

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MÉMOIRE DE FIN D'ETUDE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER ACADEMIQUE

EN GENIE MECANIQUE

OPTION : GENIE DES MATERIAUX

THEME :

**ETUDE ET CARACTERISATIONS D'UN
ACIER (S355J2) ROND LAMINE A
CHAUD
UTILISE A ELECTRO-INDUSTRIES
(E.I.AZAZGA)**

Présenté par : Mr : BERRAHMOUN Aghilas

Proposée par :

E.I.AZAZGA

Dirigée par :

Mme. BENALIA-BAGUENANE Ghalia

Co-encadrée par :

Mme : GUEMOURI Lilia

PROMOTION : 2021/2022

Remerciements

*Au terme de ce travail, j'adresse mes remerciements les plus sincères à mon encadreur **Mme:***

Benalia-Baguenane Ghalia

Pour m'avoir permis de bénéficier de son grand savoir dans la matière, pour sa disponibilité, sa pédagogie, ses compétences, sa modestie et son aide précieuse tout au long de ce projet même pendant les moments les plus difficiles.

*Je remercie particulièrement ma Co-promotrice **Mme : GUEMOURI Lilia**, pour avoir accepté de me proposer ce thème et m'orienter pour réaliser ce travail*

Sans oublier ma gratitude a Mr BELABBAS Ferhat pour la générosité avec laquelle il m'a consacré son temps et pour tout l'aide qui m'a apporté.

Je souhaite exprimer mes reconnaissances :

A l'équipe de l'atelier d'usinage d'ELECTRO-INDUSTRIES

A tout le personnel du laboratoire chimique de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES.

Je termine mes remerciements en saluant vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de lire et juger ce travail.

Que la paix d'Allah soit toujours avec vous !

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

À mes chers parents et ma grande mère :

*En hommage à tous les sacrifices que vous avez consenti pour moi durant mes
longues années d'études.*

*Je vous remercie d'avoir fait de moi ce que je suis maintenant et de m'avoir
appris de vivre dans l'honneur et dans la dignité.*

A mes frères :

*Je vous remercie pour toute l'aide que vous m'avez offert et la confiance que
vous avez en moi.*

*Je tien a remercie aussi tous mes amis qui ont était toujours là pour moi et le
temps qui ont donné pour me soutenir dans les moments difficiles.*

Sommaire

Résumé	
Introduction	1
Présentation de l'Entreprise Electro-Industrie E.I.....	2
Chapitre I: Généralités sur les Aciers	
I.1 Historique	4
I.2 Définition de l'acier	4
I.3 Propriétés de l'acier.....	4
I.4 Fabrication de l'acier.....	5
I.4.1 Le Principe de fabrication de l'acier	5
I.4.2 Etapes de fabrication de l'acier.....	7
I.5 La composition chimique	10
I.6 Influence de la composition chimique sur la structure des aciers.....	11
I.6.1 La teneur en carbone.....	11
I.6.2 Eléments d'alliage.....	13
I.7 Structure des aciers	15
I.8 Propriétés et caractéristiques des aciers	17
I.8.1 Le traitement thermo - mécanique :	17
I.8.2 Le traitement de surface :.....	17
II. Propriétés physico-chimiques :.....	18
II.1 Propriétés physiques.....	18
II.2 Propriétés chimiques	18
III. Propriétés mécanique	19
III.1 Limite d'élasticité: R_e (en N/mm^2 ou MPa).....	19
III.2 Résistance à la traction (rupture): R_m (en N/mm^2 ou MPa)	19

Sommaire

III.3 Allongement à la rupture: A (en %)	19
III.4 Module d'élasticité: E (en N/mm ²)	20
III.5 Résilience: KCV (en J/cm ²)	21
III.6 Dureté	21
III.6.1. Essai dureté Brinell (HB)	21
III.6.2. Essai de dureté Meyer	22
III.6.3. Essai de dureté Vickers	22
III.6.3. Essai de dureté Rockwell (HRC)	23
III.7 Ténacité (Pa m ^{1/2})	23
IV. Diagramme TTT et TRC	23
IV.1. Diagramme Temps-Température-Transformation (TTT)	23
IV.1.1 Définition:	23
IV.1.2. Les transformations isothermes	24
IV.1.3. Les transformations de phases dans le diagramme TTT	24
IV.2. Diagramme de la transformation en refroidissement continu (TRC)	27
V.2.1. Définition:	27
V. Les Tôles	30
V.1. Définition:	30
V.2. Les différents types de tôles	30
V.3. Le conditionnement	31
V.4. Les domaines d'utilisation	31
V.5. Les avantages de la tôle	32
V.6. Les techniques de manipulation	32
VI. Types de corrosion	33
VI.1. Définition	33

Sommaire

VI.1.1. La corrosion sèche ou à chaud	33
VI.1.2. La corrosion aqueuse ou humide.....	33
VI.2. Principaux mécanismes de la corrosion	35
VI.3. La vitesse de corrosion	36
VI.3.1. La méthode voltamétrique.....	36
VI.3.2. La méthode gravimétrique	36

Chapitre II: Procédures Expérimentales

II. Appareillage.....	37
II.1 Polisseuse	37
II.2 Duromètre	37
II.3 La Machine de traction	38
II.4 Analyseur du carbone et du soufre CS800.....	39
II.5 Microscope optique.....	39
II.5.1 Polissage des échantillons	40
II.2 Attaque chimique	40
II.3 Microscope optique.....	40
III.1 L'analyse chimique.....	40
III.2 Dosage du carbone et du soufre (%C, %S).....	41
III.3. Dosage du manganèse Mn	41
IV. Etude des propriétés mécaniques de l'acier	42
IV.1 Essai de traction.....	42
IV.2 Essai de dureté.....	50

Chapitre III: Résultats et Interprétations

III .1.Introduction.....	52
III.2 Acier étudié.....	52
III.3 Interpretation des resultats des observations métallographique au Microscope Optique	53
III.3.1 Micrographies de notre acier sans attaques.....	53
III.3.2 Micrographies de notre acier avec attaque au Nital	55
V. Essai de traction.....	58
VI. La dureté	60
Conclusion.....	60

Liste des Figures

Figure N° 1 : Le cycle de fabrication de l'acier.	6
Figure N° 2 : Tôle qui sort des trains à bandes	8
Figure N° 3: Schématisation du fonctionnement d'un laminoir	8
Figure N° 4: Les différentes étapes d'un laminage.....	9
Figure N° 5: La cage d'un laminoir.	9
Figure N° 6: Photo d'une installation d'un laminage à chaud.	9
Figure N° 7: Schématisation d'un laminage multiple.	10
Figure N° 8: Diagramme de phase Fer-Carbone.....	13
Figure N° 9 : Influence des éléments d'alliage sur le diagramme de phase FeC a) Présence d'un élément alphasène, le molybdène- b) Présence d'un élément gammagène, le manganèse	15
Figure N° 10: Evolution d'une barre soumise à un essai de traction	20
Figure N° 11: Courbe de traction.....	20
Figure N° 12: Explication du diagramme TTT pour un acier eutectoïde.	24
Figure N° 13: Transformation perlitique.....	25
Figure N° 14: Schématisation de la Microstructure bainitique.	25
Figure N° 15: Microstructure de la bainite.	26
Figure N° 16: Transformation martensitique.	27
Figure N° 17: Diagramme TRC de l'acier 30NiCr11	28
Figure N° 18: Photo d'une brame.	30
Figure N° 19: Pré laqué anticorrosion.....	31
Figure N° 20: Tôle plane.....	32
Figure N° 21: Corrosion à chaud des métaux et des alliages	33
Figure N° 22: Electrolyte	34
Figure N° 23: Corrosion aqueuse.....	35
Figure N° 24: La polisseuse utilisée.....	37
Figure N° 25: Le duromètre WOLPERT DIA TESTOR.	38
Figure N° 26: Machine de traction.....	38
Figure N° 27: Analyseur du carbone et du soufre CS800.	39
Figure N° 28: Microscope optique.....	39
Figure N° 29: Géométrie de l'éprouvette utilisée	43
Figure N° 30: Allure des courbes de traction (a) fragile (b) ductile (c) élastique non linéaire.	45
Figure N° 31: Courbe de contrainte-déformation.	45

Liste des Figures

Figure N° 32: Illustration des vitesses de déformation à utiliser pendant l'essai de traction, si R_{eH} , R_{eL} , R_p , R_t , R_m , A_g , A_{gt} , A , A_t et Z sont déterminés.	47
Figure N° 33: Limite conventionnelle d'élasticité à 0, 2%.....	48
Figure N° 34: Micrographie de notre acier laminé à chaud sans attaque (GX40).	53
Figure N° 35: Micrographie de notre acier laminé à chaud sans attaque(GX100).	54
Figure N° 36: Micrographie de notre acier laminé à chaud sans attaque(GX200).	54
Figure N° 37 : Micrographie de notre acier laminé à chaud sans attaque(GX400).	55
Figure N° 38: Micrographie optique de notre acier rond laminé à chaud attaqué au Nital(GX40).	56
Figure N° 39: Micrographie optique de notre acier rond laminé à chaud attaqué au Nital(GX100).	56
Figure N° 40: Micrographie optique de notre acier rond laminé à chaud attaqué au Nital(GX200).	57
Figure N° 41: Micrographie optique de notre acier rond laminé à chaud attaqué au Nital(GX400).	57
Figure N° 42: Courbe de traction de l'éprouvette N°01	59
Figure N° 43: Courbe de traction de l'éprouvette N°02	59

Liste des Tableaux

Tableau N° 1 : Quelques propriétés physiques des aciers	18
Tableau N° 2 : Caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté	51
Tableau N° 3: Les Résultats de l'analyse de la composition chimique de notre acier	52
Tableau N° 4 : Les résultats de l'essai de traction obtenus sur notre acier laminé à chaud (S355J2)	58
Tableau N° 5 : Résultats de dureté réalisés sur des échantillons de notre acier rond laminé à chaud (S355J2).....	60

Résumé

L'objectif de ce travail est la caractérisation physico-chimique et mécanique de l'acier rond laminé à chaud (S355J2) utilisé à l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES AZAZGA.

