une température dite de traitement dépendant 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.[13]

II.9.4.1.Types de recuit :

.a)Recuit de normalisation :

Le recuit de normalisation consiste en un traitement thermique des aciers faiblement alliés comportant une austénitisation suivie d'un refroidissement à l'air calme, permettant en particulier d'affiner le grain. Ce traitement comme le recuit complet conduit à des structures ferrite-perlite. Cependant la température de maintien est plus élevée. En outre le refroidissement à l'air calme utilisé est plus rapide que dans le cas du recuit complet. Les structures ferrito-perlitique obtenues correspondent donc à des grains ferritiques fins et à de faibles espacements lamellaires dans la perlite.[13]

Ces microstructures très homogènes peuvent être recherchées dans certaines applications mécaniques et constituent un état initial pour le traitement d'austénitisation avant trempe.

Cycle thermique :
A ➔B : Chauffage;
B ➔C : Maintien pendant de 2 à 3 heures à une température comprise entre 700 °C et 1 200 °C;
C ➔D : Refroidissement lent à l'air.

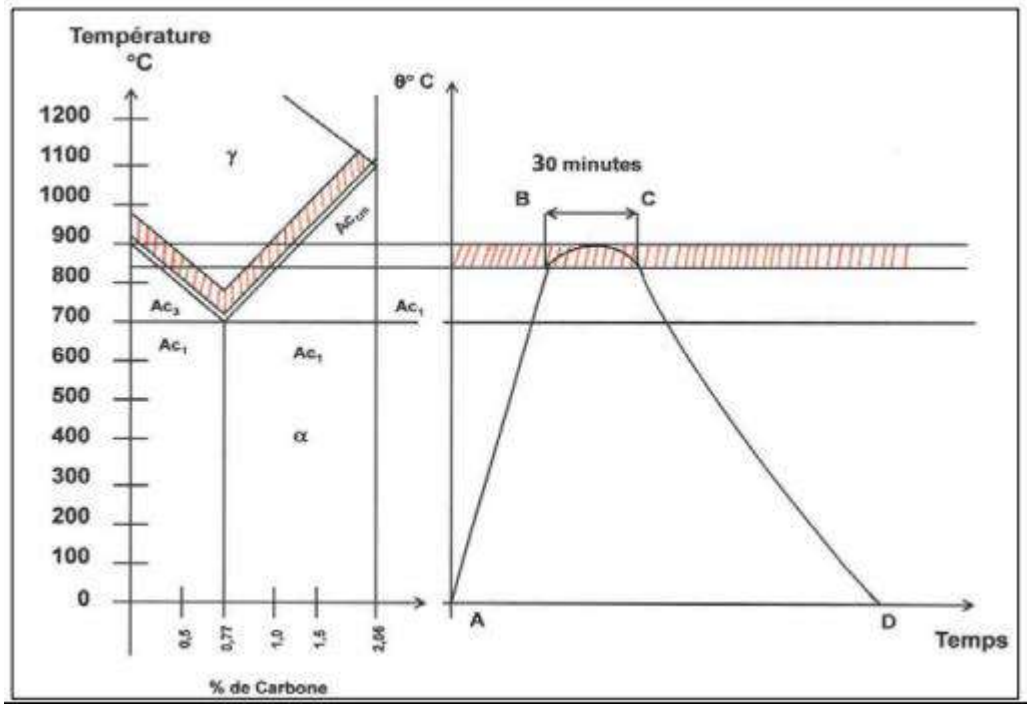


Figure.13 : Cycle thermique de Recuit de normalisation [9]

.b) Recuit complet :

Le recuit complet est un traitement qui annule tous les traitements précédents. Bien que semblable au recuit de normalisation, le refroidissement se fait toutefois de manière contrôlée au four car selon la nuance d'acier traitée et l'épaisseur, il se peut que le refroidissement à l'air calme suffise à tremper la pièce ou à donner une structure qui rend l'acier non apte à l'usinage. Les températures et les temps de traitement sont sensiblement les mêmes que pour le recuit de normalisation avec un maintien d'une minute par millimètre d'épaisseur de la pièce. Ce recuit permet de détruire partiellement ou totalement l'effet d'écrouissage que le métal a subi préalablement.

Cycle thermique :
A →B : Chauffage;
B →C : Le cycle thermique est semblable à celui du recuit de régénération sauf que la température de chauffage est un peu plus élevée;
C →D : Refroidissement très lent dans le four.

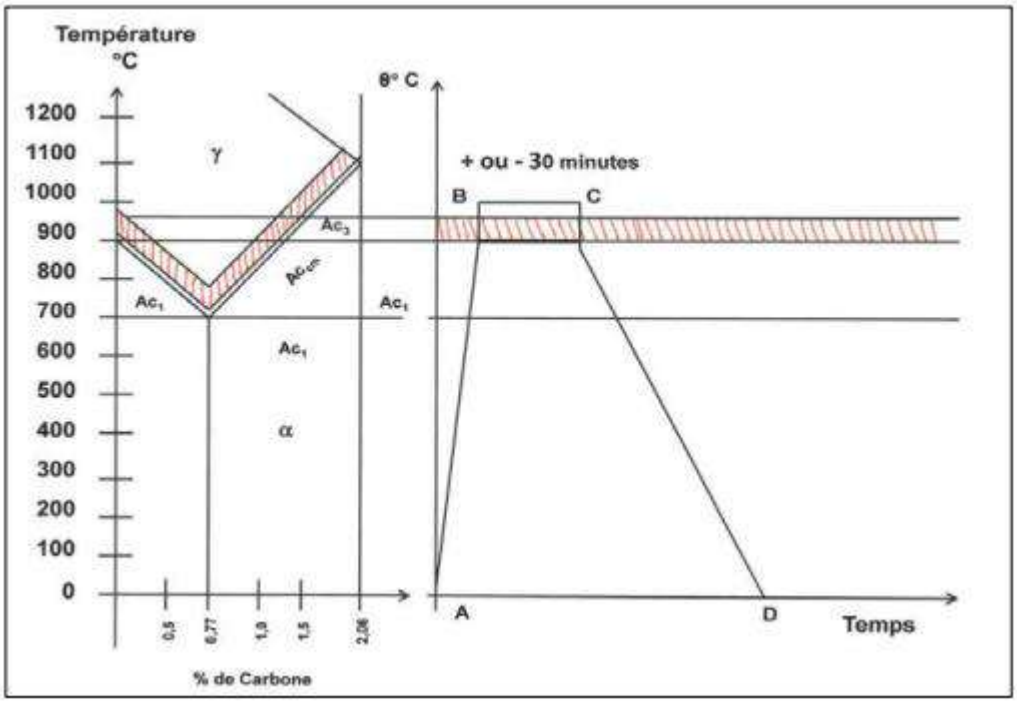


Figure.14 : Cycle thermique de recuit complet [9]

.c)Recuit de sphéroïdisation (ou de coalescence ou de globalisation):

Ce recuit consiste, après chauffage à une température légèrement inférieure à Ac1, à maintenir l'acier à cette température pendant un temps plus ou moins long, puis à le refroidir lentement, de façon qu'il soit dans un état aussi doux que possible et exempt de contraintes. Il s'agit également d'un recuit permettant de faire évoluer la forme géométrique des carbures, telles que les lamelles de cémentite, vers la forme sphérique stable. Il sert également à améliorer la capacité de déformation à froid du matériau traité.

Cycle thermique :
A ➔B : Chauffage;
B ➔C : Maintien pendant de 2 à 3 heures à une température comprise entre 700 °C et 730 °C, autour
de Ac15;
C ➔D : Refroidissement très lent dans le four.

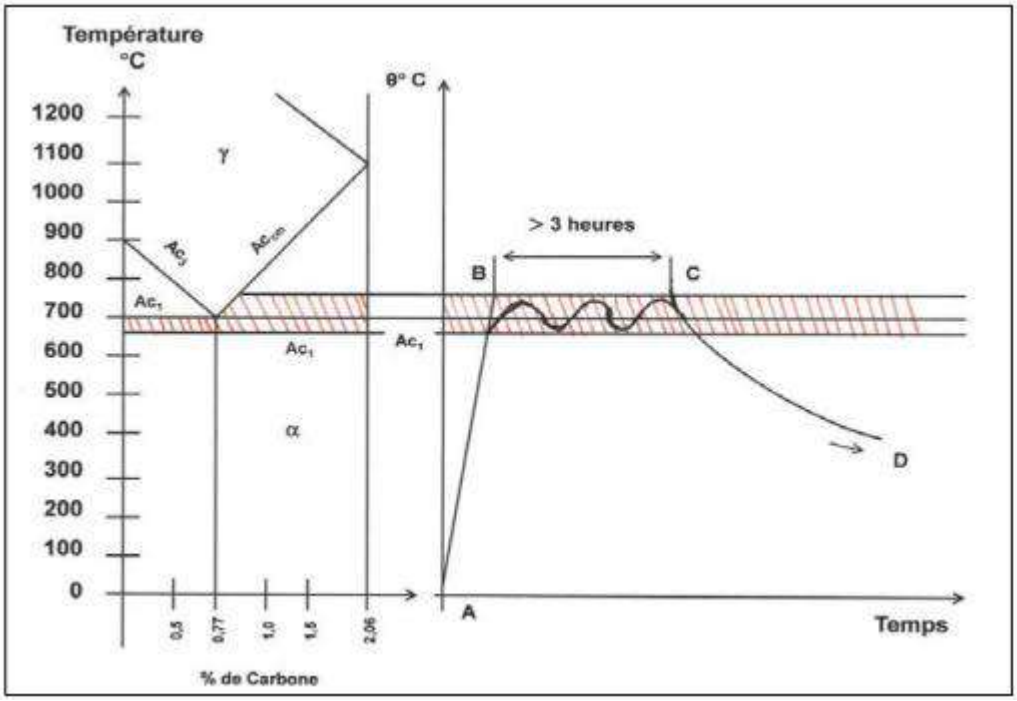


Figure.15 : Cycle thermique de Recuit de sphéroïdisation [9]

.