Pour ce travail, nous avons utilisé des techniques expérimentales telles que l'analyse chimique, la microscopie optique, et des essais mécaniques tel que : l'essai de traction, la résilience et la dureté.

Introduction

Introduction

L'Acier, qui est une variante du fer alliée au carbone, a souvent d'autres éléments ajoutés pour le préparer à la transformation et à l'utilisation industrielle. L'un d'eux est le laminage à froid ou à chaud, qui est un processus très populaire qui prépare l'acier à l'utilisation.

L'Acier laminé à chaud est un acier laminé qui a subi le processus de formage à une température supérieure à 926 °C pour l'empêcher de recristalliser. L'acier qui est au-dessus de la température de recristallisation peut être façonné beaucoup plus facilement que l'acier plus froid et il peut être fabriqué à partir de lingots de matériau de tailles beaucoup plus grandes. Il est également moins cher à fabriquer que l'acier laminé à froid et il est souvent fabriqué sans pause ni retard dans le processus, il n'est donc pas nécessaire de réchauffer l'acier. Pendant le processus de refroidissement, l'acier laminé à chaud se contracte, ce qui rend sa taille et sa forme finales moins prévisibles que le laminage à froid.

Le laminage à chaud permet une grande variété de formes et de pièces, ainsi que la possibilité de fabriquer de grandes pièces sans se soucier de l'intégrité du matériau. C'est pourquoi l'acier laminé à chaud est souvent utilisé dans des projets structurels.

L'Acier laminé à chaud, ayant une tolérance plus élevée, permet une plus grande malléabilité, tandis que l'acier laminé à froid est limité à certaines formes limitées, telles que plate, carrée et ronde.

Ce travail a pour objectif, la caractérisation physico-chimique et mécanique de l'acier rond (S355J2) laminé à chaud utilisé en électro-industrie.

Le mémoire comporte une partie bibliographique qui est composée d'un premier chapitre :

Nous parlerons sur l'acier et ces alliages ainsi que ces différentes propriétés physico-chimiques, mécanique. Ainsi que le diagramme d'équilibre d'où on comprendra comment on fait nos choix de matériau. On va aussi parlé sur la corrosion et les traitements de surfaces des aciers.

La deuxième partie est la partie expérimentale dans laquelle, on détaillera les chapitres suivants :

- l'Acier étudié
- les méthodes expérimentales utilisées
- l'analyse des résultats, leurs interprétations

Et, on va achever ce travail par une conclusion générale et des perspectives

Présentation de l'entreprise

Présentation de l'Entreprise Electro-Industrie E.I

L'entreprise d'Electro-Industrie d'Azazga est une entreprise publique de production du matériel électrique industriel, créée en janvier 1999.

Son activité de production remonte à 1986, dans les domaines de fabrication des moteurs électriques, alternateurs et transformateurs de distribution.

Cette dernière est composée de deux (02) unités ; toutes situées dans un même site :

-Unité de fabrication des transformateurs de distribution MT/BT

-Unité de fabrication de moteurs électriques, alternateurs et prestation techniques

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit en main avec des partenaires Allemands, en l'occurrence, SIEMENS pour le produit FRITZ WERNER pour l'Engineering et la construction.

L'infrastructure est réalisée par les entreprises algériennes ECOTEC, COSIDER et BATIMETAL.

La production prévue initialement est de :

- 5000 Transformateurs de 50 à 2000 KVA.
- 50.000 Moteurs asynchrones triphasés de 0,18 à 400 kW.

Les produits fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES sont conformes aux recommandations de CEL (Commission Electrotechnique Internationale) et aux normes allemandes DIN/VDE.

Au plan national, la signature depuis Septembre 2005 de l'accord d'association avec l'union européenne et la suppression ou l'allègement des droits de douane ont mis ELECTRO-INDUSTRIES dans un environnement fortement concurrentiel.

Les produits fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES sont concurrencés par des produits importés bénéficiant de droits de douane favorables.

Au plan international, l'importante augmentation des prix des matières premières notamment le cuivre et les huiles diélectriques contribuent à la compression des marges.

Malgré ces contraintes, ELECTRO-INDUSTRIES a continué de connaître une croissance soutenue par son chiffre d'affaire qui est une valeur ajoutée et de son résultat net.

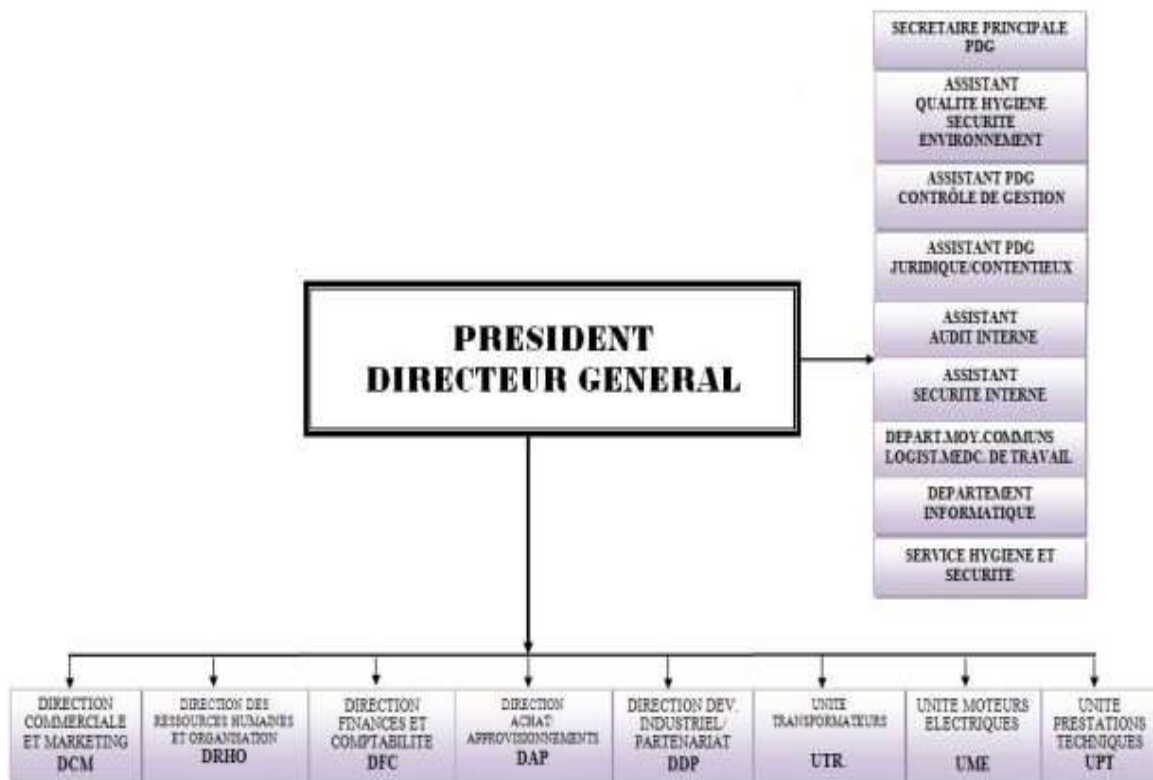
Les ressources humaines d'ELECTRO-INDUSTRIES constituent un facteur de réussite déterminant.

L'entreprise organisée en structures fonctionnelles et opérationnelles garde une flexibilité importante pour répondre au mieux à la fluctuation de l'environnement.

Les effectifs au nombre de 805 (juillet 2017) ont un taux d'encadrement de 15%.

L'organisation de l'entreprise est représentée par l'organigramme ci-dessous :

ORGANIGRAMME DE L'EPE/ELECTRO-INDUSTRIES/SPA AZAZGA



Chapitre I

Généralités sur les Aciers

I.1 Historique

Depuis l'Âge du fer, on utilisait les bas fourneaux pour produire des massifs, Composés de fer et d'acier, qui devaient ensuite être travaillés à la main par les forgerons.

On considère souvent Réaumur comme le fondateur de la sidérurgie scientifique moderne. En effet, il réalisa de très nombreuses expériences afin d'améliorer la fabrication de l'acier et publia les résultats de ses observations en 1712.

L'acier est apparu, avec l'évolution de la métallurgie, vers 1786. Cette année-là, trois savants français, Berthollet, Monge et Vandermonde, caractérisèrent trois types de produits obtenus à partir de la coulée des hauts-fourneaux : le fer, la fonte et l'acier. L'acier était alors obtenu à partir du fer, lui-même produit par affinage de la fonte issue du haut-fourneau. L'acier était plus dur que le fer et moins fragile que la fonte.

Au XIX^e siècle sont apparues des méthodes de fabrication avec conversion directe de la fonte, avec les convertisseurs Bessemer en 1856 (Henry Bessemer); le procédé Thomas-Gilchrist de déphosphoration de la fonte en 1877 (Sidney Gilchrist Thomas et Percy Carlyle Gilchrist) et la méthode Siemens-Martin. Ces découvertes, permettant la fabrication en masse d'un acier de « qualité » (pour l'époque), participent à la Révolution industrielle. Enfin, vers la seconde moitié du XIX^e siècle, Dmitry Chernov découvre les transformations polymorphes de l'acier et établit le diagramme binaire Fer/Carbone, faisant passer la métallurgie de l'état d'artisanat à celui de la science.

I.2 Définition de l'acier

L'acier est un alliage ferreux métallique constitué d'au moins deux éléments, majoritairement le fer puis le carbone dans des proportions comprises entre 0,02 % et 1,67 % en masse.

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferro-alliage, par exemple.

I.3 Propriétés de l'acier

Les aciers sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques, thermiques, thermo-mécanique, des agressions chimiques ...etc.

Pour résister à ces sollicitations et/ou agressions, des éléments chimiques peuvent être ajoutés en plus du carbone. Ces éléments sont appelés éléments d'additions, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le molybdène (Mo).

Les éléments chimiques présents dans l'acier peuvent être classés en trois (03) catégories :

- Les impuretés : sont apportés par la matière première du haut fourneau qui permettra la production de la fonte de première fusion, qui subira un affinage et des additions adéquates pour fabriquer de l'acier recherché. Ceux sont le soufre (S) et le phosphore (P) présent dans le coke mais aussi le plomb (Pb) et l'étain (Sn) qui peuvent être présents dans les aciers de récupération ainsi qu'un certain nombre d'autres éléments à bas point de fusion comme l'arsenic (As), l'antimoine (Sb) ;
- Les éléments d'addition mentionnés plus haut et qui sont ajoutés de manière intentionnelle pour conférer au matériau les propriétés recherchées, et enfin ;
- Les éléments d'accompagnement que l'aciériste utilise en vue de maîtriser les diverses réactions physico-chimiques nécessaires pour obtenir en final un acier conforme à la spécification. C'est le cas d'éléments comme l'aluminium, le silicium, le calcium. [1]

I.4 Fabrication de l'acier

Le fer, la fonte et l'acier sont souvent confondus, il est donc important de d'abord les définir. Le fer est un élément chimique entrant dans la composition des deux autres. La fonte et l'acier sont fabriqués essentiellement à partir du minerai de fer mais contiennent également d'autres composants et sont différenciés par leur teneur en carbone : la fonte blanche contient de 2,1 à 6,67 %, la fonte grise contient 2,1 à 100% et l'acier de 0,03 % à 2,1 %.

I.4.1 Le Principe de fabrication de l'acier

Pour fabriquer de l'acier, il faut du minerai de fer, du charbon, de la chaux et des ferro-alliages : aluminium, chrome, manganèse, silicium, titane, vanadium... Ces derniers confèrent à l'acier des caractéristiques particulières adaptées à ses divers usages : architecture, ameublement, machines-outils, conditionnements alimentaires, etc. La fabrication nécessite aussi beaucoup d'eau pour le refroidissement des installations, la température de fusion dépassant 1.500 °C

L'acier peut être confectionné dans deux types d'usines : dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke (du carbone presque pur extrait du charbon), ou dans un four électrique, à partir d'acier de récupération (acier de recyclage).

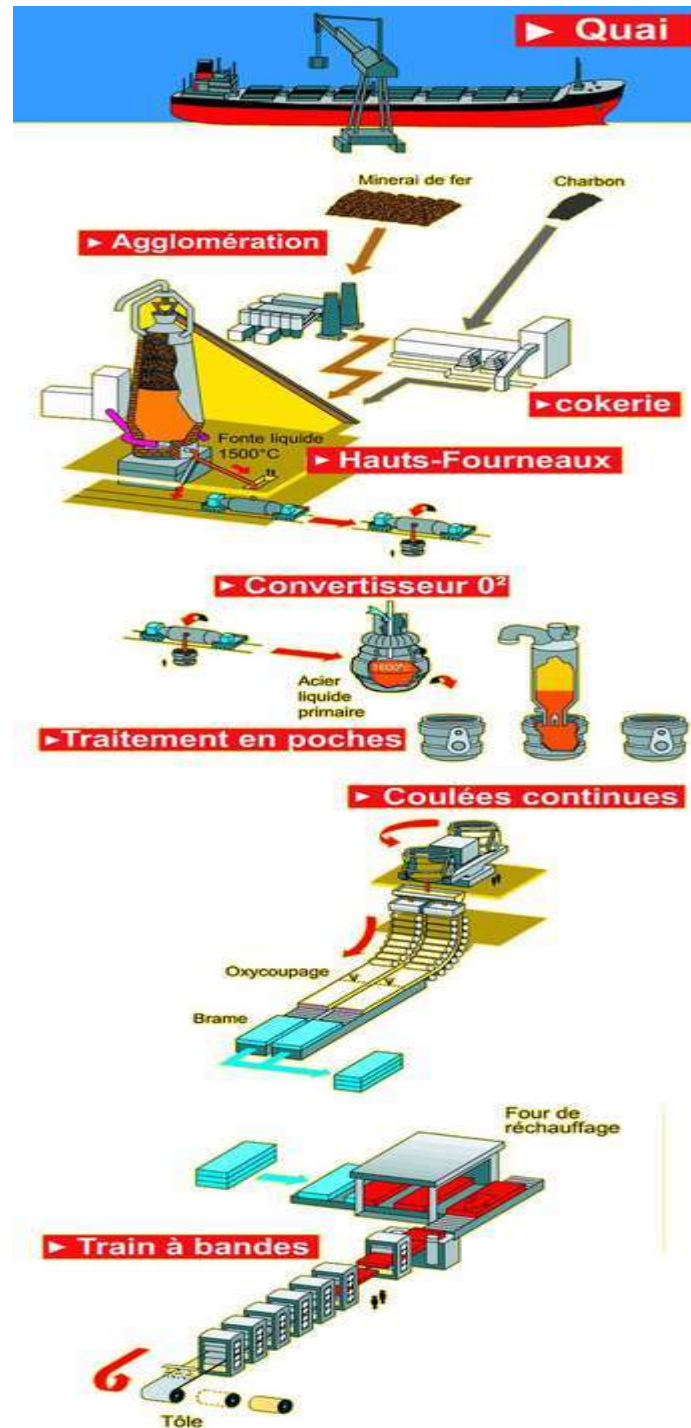


Figure N° 1 : Le cycle de fabrication de l'acier.

Le charbon fournit le coke servant de combustible aux hauts-fourneaux où le minerai est fondu. Le métal liquide qui en sort est la fonte. Celle-ci est dirigée vers l'aciérie dans des wagons, appelés « poches-tonneaux », capables de maintenir sa température plus de 48 heures durant. Arrivée à destination, la fonte est mélangée à de la ferraille dans une grosse marmite, ou convertisseur. Le tout est oxygéné pendant 15 minutes, délai au bout duquel on obtient l'acier de base.

C'est à ce stade qu'est concoctée la préparation finale en dosant de façon précise les ferro-alliages. De nombreux prélèvements sont effectués et analysés tout au long du processus, jusqu'à l'obtention de l'acier désiré. On procède ensuite à la coulée continue (dans une lingotière) qui consiste à solidifier le métal sous la forme d'une longue bande.

Pour finir, la bande est découpée au chalumeau afin d'obtenir des brames : parallépipèdes épais de 20 centimètres, larges de 1,50 mètre et longs d'une dizaine de mètres. Pesant environ 25 tonnes, chaque brame sera laminée et formée en bobine.

Bilan d'énergie grise : 60.000 kWh/m³.