.d) Recuit de recristallisation :

C'est un recuit destiné à faire recristalliser un acier pour obtenir un grain plus fin, après un recuit déstabilisation. On l'utilise également pour régulariser les effets des contraintes provoquées par la déformation à froid à une température inférieure, les parties extérieures des pièces ainsi façonnées étant plus écrouies qu'à cœur. Dans ce cas, la structure cristalline du métal a été d'autant plus modifiée que les contraintes de déformation ont été plus importantes. Ce traitement est absolument nécessaire entre chaque opération de déformation importante. La recristallisation s'accompagne généralement d'une réduction de la résistance et de la dureté d'un matériau, ainsi qu'une augmentation simultanée de la ductilité.

Cycle thermique :
A ➔B : Chauffage;
B ➔C : Maintien pendant au moins 5 heures à une température comprise entre 500 °C et 700 °C
(température proportionnelle au taux d'écrouissage);
C ➔D : Refroidissement lent.

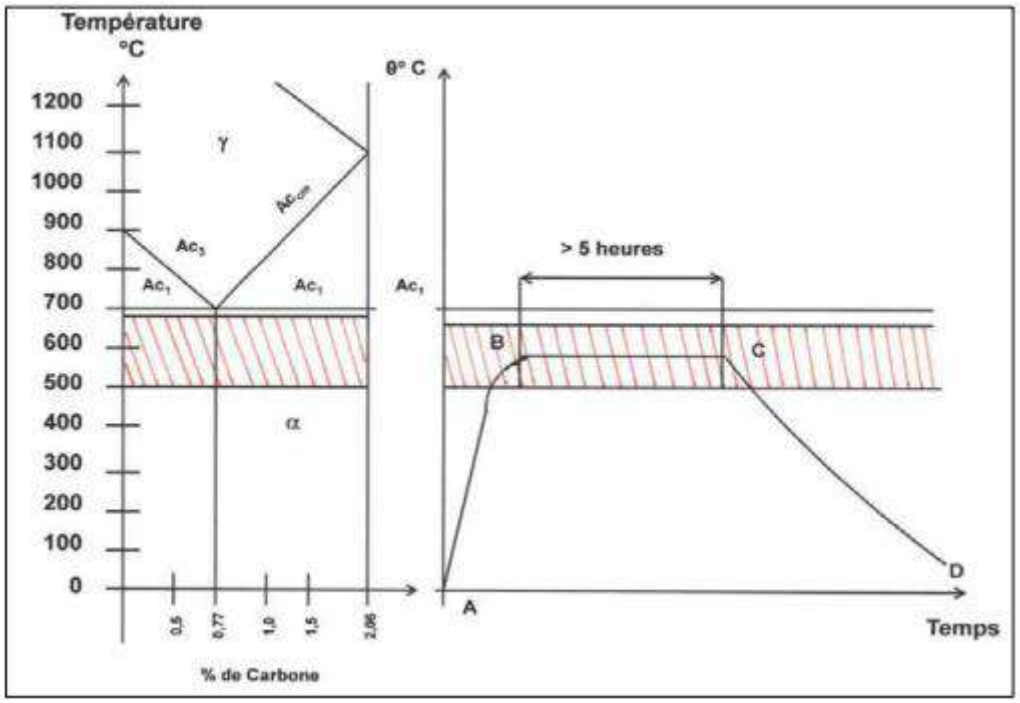


Figure.16: Cycle thermique de Recuit de recristallisation [9]

e) Recuit de détente :

Ce traitement est utilisé pour éliminer les tensions des pièces soudées et refroidies rapidement ou des produits fabriqués à froid. Le recuit est obtenu en traitant thermiquement la pièce à une température donnée pendant un certain laps de temps, puis en la refroidissant lentement jusqu'à revenir au seuil de température ambiante. Les paramètres temps et température dépendent de la nature de l'alliage. Il est également très utile pour détendre les contraintes emmagasinées pendant la mise en service Del 'outil. Le recuit de détente est toujours effectué à une température inférieure à la température de transformation.

Cycle thermique :
A →B : Chauffage;
B →C : Maintien de 5 à 10 heures à une température comprise entre 500 °C et 650 °C;
C →D : Refroidissement très lent dans le four (éviter le refroidissement à l'air).

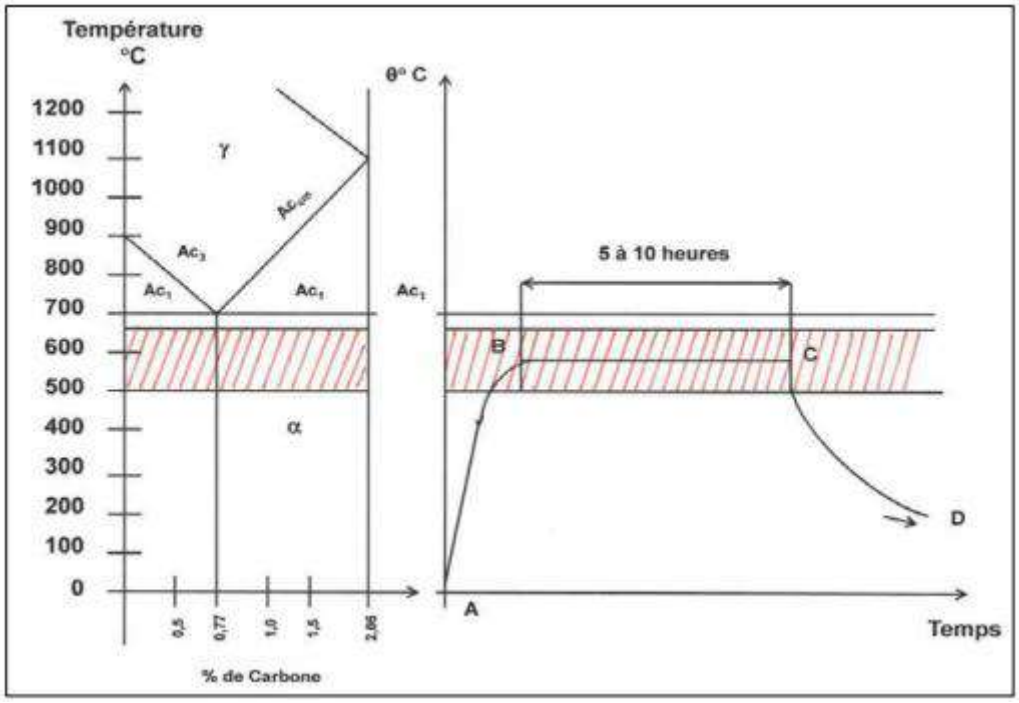


Figure.17 : Cycle thermique de Recuit de détente [9]

f) Recuit d'homogénéisation :

Le recuit d'homogénéisation s'applique aux aciers bruts de fonderie pour lesquels le refroidissement entraîné une mauvaise répartition des constituants (hétérogénéité). Il a pour but de réduire cette hétérogénéité.

En fait, ce traitement vise à la fois une composition chimique homogène et adoucissement du matériel, par chauffe et retenue prolongée à température élevée.[13]

Cycle thermique :
A →B : Chauffage;
B →C : Maintien pendant plusieurs heures à une température élevée, soit de 1000 °C à 1200 °C =
domaine austénitique;
C →D : Refroidissement lent.

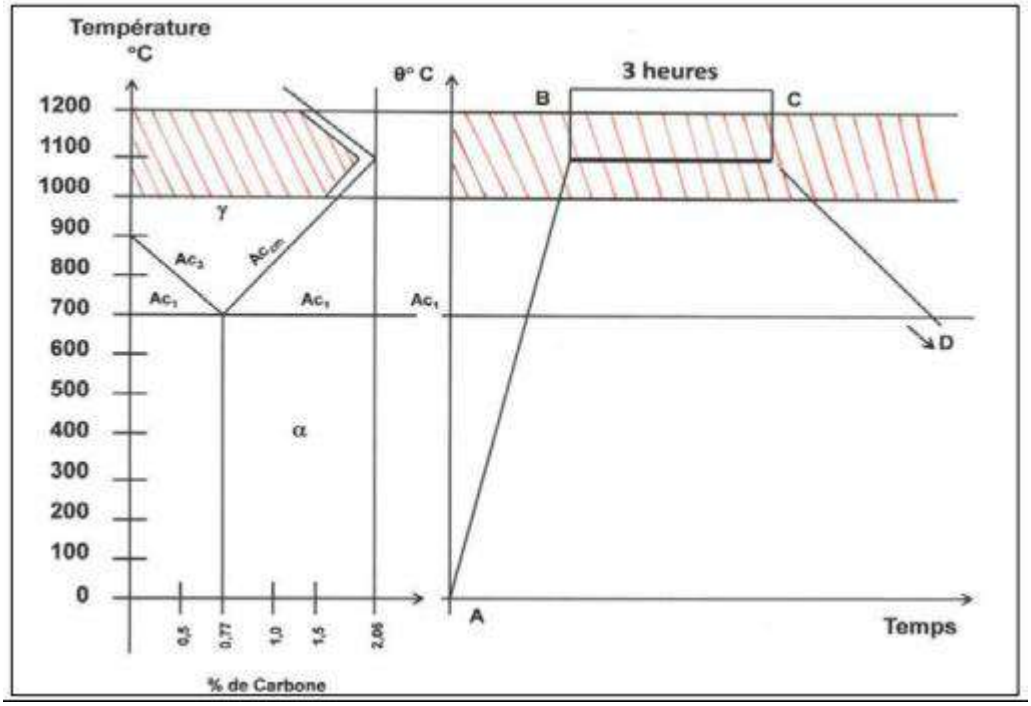


Figure.18: Cycle thermique de Recuit d'homogénéisation [9]

Chapitre III
matériau et résultats expérimentaux

III.1. Introduction :

De tous les alliages métalliques, les aciers alliés sont parmi ceux les plus couramment utilisés dans les applications industrielles. La grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser des traitements thermiques conditionnent les choix de leurs propriétés mécaniques et permet de couvrir une gamme d'applications extrêmement large. Les propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure des alliages, donc à la composition chimique et par suite aux traitements thermiques appliqués.