I.4.2 Etapes de fabrication de l'acier

1. La formation de la fonte : le minerai de fer et le coke sont introduits dans le haut fourneau par le haut, la chaleur provoquant la combustion du coke et l'élimination des éléments chimiques contaminants. Le fer se charge ensuite de carbone au cours de sa descente et se transforme en fonte, qu'il faut alors séparer d'un mélange de déchets appelé laitier.
2. La conversion de la fonte en acier : la fonte en fusion est ensuite versée sur de la ferraille dans un convertisseur à oxygène où de l'oxygène est insufflé pour éliminer le carbone sous forme de CO₂.
3. L'affinage : l'acier obtenu est affiné en ajoutant des éléments (nickel, chrome...) pour former différents alliages et modifier les propriétés mécaniques de l'acier en fonction des besoins.
4. La coulée : l'acier est refroidi progressivement jusqu'à solidification.
5. Le laminage : l'acier est à nouveau monté à température pour le rendre malléable. Il est ensuite aplati dans des laminoirs et la forme voulue lui est donnée. [2]



Figure N° 2 : Tôle qui sort des trains à bandes

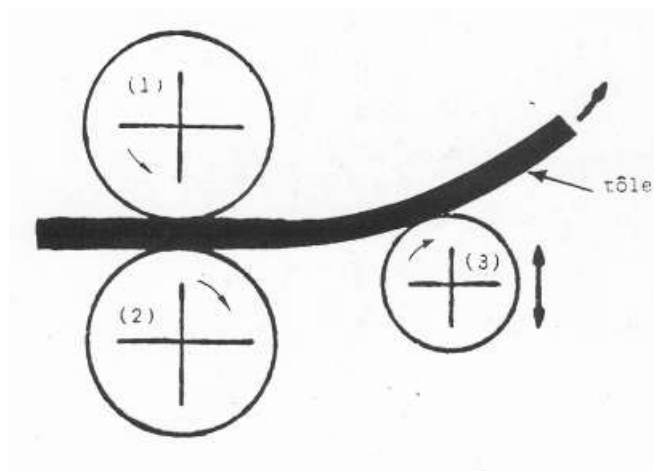


Figure N° 3: Schématisation du fonctionnement d'un laminoir

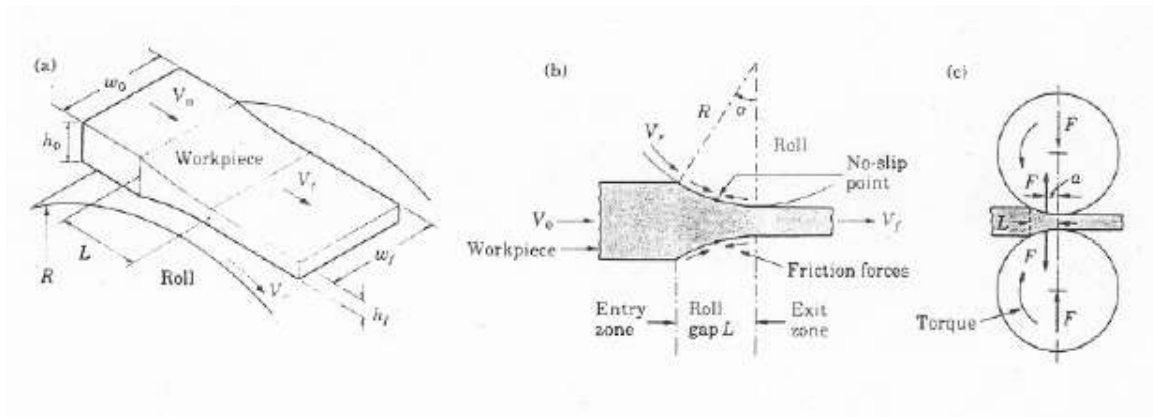


Figure N° 4: Les différentes étapes d'un laminage.

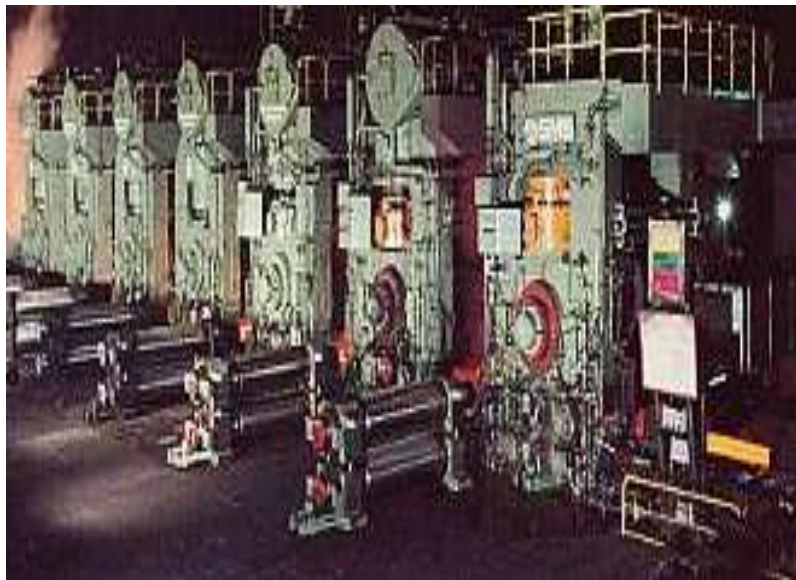


Figure N° 5: La cage d'un laminoir.



Figure N° 6: Photo d'une installation d'un laminage à chaud.

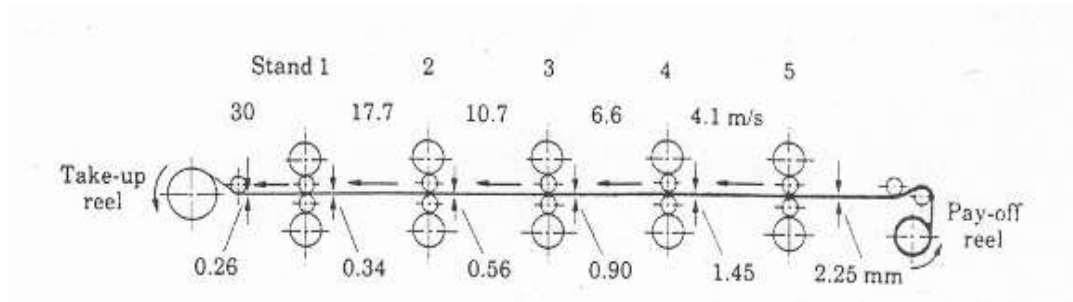


Figure N° 7: Schématisation d'un laminage multiple.

I.5 La composition chimique

La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés de l'acier : en dessous de 0,008 %, l'alliage est plutôt malléable et on parle de « fer » ; au-delà de 2,11 %, 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. De plus, 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.

Outre 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) et sa réduction assez simple (par addition de carbone à haute température). 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 toutefois remédier, soit par divers traitements de surface (peinture, brunissage, zingage, galvanisation à chaud, ...etc.), soit par l'utilisation de nuances d'acier dites « inoxydables ».

Par ailleurs, les aciers sont difficiles à mouler, donc peu recommandés pour les pièces volumineuses de formes complexes (bâties de machines, par exemple). On leur préfère alors des fontes.

Enfin, lorsque leur grande masse volumique est pénalisante (dans le secteur aéronautique par exemple), on se tourne vers des matériaux plus légers (alliages à base d'aluminium, titane, composites, ...etc.), qui ont l'inconvénient d'être plus chers.

De ce fait, les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application technique : équipements publics (ponts et chaussées, signalisation), industrie chimique, pharmaceutique et nucléaire (équipements sous pression, équipements soumis l'action de la flamme, récipients divers), agro-alimentaire (conditionnement et stockage), bâtiment (armatures, charpentes, ferronnerie, quincaillerie), industrie mécanique et thermique (moteurs, turbines, compresseurs), automobile (carrosserie, équipements), ferroviaire, aéronautique et aérospatial), médical (instruments, appareils et prothèses), composants mécaniques (visserie, ressorts, câbles, roulements, engrenages), outillage de frappe (marteaux, burins, matrices) et de coupe (fraises, forets, porte-plaquette), mobilier, design et les équipements électroménagers, ...etc.

I.6 Influence de la composition chimique sur la structure des aciers

I.6.1 La teneur en carbone

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

- Les aciers hypoeutectoïdes (de 0,0101 à 0,77 % de carbone) qui sont les plus malléables ;
- Les aciers extra-doux ont une teneur inférieure à 0,022 % de carbone ; ils sont hors de la « zone d'influence » de l'eutectoïde (perlite) et n'ont donc pas de perlite ; ils sont durcis par des précipités de cémentite en faible quantité ;

- entre 0,022 et 0,77 % de carbone, la cémentite est présente dans la perlite mais n'existe pas sous forme « seule » ;
- l'acier eutectoïde (0,77 % de carbone) appelée perlite ;
- les aciers hypereutectoïdes (de 0,77 à 2,11 % de carbone) qui sont les plus résistants.

La limite de 2,11 % correspond à la zone d'influence de l'eutectique (lédéburite) ; il existe toutefois des aciers Lédéburitique.

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

La structure du fer pur dépend de la température :

- Jusqu'à 912 °C, le fer (fer α) a une structure cristalline cubique centrée appelée ferrite
- entre 912 °C et 1 394 °C, le fer (fer γ) a une structure cristalline cubique à faces centrées appelée austénite
- entre 1 394 °C et jusqu'à son point de fusion à 1 538 °C, le fer (fer δ) retrouve une structure cristalline cubique centrée appelée ferrite delta (cette ferrite joue un rôle essentiel dans la mise en œuvre et surtout le soudage des aciers duplex).

La structure de l'alliage fer - carbone évolue d'une façon plus complexe en fonction de la température et de la teneur en carbone. Les règles diffèrent selon que l'on est hors de la « zone d'influence » de l'eutectoïde (entre 0 % et 0,022 %, entre 0,022 % et 0,77 % (perlite) ou entre 0,77 % et 2,11 % (au-delà, il s'agit de fonte). Voir l'étude du diagramme fer - carbone.

D'une manière simplifiée, pour un carbone compris entre 0,022 % et 2,11 % :

- jusqu'à 727 °C : On trouve un mélange de ferrite et de cémentite ;
- à partir de 727 °C : Le fer (α) se transforme en fer (γ) (changement de phase appelé austénitisation). La température de fin de transformation dépend de la teneur en carbone.

Les aciers non alliés (au carbone) peuvent contenir jusqu'à 2,11 % en masse de carbone. Certains aciers alliés peuvent contenir plus de carbone par l'ajout d'éléments dits « alphagène ou gammagène ».

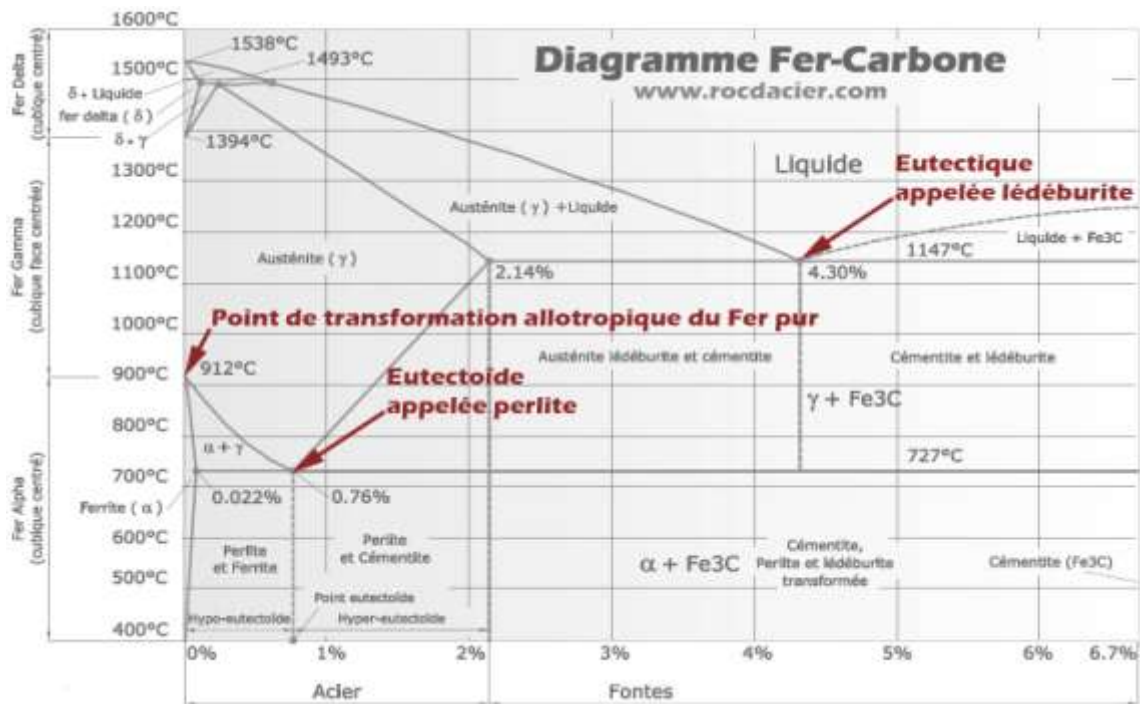


Figure N° 8: Diagramme de phase Fer-Carbone.

Ce diagramme permettant de visualiser les domaines d'existence des familles d'acier et des fontes, en absence d'éléments alphagène ou gammagène et de trempe.

I.6.2 Eléments d'alliage

Le carbone a une importance primordiale car c'est lui qui, associé au fer, confère à l'alliage le nom d'acier. Son influence sur les propriétés mécaniques de l'acier est prépondérante. Par exemple, en ce qui concerne l'amélioration de la propriété de dureté, l'addition de carbone est trente fois plus efficace que l'addition de manganèse.

L'aluminium :

Excellent désoxydant. Associé à l'oxygène, réduit la croissance du grain en phase austénitique. Peut rendre l'acier inapte à la galvanisation à chaud.

Le chrome :

C'est l'élément d'addition qui confère à l'acier la propriété de résistance mécanique à chaud et à l'oxydation (aciers réfractaires). Il joue aussi un rôle déterminant dans la résistance à la corrosion lorsqu'il est présent à une teneur de plus de 12 à 13 % (selon la teneur en carbone). Additionné de 0,5% à 9%, il augmente la trempabilité (famille des aciers au chrome). Il a un rôle alphagène.

Le cobalt :

Utilisé dans de nombreux alliages magnétiques. Provoque une résistance à l'adoucissement lors du revenu.

Le manganèse :

Forme des sulfures qui améliorent l'usinabilité. Augmente modérément la trempabilité.

Le molybdène :

Augmente la température de surchauffe, la résistance à haute température et la résistance au fluage. Augmente la trempabilité.

Le nickel :

Rend la structure austénitique (rôle gammagène), les aciers à forte teneur en chrome. Sert à produire des aciers de trempabilité modérée ou élevée (selon les autres éléments présents), à basse température d'austénitisation et à ténacité élevée après traitement de revenu. C'est l'élément d'alliage par excellence (jusqu'à une teneur de 9 %) des aciers pour application cryogéniques.

Le niobium :

Même avantage que le titane mais beaucoup moins volatil. Dans le domaine du soudage, il le remplace donc dans les métaux d'apport.

Le phosphore :

Augmente fortement la trempabilité et la résistance à la corrosion ; peut contribuer à la fragilité de revenu.

Le silicium :

Favorise l'orientation cristalline requise pour la fabrication d'un acier magnétique, augmente la résistivité électrique. Améliore la résistance à l'oxydation de certains aciers réfractaires. Utilisé comme élément désoxydant.

Le titane :

Pouvoir carburigène élevé (comme le niobium) et réduit donc la dureté de la martensite. Élimine le carbone en solution à haute température et réduit le risque de corrosion intergranulaire (TiC se forme avant $Cr_{23}C_6$ évite donc l'appauvrissement en chrome au joint de grain).

Le tungstène :

Améliore la dureté à haute température des aciers trempés et revenus. Fonctions sensiblement identiques à celles du molybdène.

Le vanadium :

Augmente la trempabilité, élève la température de surchauffe, provoque une résistance à l'adoucissement par revenu (effet de durcissement secondaire marqué).

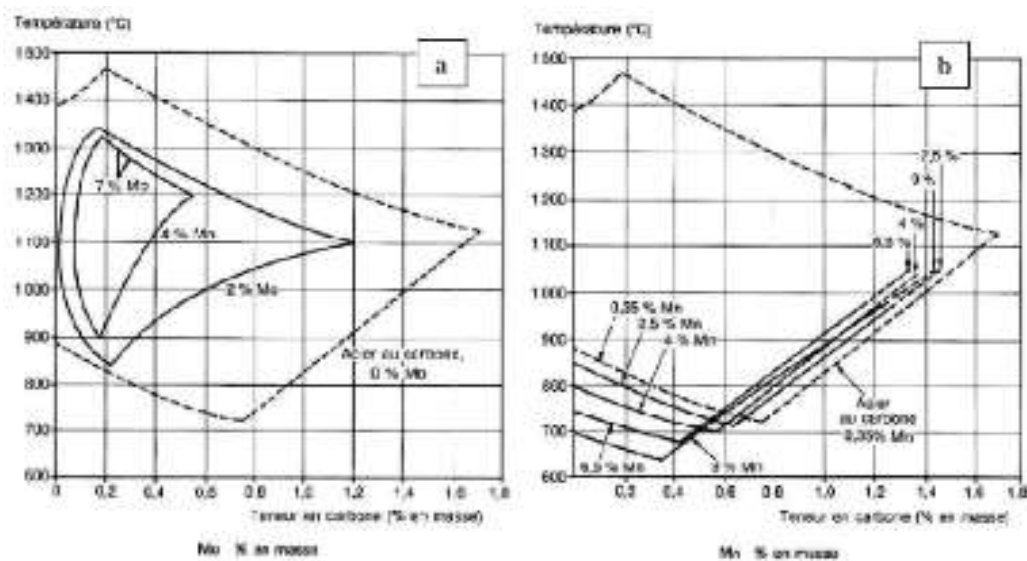


Figure N° 9 : Influence des éléments d'alliage sur le diagramme de phase FeC a) Présence d'un élément alphagène, le molybdène- b) Présence d'un élément gammagène, le manganèse

I.7 Structure des aciers

Lors du refroidissement d'un lingot, l'acier se solidifie à l'état d'austénitique. Au cours du refroidissement, à 727 °C, l'austénite se décompose, soit en ferrite + perlite, soit en perlite + cémentite. La vitesse de refroidissement ainsi que les éléments d'alliage ont une importance capitale sur la structure obtenue, et donc sur les propriétés de l'acier.