Les aciers faiblement alliés, Ils sont largement utilisés en raison de leurs hautes résistances mécaniques et ténacités obtenues généralement par l'application des traitements thermiques de trempe et revenu, on a étudié ce nuance d'acier 42CD4 sans pour autant répondre à tous les problèmes que rencontrent les utilisateurs de ce matériau

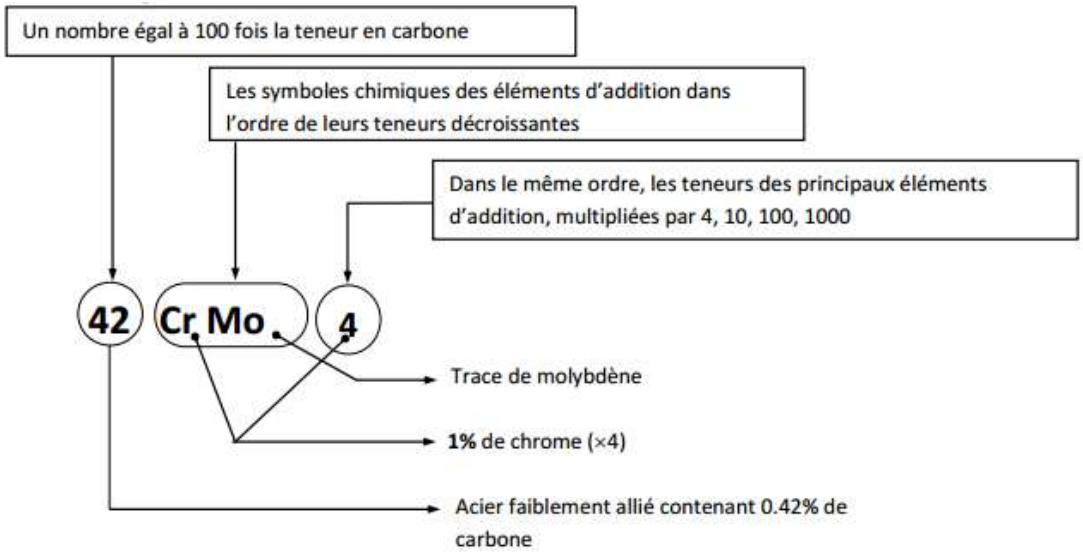
III.2. Définition :

42CrMo4 est un acier pour trempe et revenu, qui présente un bon compromis entre dureté et résilience à l'état trempé et revenu. Après trempe dans l'huile il sera durcit à cœur jusqu'à un diamètre de 60mm. La micro structure pour des diamètres de barre supérieurs ne sera pas complètement martensitique. L'acier est apte à la trempe par induction. Le 42CrMo4 peut être livré « à l'état recuit » afin d'améliorer son usinabilité. Il s'agite sur un acier hypoeututoide selon le diagramme (fer, carbone).[14]

III.2.1.Norme standard :

UNI7845 42CrMo4	DIN 17200 42CrMo4	ISO 683-1 42CrMo4	AFNOR 35-552 42CD4	AISI-SAE 4140

III.2.2.Désignation de 42CD4 :



III.2.3.Applications :

Construction mécanique en général, composants de machine, axes, tourillons, bielles, arbres manivelle, vilebrequins, arbres de transmission, pignons, roues dentées, bandages, plaques de base, pièces de montage.

III.2.4.Propriétés d'emploi :

Bonne résistance à l'usure

Intensité de trempe élevée.

III.3. Echantillonnage :

L'échantillons ont été prélevé dans des ébauches coulées dans le moule en sable vert dénommées localement « Epsilon « la partie dans laquelle s'effectue prélèvement (partie de prélèvement des échantillons) .

De ces ébauches nous avons confectionne des éprouvettes destinées aux essais de résilience et aux essais de traction selon la norme DIN la composition chimique a la coulée des éprouvette a été réalisé avec l'analyse spectrale.

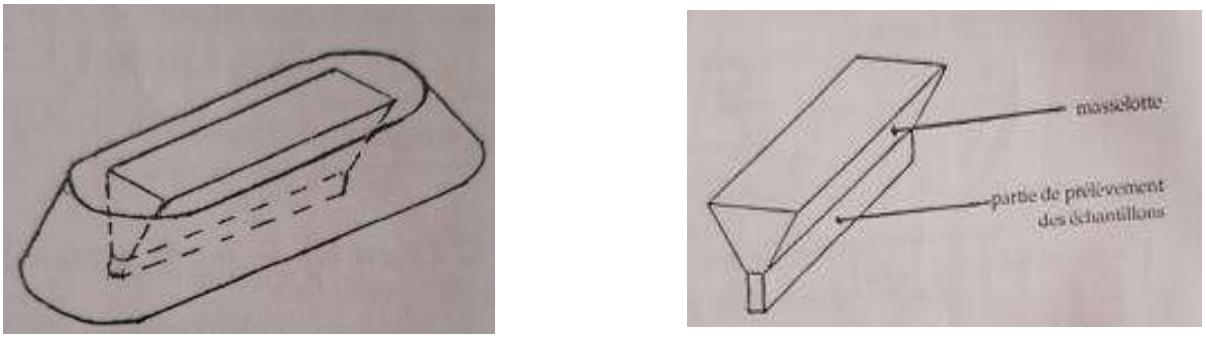


Figure.1: éprouvette en Y [15]

1-masselotte

2-partie de prélèvement des échantillons

III.4.Composition chimique général :

Tableaux 1 : Composition chimique général

Eliment	C%	P%	S%	Cr%	Mo%	Si%
Min	0.38	-	-	0.9	0.15	-
Max	0.45	0.035	0.035	0.12	0.30	0.40

III.5. influence des éléments d'alliages sur les aciers étudies :

Les éléments d'alliages jouent un rôle important dans le changement microstructural, notamment dans la formation des différentes phases en particulier la martensite. Ces éléments influent sur la vitesse critique de trempe nécessaire pour former ces phases, mais également sur la morphologie de la martensite obtenue.

III.5.1. Le carbone :

Est un élément gamma gène par excellence, stabilise l'austénite. Plus sa teneur est élevée, plus la ferrite a besoin de temps pour se constituer. Le carbone apporte la capacité de durcissement des matériaux en participant à la précipitation de carbures de (fer, Fe3C).

III.5.2. Le chrome :

a par contre une grande affinité pour le carbone avec lequel il forme des carbures plus durs que la cémentite $(Fe_3Cr)_3C$. Aussi, il accroit la dureté, la résistance à la traction et la résistance à l'usure sans pour autant augmenter la fragilité.

III.5.3. Le molybdène:

Est un élément d'addition principal dans la composition chimique étudiée. Il élève la résistance à la traction et à la fatigue, augmente la dureté et la trempabilité tout en diminuant l'allongement. Il évite le grossissement des grains austénitiques à haute température. Des études ont montré que le silicium retarde l'apparition de la cémentite lors du revenu

III.6. Diagramme de coefficient de dilatation thermique :[16]

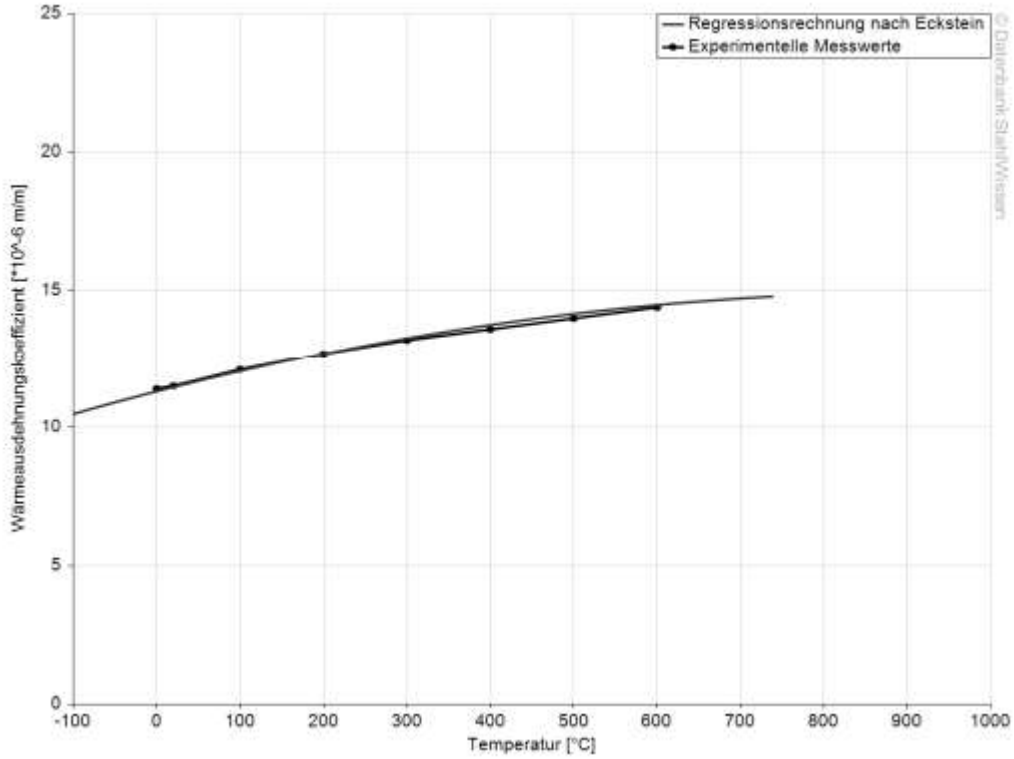


Figure.2 ;Diagramme de coefficient de dilatation thermique :[16]

III.7.Diagramme de conductibilité thermique :[16]

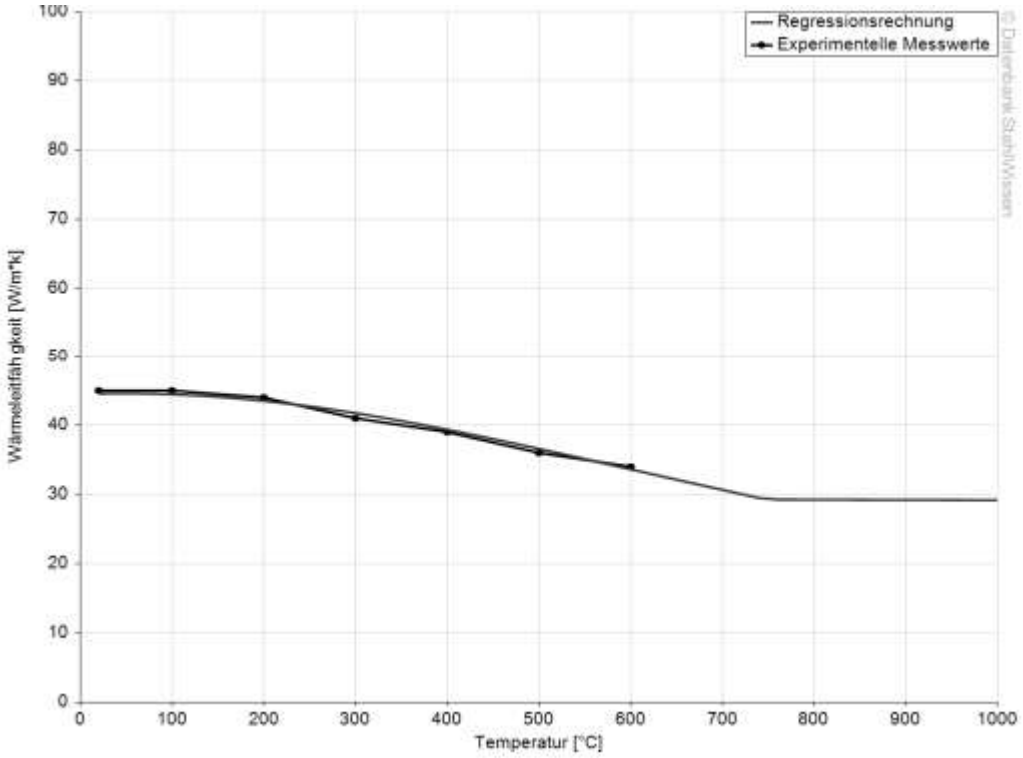


Figure .3 : Diagramme de conductibilité thermique :[16]

III.8.Diagramme TT d'un acier faiblement allié (42CD4) :

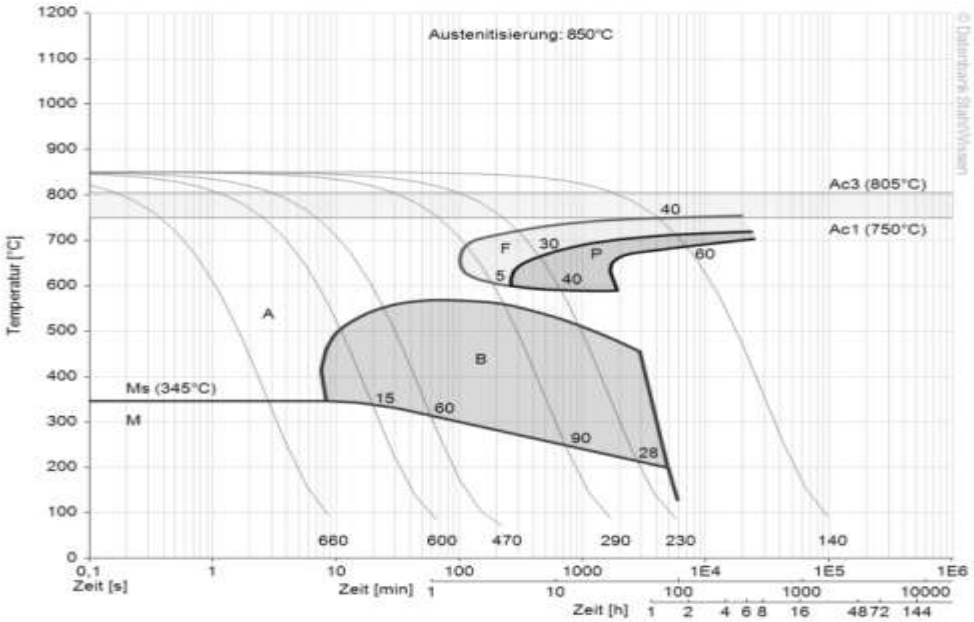


Figure.4 :Diagramme TT d'un acier faiblement allié (42CD4) [16]

III.9.Diagramme de revenu:[16]

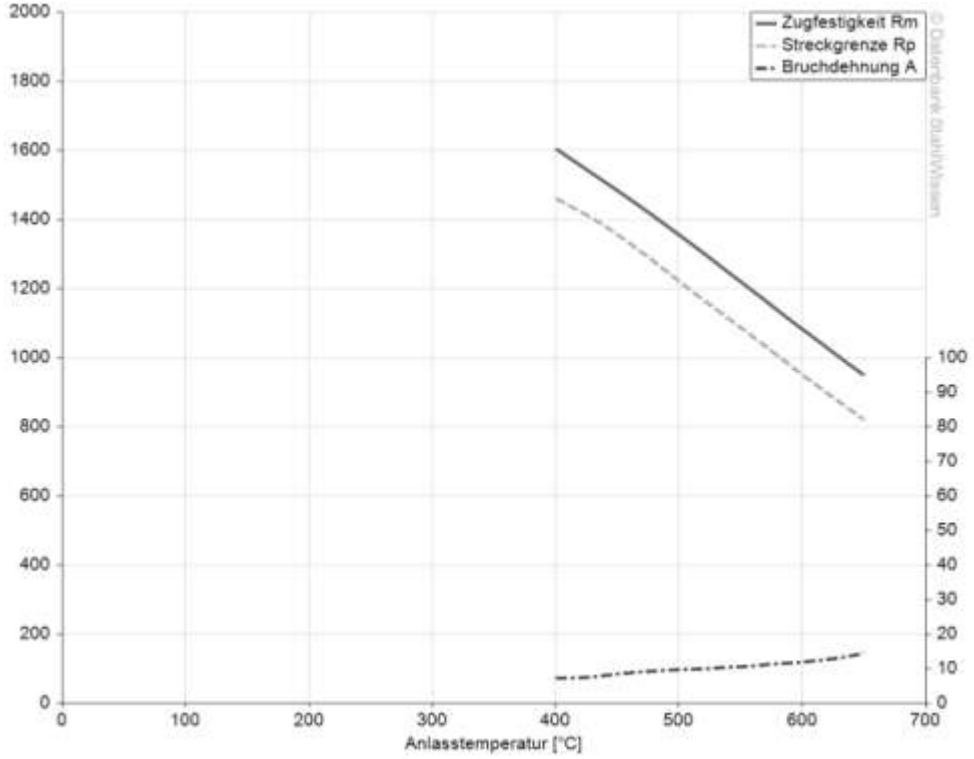


Figure.5 : Diagramme de revenu:[16]

III.10.Diagramme TRC d'un acier faiblement allié :

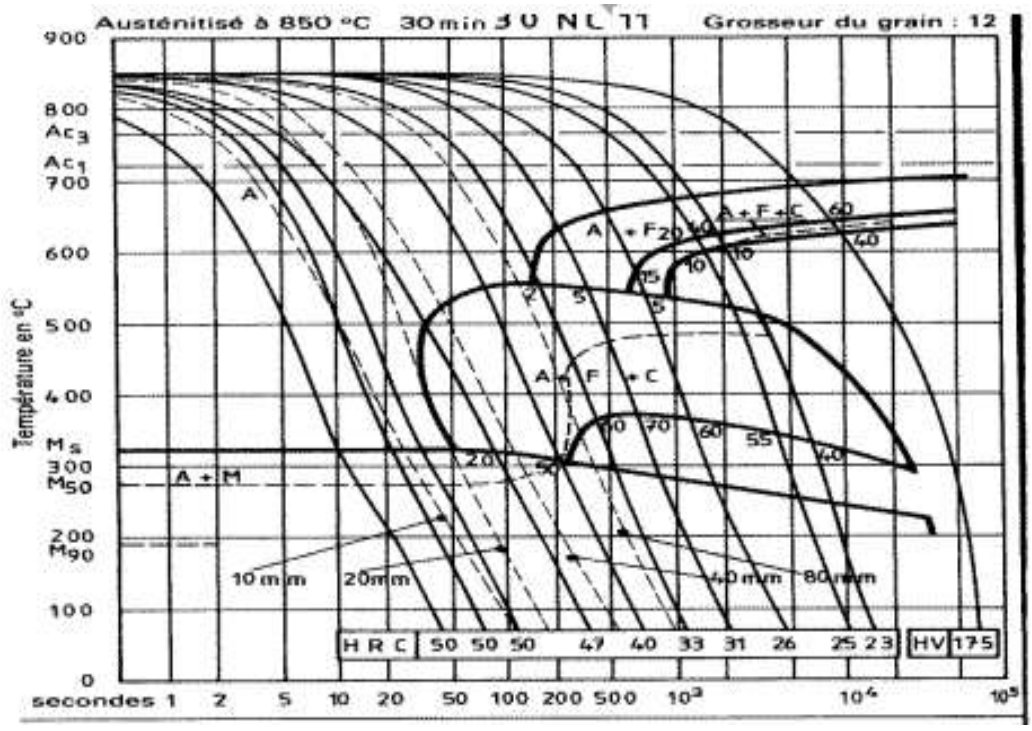


Figure.6 : Diagramme TRC d'un acier faiblement allié[16]

III.11.Adaptation al soudabilité :

selon la coefficient (S)