En effet :

- Les joints de grain bloquent les dislocations, donc augmentent la dureté et la limite élastique ; Or, plus les grains sont petits, plus il y a de joints de grain...
- La cémentite est un carbure, une céramique très dure ; sa présence augmente la dureté et la limite élastique, mais diminue la ductilité.

De manière générale :

- Un refroidissement rapide donne de petits grains, alors qu'un refroidissement lent donne de gros grains ;
- La réorganisation des atomes pour passer de la structure austénitique (cubique à faces centrées) à la structure ferritique (cubique centrée), se fait par des mouvements d'atomes de faible ampleur (quelques distances interatomiques) ;
- La ferrite pouvant contenir moins de carbone dissout (voir Solution solide et Site interstitiel), le carbone doit migrer sur de plus grandes distances pour former de la cémentite ; la distance à parcourir est moins grande dans le cas de la perlite (eutectoïde), puisque la cémentite s'intercale entre des « tranches » de ferrite ;
- La germination des nouveaux cristaux se fait de manière préférentielle aux défauts, et notamment aux joints de grain de l'austénite ; ainsi, la structure de solidification de l'austénite joue un rôle important (voir Solidification).

Certains éléments chimiques peuvent « piéger » le carbone pour former des carbures (par exemple le titane ou l'aluminium). Ils empêchent ainsi la formation de cémentite.

On peut modifier la structure de l'acier par des traitements thermomécaniques :

- Déformations : Ecrasement du lingot, laminage à froid ou à chaud, forgeage...etc.
- Traitements thermiques, qui permettent de « rejouer » sur le refroidissement :
 - Trempe, éventuellement suivie d'un revenu : la rapidité de la transformation ne permet pas au carbone de diffuser et le « piège » dans la maille cubique centrée, qui se déforme pour donner de la martensite ; les cristaux forment de petites aiguilles ;
 - Une trempe plus lente, ou bien une trempe étagée, permet la formation de bainite ;

- Recuit, permettant la diffusion des éléments, la réorganisation des atomes et l'élimination des dislocations.

I.8 Propriétés et caractéristiques des aciers

L'acier est un alliage essentiellement composé de fer, sa densité varie donc autour de celle du fer (7,32 à 7,86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques. La densité d'un acier inoxydable est typiquement un peu supérieure à 8. Par exemple, la densité d'un acier inoxydable de type AISI 304 (X2CrNi18-10) est environ 8,02.

Ils ont un module de Young d'environ 210 000 MPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermo-mécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis.

I.8.1 Le traitement thermo - mécanique :

Le traitement thermo -mécanique est l'association :

- D'un traitement thermique, sous la forme d'un cycle chauffage-maintien-refroidissement (trempe, revenu...etc.) ;
- D'un traitement mécanique, une déformation provoquant de l'écroutissage (laminage, forgeage, tréfilage...etc.).

I.8.2 Le traitement de surface :

Consiste à modifier la composition chimique ou la structure d'une couche extérieure d'acier. Cela peut être :

- Une réaction en phase liquide (chromisation, carburation, nitruration en bain de sel, carbon-nitruration, galvanisation ;...) ;
- Une réaction en phase gazeuse (nitruration en phase liquide) ;
- Une projection d'ions (implantation ionique) ;
- Un recouvrement (peinture, émaillage). [3]

II. Propriétés physico-chimiques :

II.1 Propriétés physiques

Ci-dessous regroupe quelques propriétés physiques de quelques familles d'aciers (Aciers d'usage général - structures minces, tôles et profilés, Aciers de construction mécanique, Aciers faiblement alliés (aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse), Aciers fortement alliés (acier inoxydable).

Tableau N° 1 : Quelques propriétés physiques des aciers. [4]

Nuances normalisées	Module d'élasticité E (Mpa)	Coefficient de Poisson (sans Dim)	Masse volumique (Kg/m3)	Résistance à la rupture à la traction Rr (MPa)	Limite élastique à la traction Re (MPa)
<i>Aciers d'usage général - structures minces (tôles et profilés)</i>					
S 235	205000	0.3	7800	340	235
S335	205000	0.3	7800	490	355
<i>Aciers de construction mécanique</i>					
E295	205000	0.3	7800	470	295
S355	205000	0.3	7800	490	355
<i>Aciers faiblement alliés (aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse)</i>					
34 Cr Mo 4	205000	0.3	7800	700 à 1100	450 à 750
36 Ni Cr Mo 16	205000	0.3	7800	1000 à 1750	800 à 1250
<i>Aciers fortement alliés (acier inoxydable)</i>					
X 2 Cr Ni 19-11	205000	0.3	7800	440 à 640	185

II.2 Propriétés chimiques

Les métaux sont susceptibles de réagir chimiquement une fois en contact avec d'autres éléments. Lorsqu'il y a altération, on parle de corrosion.

La teneur des éléments qui le composent est donnée par les normes ou par les catalogues des producteurs (cahiers de charges).

La réactivité des aciers avec leur environnement est importante. La corrosion atmosphérique dépend de l'humidité relative et de la pollution de l'air.

Elle engendre une dégradation du matériau en termes d'épaisseur, de poids et par conséquent de performances [5]

III. Propriétés mécanique

Parmi les caractéristiques mécaniques des aciers, les plus couramment utilisées pour une application dans la construction métallique sont :

III.1 Limite d'élasticité: R_e (en N/mm^2 ou MPa)

C'est la limite de la charge au-delà de laquelle le métal se déforme de façon irréversible c'est-à-dire qu'il ne retrouve plus sa géométrie initiale; la déformation n'est plus élastique et subsiste, elle devient plastique. Elle sert au calcul de la contrainte des éléments travaillant à la flexion, au cisaillement, au flambement.

$$R_e = F_e / S_0 \quad (1)$$

III.2 Résistance à la traction (rupture): R_m (en N/mm^2 ou MPa)

C'est la plus grande force que le métal peut supporter en traction, avant rupture. Elle sert au calcul de la fatigue

$$R_m = F_m / S_0 \quad (2)$$

F_m : Force de traction maximale (en N).

S_0 : Surface de section transverse de l'éprouvette (en mm^2).

III.3 Allongement à rupture: A (en %)

L'allongement à rupture, contrairement à ce que son nom laisserait penser, ne représente donc pas un allongement mais une déformation moyenne.

L'allongement à rupture doit être distingué de l'allongement uniforme, qui correspond à l'allongement jusqu'à apparition d'une localisation de la déformation. En raison de la localisation, la valeur de l'allongement $A\%$ dépend de la base de l'extensomètre utilisé.

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

Avec :

- L_u la longueur ultime, longueur de la poutre juste avant la rupture. La notation (en mm).
- L_o la longueur initiale, longueur de la poutre avant le début de l'essai de traction(en mm).

Remarque : L_u et L_o doivent être exprimées dans la même unité, en général le millimètre.

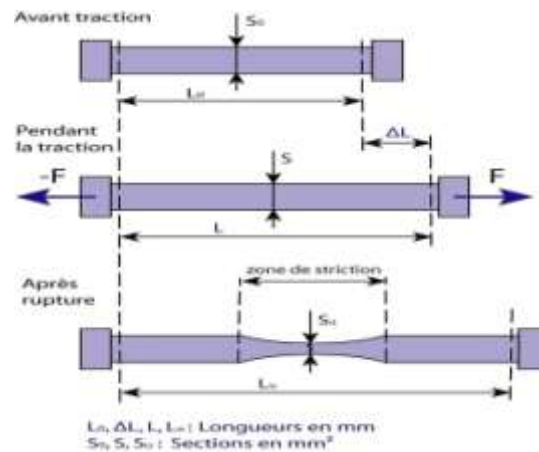


Figure N° 10: Evolution d'une barre soumise à un essai de traction

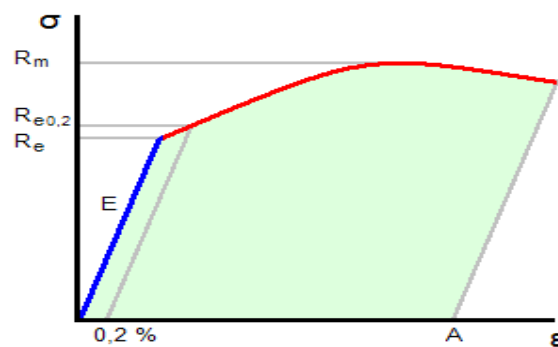


Figure N° 11: Courbe de traction.