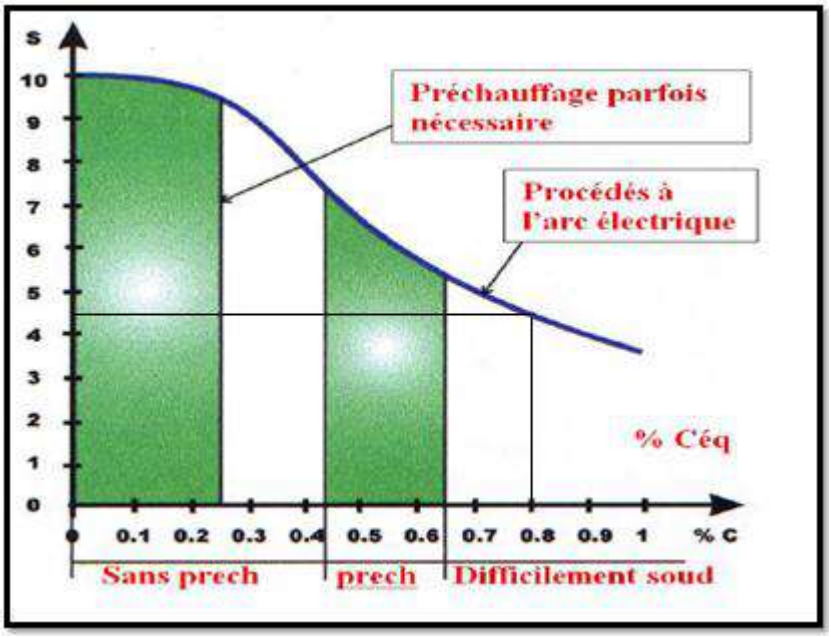


Figure.7 :graphe Coefficient de soudabilité (s) [6]

$C_{eq} = 0.43 + \frac{0.50}{0.6} + \left(\frac{1.25+0.12}{5}\right) + \frac{0.25}{15} = 0.8$

Selon la projection de carbone équivalant sur le graphe de soudabilité

En déduire : l'acier (42CD4) cette acier difficilement soudable

A causse de coefficient de soudabilité (s) :

S = 4.5

S< 5

A l'unité de Tiaret il a élaborer l'acier (42CD4) dans un four a arc électriques suivant les étapes si dessues :

III.12.lait de fusion :

Retour fondrière acier ordinaire ou acier faiblement allié 20 – 80 %

Ferraille non allié 15 – 60%

Après fusion les étapes sont

Analyse spectrale

Affinage : par l'oxygène de fer (Fe_2O_3)

Formation du laitier par la chaux (1%)

2^{eme}analyse spectrale

Correction

La coulée a la température de (t = 1680°C)danse la poche de coulée avec l'introduction de 1% de (Al) pour désoxydation

Tableux.2 : la charge de four

Lait de fusion	Composition chimique						
	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Cr%	Mo%
RETOUR 42CD4 60%	0.43	0.40	0.50	0.053	_	1.25	0.12
FERALLIE D'ACIER 20%	0.1	0.1	0.40	_	_	0.8	0.4
Lingot Hématite 20%	3.2 _3.8	3_3.5	0.6_0.75	<0.04	<0.1	_	_

C% $=\frac{0.43*60}{100}+\frac{0.1*20}{100}+\frac{3.7*20}{100}$ =1.02 % C

Mn% $=\frac{0.5*60}{100}+\frac{0.40*20}{100}+\frac{0.70*20}{100}$ = 0.52 %Mn

Cr% = $\frac{1.25*60}{100}+\frac{0.8*20}{100}$=0.91 %Cr

Mo%= $\frac{0.12*60}{100}+\frac{0.4*20}{100}$ = 0.15%Mo

E)Perte de chrome Cr

1.25 – 0.91 =0.34

6000 → 100%

X → 0.34 = 20 kg de chrome

On utilise le Ferro alliage (Ferro chrome) a' 0.03% carbone

1kg de Fe_Cr ⟶ 0.97% chrome

X ⟶ 20

X= 20 kg de FeCr

c'est dire on 'a ajoute 20 Kg de Fe-Cr pour la correction

On calcul le pourcentage de carbone après la ajoute du Ferro- chrome a' bas carbone

0.03 ⟶ 100%

X ⟶ 20

C%=0.06 1.02+0.006=1.026

On Calcule la masse d'oxyde de ferre Fe_2O_3 qui 'il convient doit utilise pour obtenir un affinage :

On a le C 0.43 %C

1.026-0.43=0.6

Masse carbone

6tonne →100%

X → 0.6

Carbone en kg = 36 kg

a) Réaction chimique d'oxydation du carbone

$2C + O_2 \rightarrow 2CO\uparrow$

b) CALCULE DE LA MASSE d'oxygène pour l' oxydation de carbone

2mol de carbone → 1 mol de O_2

2*12→ 1*32

36000→x

X = 48000g = 48 kg

c) Réaction chimique de Fe_2O_3

$Fe_2O_3 \rightarrow 3/2O_2 + 2Fe$

d)Calcule la masse de Fe_2O_3

3/2 mol (O_2)→1 mol (Fe_2O_3)

48g→160g(Fe_2O_3)

48000→x

X = 16000g = 160 kg

C'est dire la masse de (Fe_2O_3) a ajout pour décarbura » (affinage) est 160 kg

III.13.Composition chimique de la acier étudie :

Tableaux.3 : Composition chimique de la acier étudié

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
0.43	0.40	0.50	-	0.053	1.25	0.10-0.15	0.25

III.14.Solidification :Etude de temps de formation des phases selon le diagramme d'équilibre Fe-C

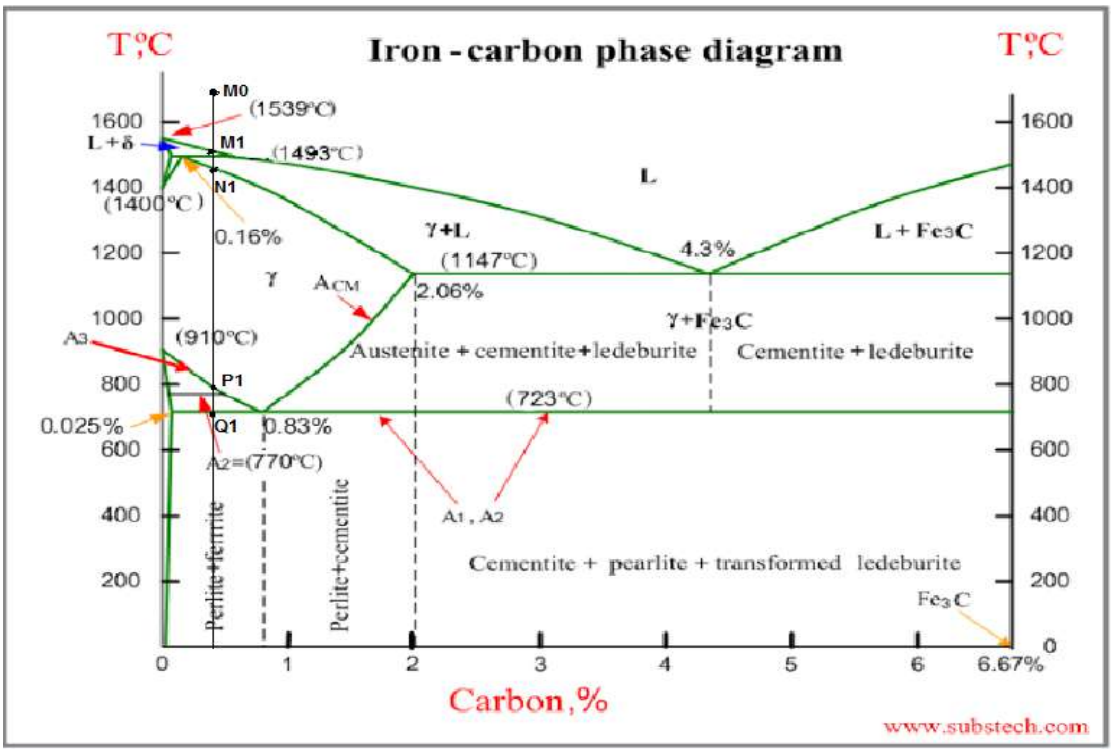


Figure.8 : diagramme d'équilibre Fe-C[17]

A) au oint M_0 : a la t = 1650°C

(100% liquide a 0.43% C)

B) au point M_1'

(intersection de la verticale 1 avec le liquidus le liquide se transforme en austénite ,la solidification se poursuit de M_1 a N_1

En N1, la dernière goutte de liquide disparate , et l'austénite atteinte la teneur de 0.43% C

C) refroidissement de l'austénite : l'austénite se refroidit sans transformation de N1 a P1

D) transformation de l'austinite en ferrite

La transformation de l'austénite d'bute en P1 par dépote de la ferrite , cette précipitation se poursuit jusqu'a Q1 tandis que la ferrite et l'austénite s'enrichissent en carbone , atteignant respectivement les teneurs de 0.02% et 0.8%

E) réaction eutectoide

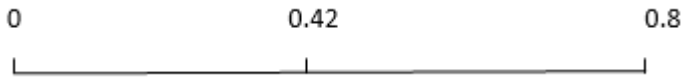
En Q1 l'austénite résiduelle se transforme en perlite

$\gamma_{0.8} \longrightarrow \propto_{0.02} + (\propto_{0.02} + (Fe_3C)_{6.67})$

A température ambiante, constituants d'un acier hypoeutectoide sont : ferrite et perlite

F)Calcule des proportion des constituions a la température ambiant

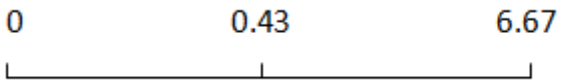
Selon lemétallographie on a deux constituions.



FERRITE $\propto\% = \frac{0.8-0.42}{0.8-0} = 47\%$

PERLITE $(\propto_{0.02}+(Fe_3C_{6.67}))= \frac{0.42-0}{0.8-0} = 53\%$

F_1) calcul des proportion des phases a la (t : ambiante) selon la métallographe on a deux phases : $\propto$ **et** Fe_3C



$\propto \% = \frac{6.67-0.43}{6.67-0} = 0.93 = 93\%$

$Fe_3C\ \% = \frac{0.43-0}{6.67-0} = 0.07 = 7\%$

F_2) calcule de dureté

SELON LES PROPRTION DES constituions Connaissant la dureté de la ferret et la perlite on peut calcule la dureté théorique de notre acier

ferrite = 90 HB

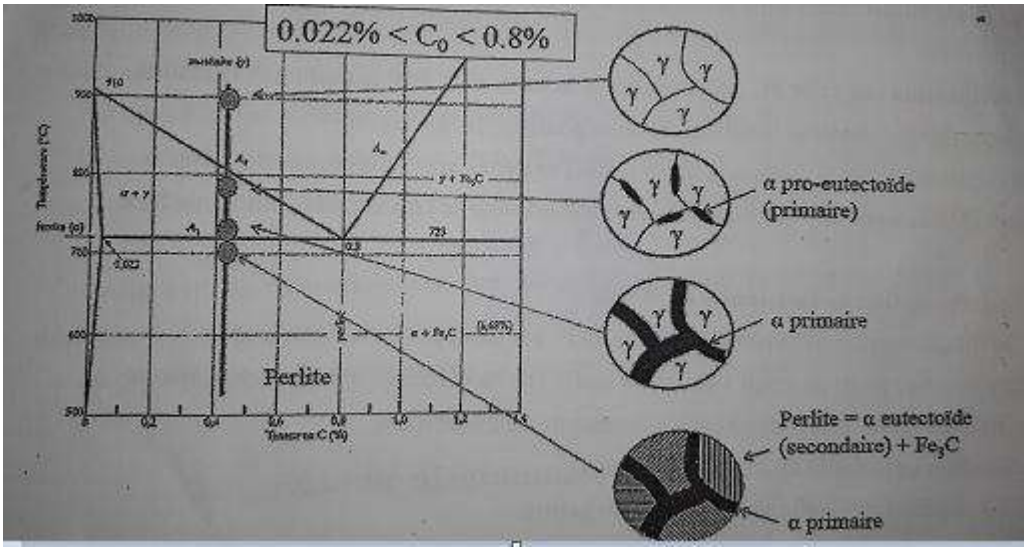
perlite = 270 HB

HB = (0.53 * 270) + (0.47 * 90)=185.4 HB

A partir de la valeur de la dureté .on a calcule la valeur de résistance a la traction de Notre acier selon la formule suivant :

3Ra = HB

Ra = HB/3 =61.8MPa



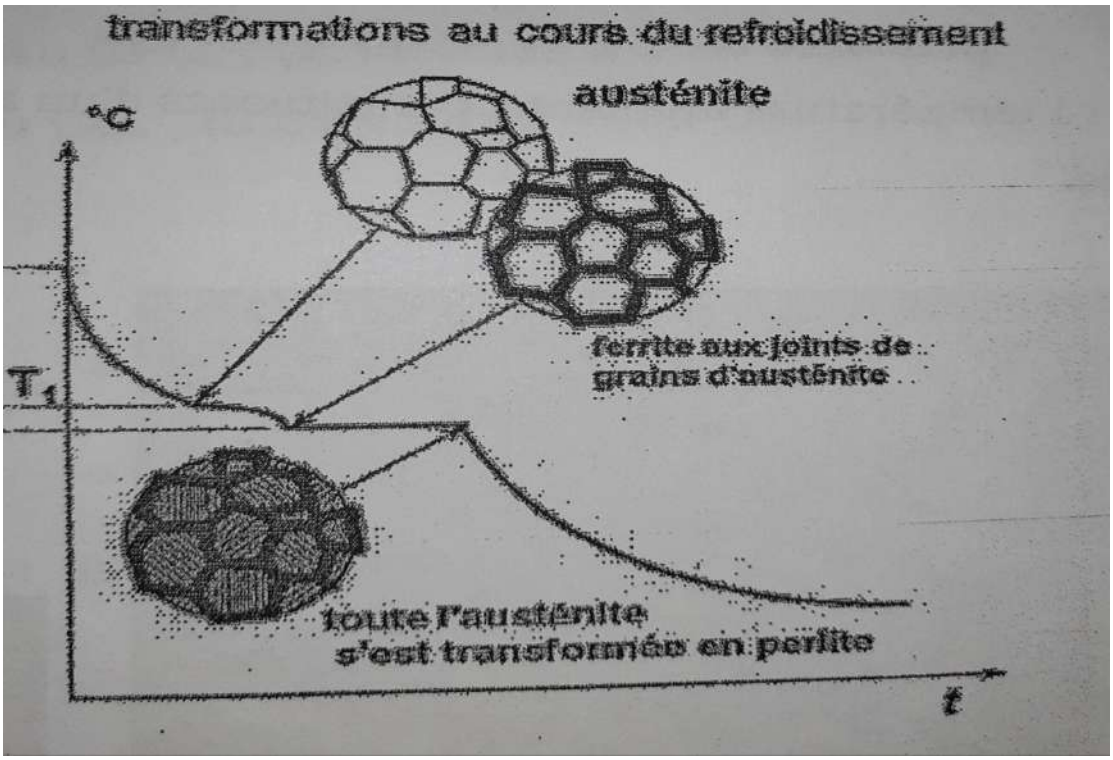


Figure.9:transformation de la acier hypoeutectoide [17]

III.15.Essais 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

LA mesure de dureté ont été effectué sur l'éprouvette de résilience a l'aide du d'uromètre type -T .2M- (méthode BRINELL) . Avec une bille de 2 mm de

diamètre, , les empreintes de la bille ont été mesurées avec une loupe type MM11.2 présentée sur le figure



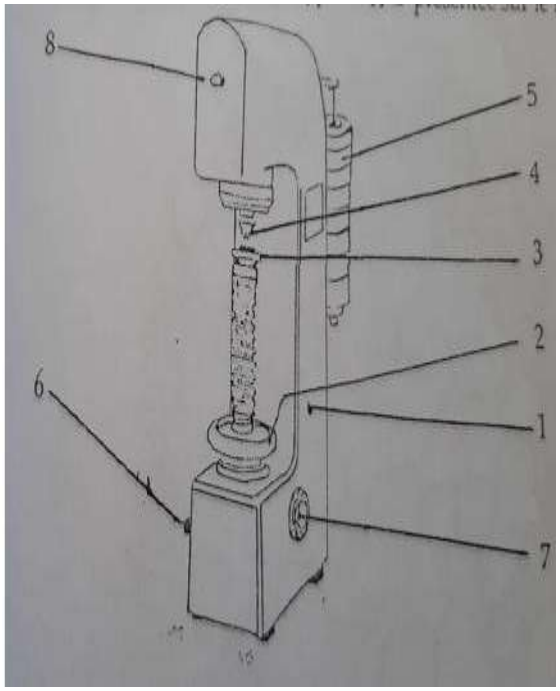


Figure.10 : machine de dureté (d'uromètre type T.2M)

1- Carter
2- volant
3- table
4- pénétrateur
5- poids
6- bouton marche
7- Instrument d'étalonnage
8- Témoin d'étalonnage

III.15.1.Résultats obtenus par l'essai de dureté avent traitement thermique de normalisation :

- Préparation d'un échantillon brut (à l'état brut de coulée de l'acier 42CD4, on mesure la dureté (HB,) d'un échantillon et on examine aussi la structure au microscope optique

- **HB2/800/20**

2:Ø de la bille en (mm)

800 : la charge en (kg)

20 : maintien de pénétration 20 s

- **HB : 234**

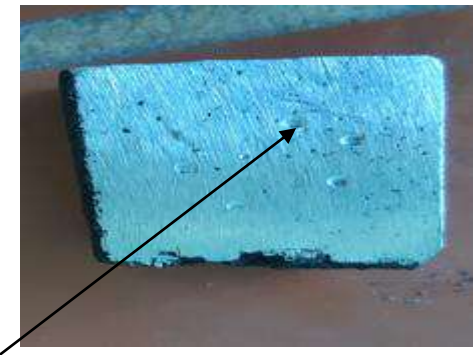


Figure.11 : échantillon brute de coulée de 42CD4

III.16.Métallographie :

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, suit nous donnons le détail de chaque opération.

A)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.

B)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.





Figure.12 :polisseuse avec disque abrasif





Figure.13 : polisseuse fin (avec pate diamantée)

III.16.1Microscope métallographique :

A) 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 intégré.



Figure.14 : microscope optique (unité de berrouaghia)

III.16.2.Résultats obtenus par essai de Métallographiques avent traitement thermique de normalisation :

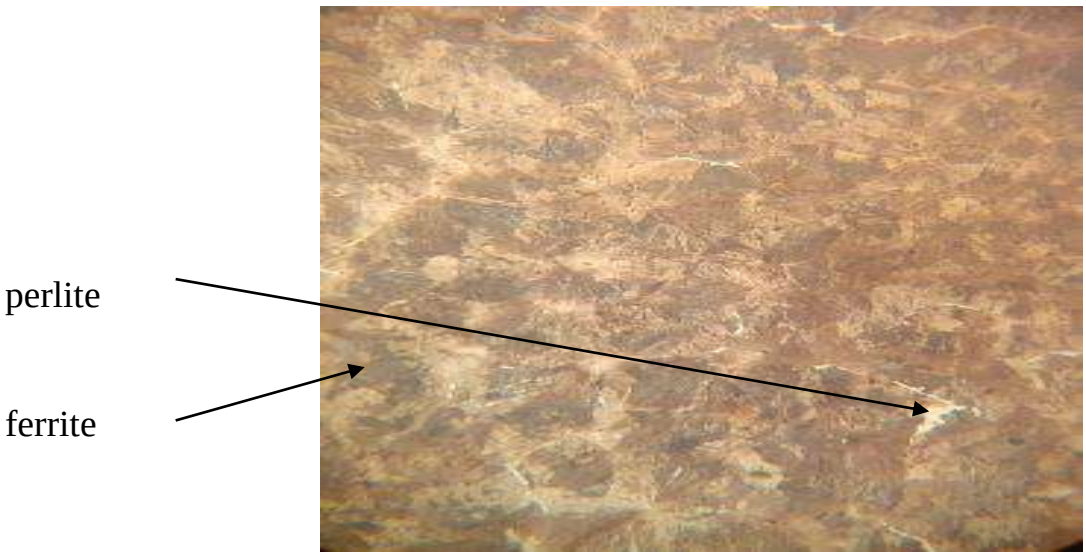


Figure.15 : structure de wedmenstaitn

III.17.Traitement thermique de normalisation :

III.17.1. La trempe

Une charge de1 pièce enfournée dans un four de trempe à chambre pendant (60 min)(la montée de température) pour égaliser la température de cœur avec celle de surface jusqu'à une température de 850C° (la température d'austénitisation de la nuance 42CD4), a cette température les pièces sont maintenues durant (90 min) en suite elles sont trempées a L'air souffler .