III.4 Module d'élasticité: E (en N/mm²)

Exprimant la rigidité du métal, c'est le facteur de proportion entre une contrainte appliquée à une barre et l'allongement relatif de cette barre dans le domaine plastique.

$$E = \sigma / \epsilon \quad (4)$$

E : le module d'élasticité ou module de Young (en N/mm²)

ε : allongement spécifique

σ : tension (en N/mm²)

III.5 Résilience: KCV (en J/cm²)

C'est une caractéristique qui permet d'apprécier la résistance d'un métal à une rupture brutale; l'essai consiste à rompre à l'occasion d'un choc unique une section métallique entaillée en son milieu, reposant sur deux (02) appuis et sollicitée en flexion. Il s'agit d'un des principaux critères de choix de qualité d'acier pour les constructions soudées.

Résilience = (énergie absorbée par la rupture W) / (section au niveau de l'entaille) (5)

III.6 Dureté

C'est la résistance à la déformation. Cette caractéristique permet d'estimer les propriétés mécaniques d'un métal. En effet, des correspondances entre les résultats de mesure de dureté et le niveau de résistance (essentiellement à la traction) ont été établies; elles dépendent de la nature du métal de base.

III.6.1. Essai dureté Brinell (HB)

HB : dureté Brinell

D : diamètre du pénétrateur (en mm)

d₁ et d₂ : mesure de l'empreinte réalisée à 90° (en mm)

h : profondeur (en mm)

F : charge d'essai (en N)

g : accélération de la pesanteur (g/mm²)

$$\begin{aligned}
 H_B &= \text{Constante} \cdot \frac{(\text{Charge de l'essai})}{(\text{Aire de l'empreinte})} \\
 &= 0,102 \cdot \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Avec :

$$\text{Constante} = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,8066} = 0,102 \quad d = \frac{d_2 + d_1}{2} \tag{7}$$

III.6.2. Essai de dureté Meyer

Le pénétrateur est identique au pénétrateur de la dureté Brinell.

D'une manière plus générale, on utilise le même duromètre que celui utilisé pour la dureté Brinell.

La mesure est effectuée avec les mêmes principes que la dureté Brinell. Les valeurs de dureté Meyer sont calculées avec la formule suivante :

$$H_M = 0,102 \cdot \frac{4F}{\pi \cdot d^2} \quad (8)$$

Avec :

$$\text{Constante} = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,8066} = 0,102 \quad d = \frac{d_2 + d_1}{2} \quad (9)$$

III.6.3. Essai de dureté Vickers

H_V : dureté Vickers

d_1 et d_2 : mesure de l'empreinte réalisée à 90° (2 diagonales du carré de l'empreinte) (en mm)

F : charge d'essai (N)

g : accélération de la pesanteur (g/mm^2)

$$\begin{aligned} H_V &= \text{Constante} \cdot \frac{(\text{Charge de l'essai})}{(\text{Aire de l'empreinte})} \\ &= 0,102 \cdot \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \\ &= 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Avec

$$\text{Constante} = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,8066} = 0,102 \qquad d = \frac{d_2 + d_1}{2} \qquad (11)$$

III.6.3. Essai de dureté Rockwell (HRC)

$$\text{Échelle B, E et F} \qquad HRB = 130 - r \qquad (12)$$

$$\text{Échelle C} \qquad HRC = 100 - r \qquad (13)$$

III.7 Ténacité ($\text{Pa m}^{1/2}$)

C'est la capacité d'un métal à résister à la propagation brutale d'une fissure. Comme, il est pratiquement impossible de garantir qu'une construction ne comporte aucun défaut, il est indispensable de prendre en compte ces défauts pour estimer la taille critique de ces défauts au-delà de laquelle ils seront responsables de la rupture et en deçà de laquelle la rupture serait évitée. [6]

IV. Diagramme TTT et TRC

IV.1. Diagramme Temps-Température-Transformation (TTT)

IV.1.1 Définition:

Le diagramme TTT indique les transformations isothermes (à température constante), d'un matériau, suite à un refroidissement ultrarapide à partir d'une température d'austénitisation jusqu'à la température d'intérêt

Sur chaque ligne isotherme, on marque les temps de début et de fin des différentes transformations.

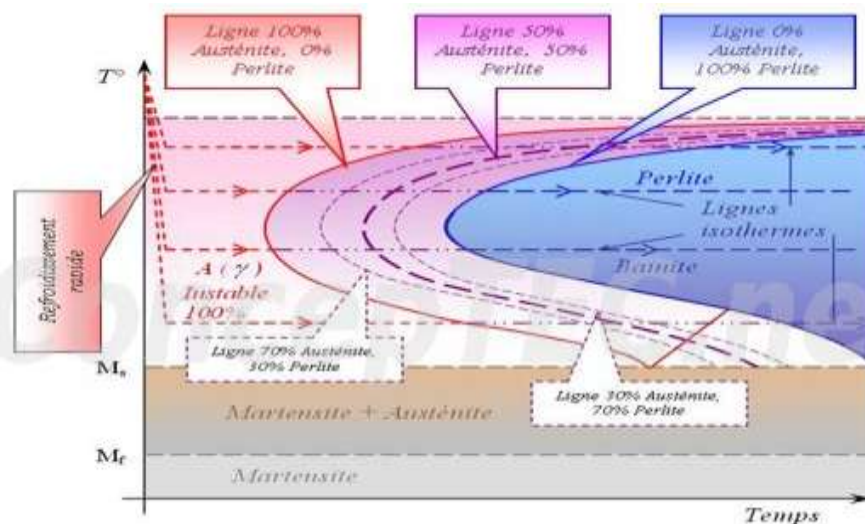


Figure N° 12: Explication du diagramme TTT pour un acier eutectoïde.

IV.1.2. Les transformations isothermes

Le diagramme TTT indique les transformations isothermes (à température constante), d'un matériau, suite à un refroidissement ultrarapide à partir d'une température d'austénitisation jusqu'à la température d'intérêt.

Sur chaque ligne isotherme on marque les temps de début et de fin des différentes transformations. L'ensemble des points qui définissent les temps de début et de fins des transformations correspondent aux courbes de début et de fin de transformation.

À la température d'austénitisation $T_a > A_{c3}$, l'austénite est stable, suite au refroidissement rapide, au dessous de la ligne A_{c3} , l'austénite devient instable (car elle est située à une température inférieure à sa température d'équilibre) et ne se transformera pas brusquement, mais elle reste quelque temps pour qu'elle commence à se transformer.

On définit le temps d'incubation à une température de maintien donnée, le temps nécessaire pour que la transformation de l'austénite (instable) débute.

IV.1.3. Les transformations de phases dans le diagramme TTT

Transformation perlitique : Quand l'acier se transforme à haute température avec un faible sous refroidissement, la perlite est grossière et les lamelles de carbure largement espacées. A plus basse température, la perlite obtenue est plus fine, parfois appelée "Troostite".

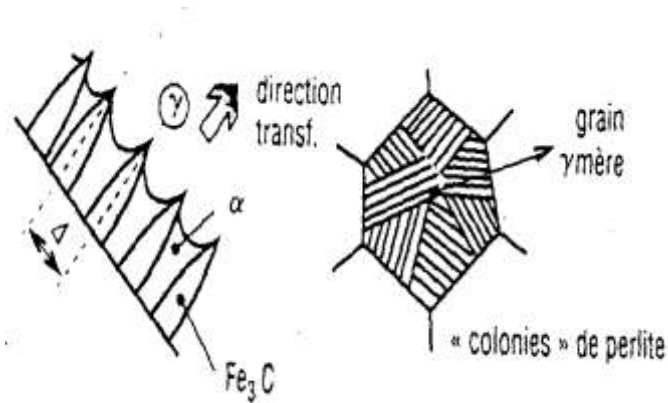


Figure N° 13: Transformation perlitique.

Transformation bainitique :

En dessous du nez de la courbe en C, la transformation est trop rapide pour que l'austénite puisse se transformer (précipiter) en belles lamelles de perlite. Dans ce cas, il croît en fibres isolées (lamelles de ferrites et des particules (Plaquettes) de carbure Fe_3C) et la structure ainsi obtenue est de la "bainite supérieure".

Quand la température de transformation isotherme est encore plus basse, l'austénite croît sous forme de petits cylindres ("bainite inférieure").

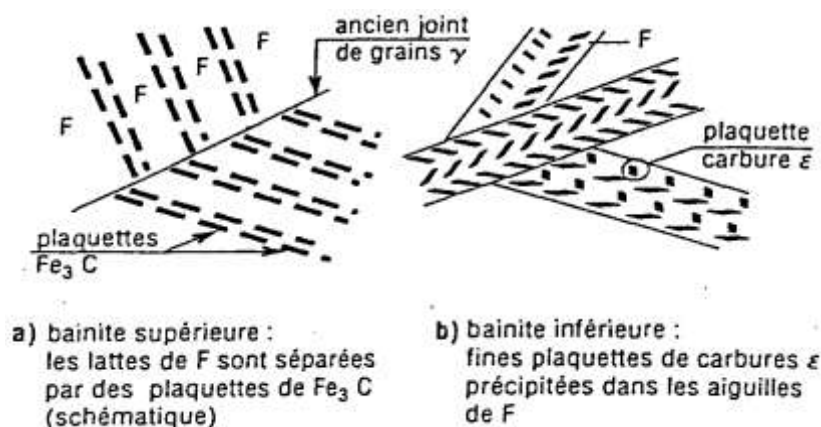


Figure N° 14: Schématisation de la Microstructure bainitique.