III.17.2. Le revenu :

Apres la trempe la charge est enfournée dans un four de revenu à une température de 620C°. Le revenu est donc pratiqué après l'opération de trempe

Cela consiste à réchauffer de nouveau le métal(souvent 620C°) après une trempe énergique pour augmenter son ténacité en lui rendant moine fragile. Comme l'opération de trempe, le réchauffement de l'acier provoque une modification de sa structure.

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.

Tableux.4 :la gamme de trempe de normalisation

Trempe	**TempératureRefroidissement. Brusque**
	800 – 850°C air soufflé
revenu	**Température Refroidissement**
	600 – 620°C four

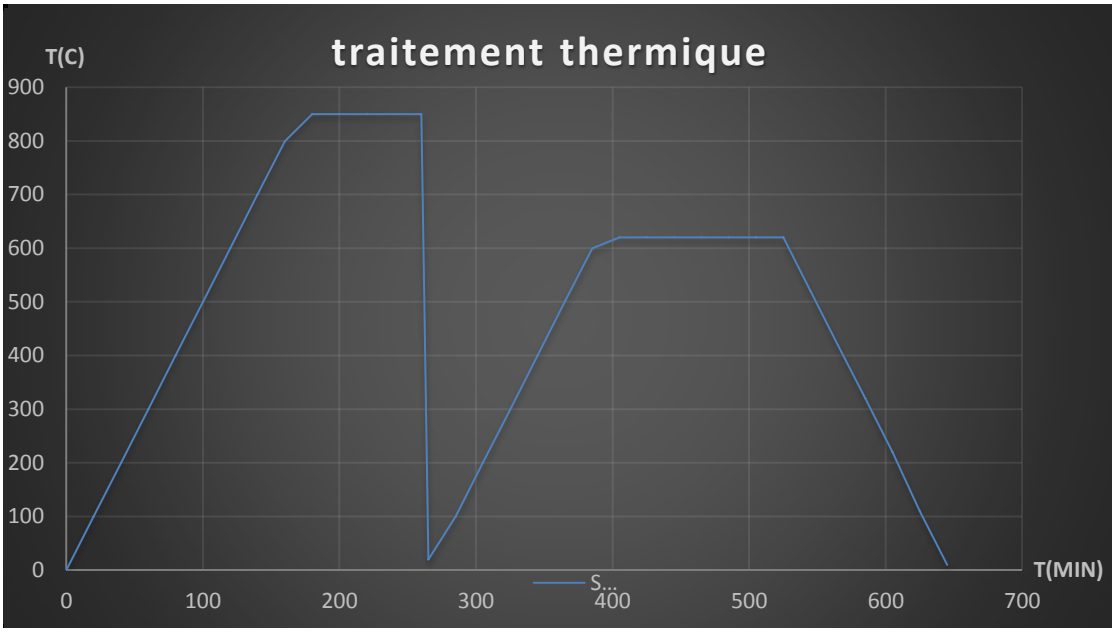


Figure.16 : cycle thermique



Figure.17: échantillon trempé à l'air Souffler

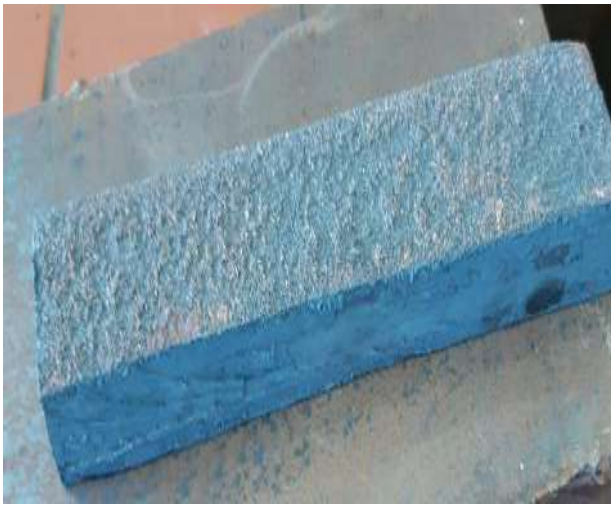


Figure.18 : échantillonaprès trempe

III.17.3.Résultats obtenus par essai de dureté après traitement thermique :

- **HB2/800/20**
- **2:Ø**de la bille en (mm)
- **800 :** la charge en (kg)
- **20 :** maintien de pénétration 20 s
- **HB :** 204

Remarque :

La dureté a chuté après le traitement de normalisation est ce a cause de persanes l'uni formation des graines et l'élimination de la (wd)

III.17.4.Résultats obtenus par l'essai de Métallographiques après traitement thermique :

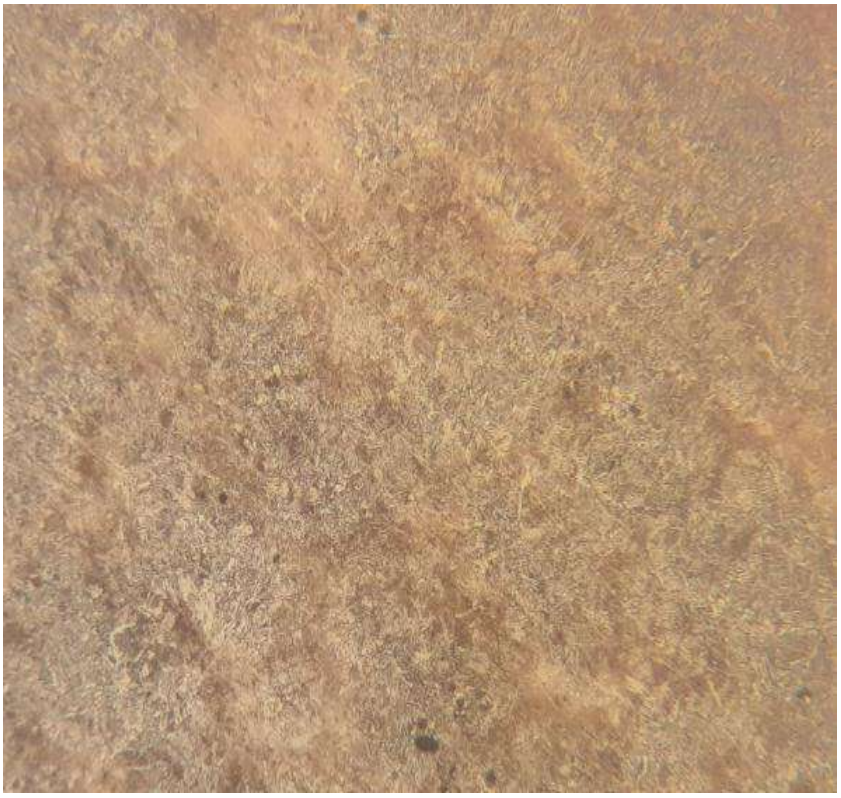


Figure.19 :structure de wadmnstaiten après (T.Th)

Notre photo n'a pas claire parce que il y a un manque de moyenne

NB : nous informer qui on a prise les photo avec notre téléphone par ce que le MOB de unité de berrouaghia né pas liée avec une caméra numérique

III.18. Essais de résilience :

La résilience qui a pour symbole K , est L 'aptitude que possède un matériau à résistez plus ou moins bien aux chocs.[18]

III.18.1.But de I 'essai de résilience.

Is 'agit pour le métallurgiste de détermina la résistance aux chocs de certaines pièces ou de certains matériaux_

La résistance aux chocs est une des caractéristiques primordiale pour le choix d 'un matériau notamment dans la construction.

Lors de L'essai: une force de poids P va tomber d'une certaine hauteur H .ce moment on va enregistrer au niveau de 1L'éprouvette (e) un certain travail que l'on va noter Lorsque I 'éprouvette sera cassée, on aura enregistré un travail résiduel (Wn),ce qui va nous permettre de déterminer le travail nécessaire pour briser 1 'éprouvette. (Wu) c'est donc ainsi que l'on va déduire la résilience

$$\text{LA RESILIENCE} = \frac{\boldsymbol{neenerger\ absorber}}{\boldsymbol{secction\ aapres\ l'entaill}} \Longrightarrow K = \frac{Wn}{S} = \text{j / cm}^2$$

III.18.2.Dimension de l'éprouvette :

Les éprouvettes ont une longueur L = 55 mm, H = W = 10 mm.

L'entaille dépend du type d'éprouvette

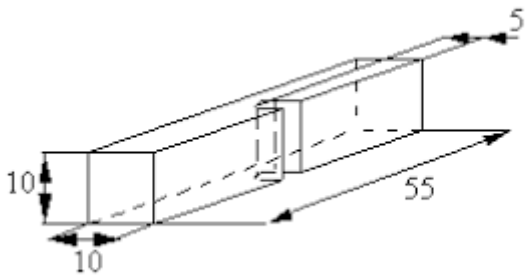


Figure.20 : Dimension de l'éprouvette

_ ISO ou ASTM type A avec entaille en V: profondeur = 2 mm, Angle = 45°, rayon à fond d'entaille = 0,25 mm.

_ ISO ou ASTM type C avec entaille en U: profondeur = 5 mm, rayon à fond d'entaille = 1 mm

NB : nous avons formé qui on a utilisé une éprouvette avec l'entaille U pour notre acier selon la norme.

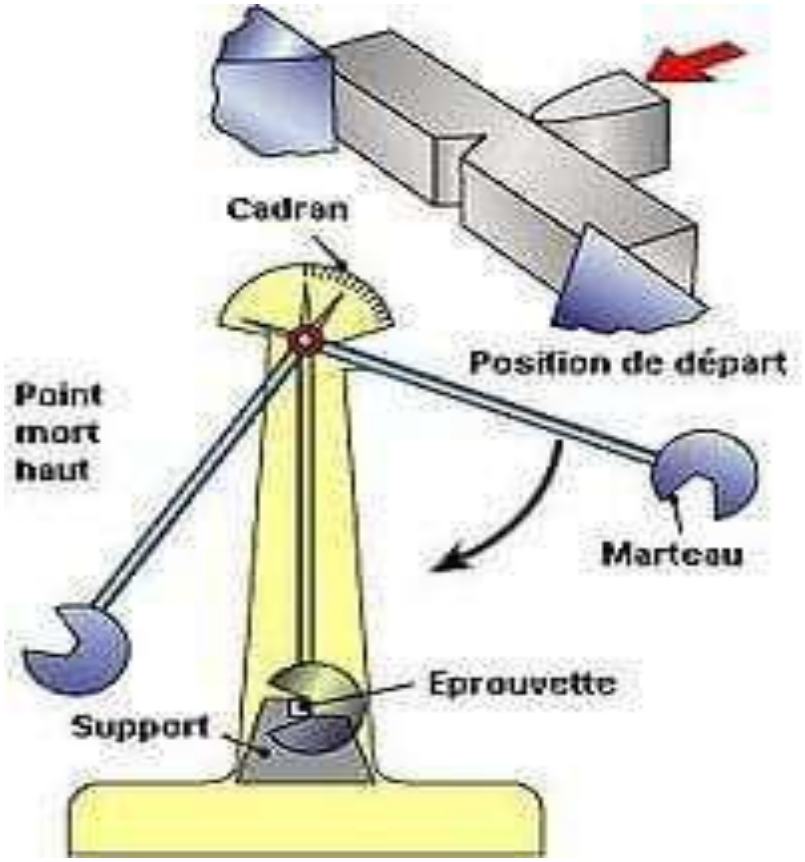


Figure.21 : machine de résiliences

III.18.3.Résultats obtenus par essai de résilience après traitement thermique :

En fait deux essais de résiliences

- Charge **:** 30kj/m travail sur le cadran
- 1 kg ⟶ 10 j
- 1ere essai **:** 1.1 ⟶ 1.1*10=11 j
- 2eme essai **:**1.2 ⟶ 1.2*10=12 j
- Section **:** 0.5 cm^2
- $K=\frac{Wn}{S} \Longrightarrow K=\frac{11}{0.5}=22J/cm^2$
- $K=\frac{12}{0.5}=24J/cm^2$



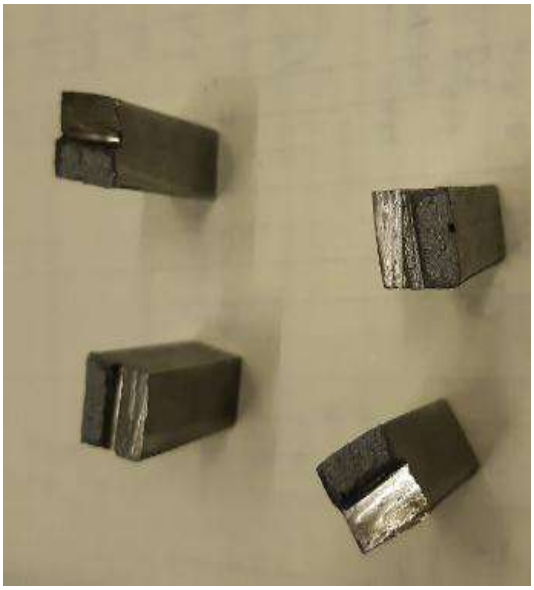


Figure.22 : photo des éprouvettes avant et après l'essai de résilience

Remarque :

Nous remarqant que selon la casse de l'éprovette , l'éprovette a une casse matte , que segnfaitque que notre materiaux a certaine plasticité

III.19.Essai de traction :

III.19.1 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.[17]

III.19.2 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.

III.19.3.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.[17]

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

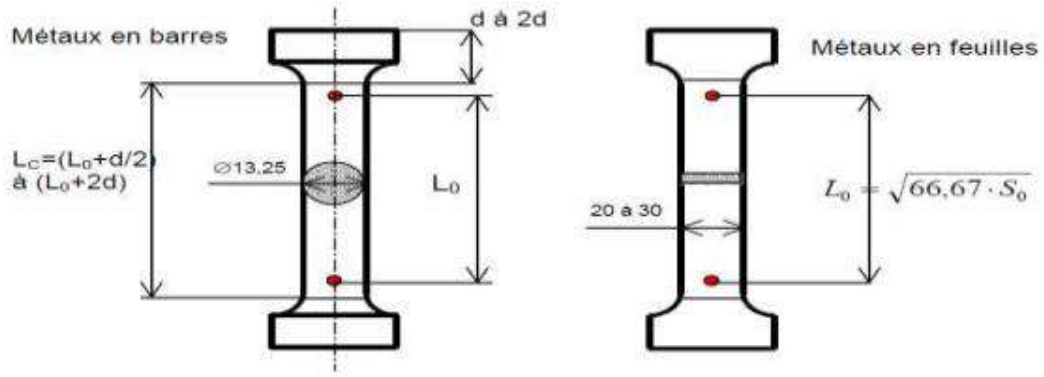


Figure.23:dessin technique de l'éprouvette de traction

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°).

III.19.4.Résultats obtenus par essai de traction après traitement thermique :

Rm =660N/mm^2

A%= 12%

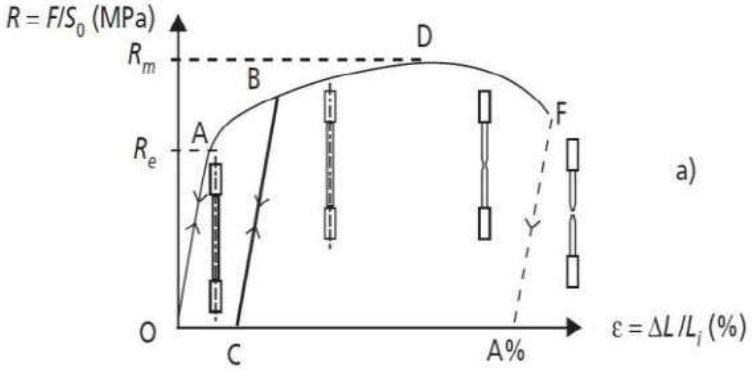


Figure.24 :Courbes conventionnelles typiques de traction



Figure.25 : l'éprouvette de traction



Figure.26 : machine de traction(unité tiaret)

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette d'étude nous avons mis en évidence l'influence de traitement thermique sur Les caractéristiques physiques de l'acier 42 CD4 définissants l'état d'un matériau sont liés entre elles par des relations. Des traitements thermiques dans la masse ou en surface d'un matériau permettent ainsi de modifier ces caractéristiques telles que la trempe, le recuit ou encore le revenu.

A l'aide de ces différentes méthodes et techniques, nous pouvons ainsi critiquer et même faire le choix du matériau le mieux adapté, nous pouvons comprendre et décider l'utilisation de tel ou tel traitement thermique de l'acier 42CD4 (choix de la température de revenu, temps de maintient et le fluide de trempe).

Les critères de choix se feront donc suivant les fonctions principales de la pièce en service, c'est-à-dire ces conditions de sollicitation, son mode de mise en charge, le milieu environnant, la température d'utilisation, etc.-en conclure de ce travail est de trouver une possible corrélation entre la microstructure et le comportement mécanique, après application des traitements thermiques et l'influence de température de revenu sur les caractéristiques mécaniques et microstructure de l'acier 42CD4.

La transformation de la martensite en martensite de revenu après le second revenu nous permet d'obtenir un acier ayant les meilleures caractéristique.

-l' augmentation et diminiuation de la caractéristique par traitement de revenu, c'est-à-dire (la résistance, la limite élasticité, la dureté, diminuer et l'allongement, la résilience augmenté).

Références bibliographiques

[1] les aciers dans la construction Achevé d'imprimer en octobre 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] élaboration des métaux ferreux (fontes et aciers). Par : Dr. S. Bensaada univ de Annaba

[5] mémoire de magister. **Thème :** AMELIORATION DE LA LONGEVITE ET DU COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN ACIER A OUTIL POUR TRAVAIL A FROID

Par HABIRECHE Mohamed.

[6] structures métallique (métallurgie du soudage). Centre national de ressources structures métallique.

[7] www. Techniques de l 'I ingénieur.com

[8] Elaboration de l'acier au four à arcs . Ecole Polytechnique de Tunisie

[9] conduite des fours a arc pour l'élaboration des aciers au carbone et des aciers spéciaux. Par jean –Paul aymard

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

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

[12] 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

[13] guide d'auto – apprentissage pour les operateurs on treatment thermique . par Dr. Raymond langevin.

[14] les métaux dans la construction, www.les grandsateliers .FrMémoire .comportement mécanique de deux alliages ferreux industriels 41 Cr 4et 42Cr Mo 4 C.chouarfai et A .sodok Mostaganem Algérie. Décembre 2014

[15]MICHEL GEIER métallorger de fondeie _ tomme II Edition Eyrolles61 Boulivard saint_germain .75005 PARIS

[16] www.acier-premium.fr/actuel

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

[18]www.les essais mécaniques CAP fusion.com