La bainite est un constituant qui possède les mêmes phases que la Perlite mais la microstructure est différente (plus fine) sous forme d'aiguilles.



Figure N° 15: Microstructure de la bainite.

Pour obtenir de la martensite dans l'acier, il faut le refroidir très rapidement.

Prenons le cas de l'acier à 0,8% de carbone qui est un acier eutectoïde : quand on le refroidit lentement, il se transforme en perlite ($\text{Fe}_3\text{C} + \alpha$). Cette réaction eutectoïde ne peut se produire qu'en dessous de 723°C . Le nez de la courbe en C est aux environs de 525°C soit environ 175°C en dessous du nez de la courbe en C. Par la suite, une vitesse de refroidissement de 200°C/s suffit à éviter le nez de la courbe en C à 1%, et à produire de la martensite.

La transformation de l'austénite en martensite est indépendante du temps, elle dépend principalement de la température de maintien après trempé. La transformation débute à une température de refroidissement appelée « Ms », et se termine à une température de fin de transformation désigné « Mf », (M Martensite, s : Start et f : finish).

A une température intermédiaire située dans l'intervalle (Ms, Mf), correspond un certain taux de transformation martensitique. "Ms" et "Mf" sont des températures caractéristiques de la transformation martensitique, qui varient en fonction du taux de carbone

Toute quantité d'austénite non transformée à la température de la trempé est appelée "austénite résiduelle". [7]

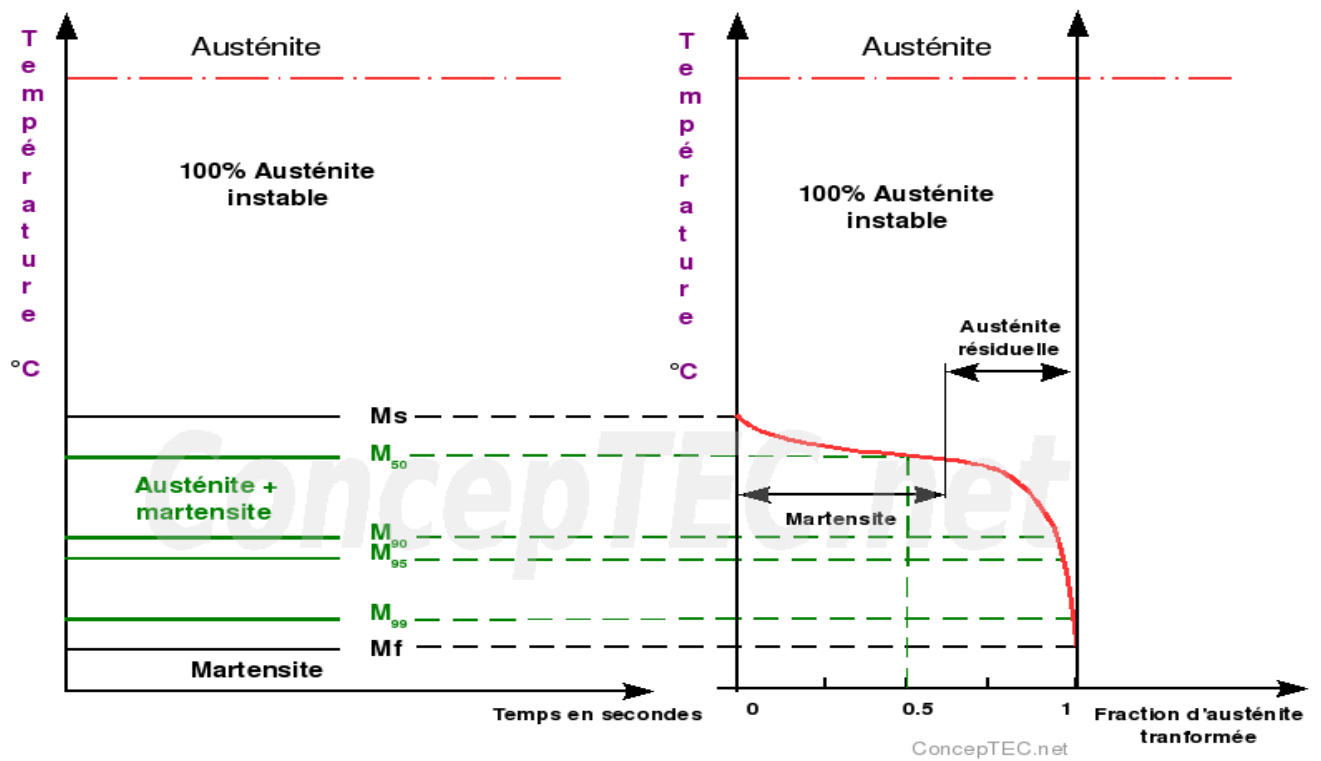


Figure N° 16: Transformation martensitique.

IV.2. Diagramme de la transformation en refroidissement continu (TRC)

IV2.1. Définition:

Il permet de décrire la transformation d'un acier à l'état austénitisé au cours d'un refroidissement continu (contrairement au diagramme TTT qui décrit la transformation à température constante).

Exemple

Soit le diagramme TRC de l'acier 30 NiCr11 représenté sur la figure suivante

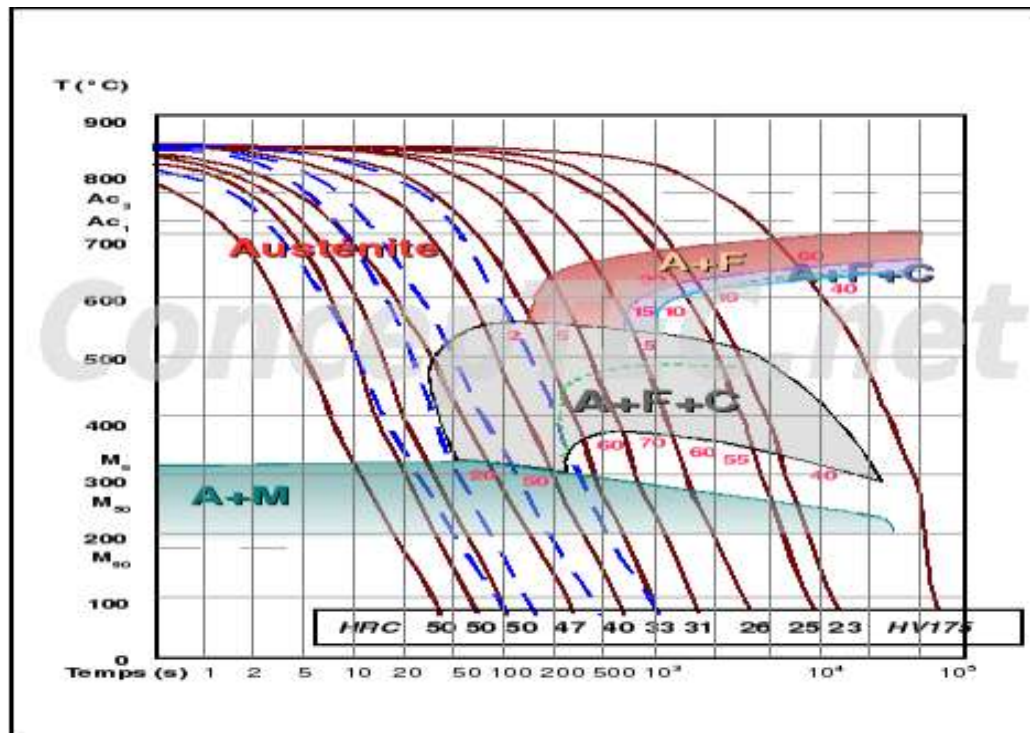


Diagramme TRC de l'acier 30NiCr11 (d'après l'atlas IRSID)

Figure N° 17: Diagramme TRC de l'acier 30NiCr11

A = Austénite
 F = Ferrite
 C = Cémentite
 M = Martensite

1. Les lois de refroidissement représentent la transformation en refroidissement continu d'une phase de l'acier qui est l'Austénite.
2. L'axe des abscisses représente le temps et l'axe des ordonnées représente la température.
3. Les compositions qui apparaissent sont :
 - Dans la zone A+F : il y a apparition de la ferrite
 - Dans la zone A+M : il y a apparition de la martensite
 - Sur le diagramme, on a deux zones A+F+C, l'une est située à une température plus élevée que l'autre. À haute température il y a apparition de la perlite et à température plus basse il y a apparition de la bainite qui diffère selon leur microstructure.

- 4. Les nombres inscrits sur chaque courbe indiquent le pourcentage d'austénite transformée.

Exemples:

- Pour la courbe à 175 HV au cours du refroidissement, il y a passage par les zones A+F et A+F+C ou il y a transformation de l'austénite respectivement en ferrite (60%) et perlite (40%)
- Pour la courbe à 33 HRC : au cours du refroidissement, il y a passage par les zones A+F et A+F+C ou il y a transformation de l'austénite respectivement en ferrite (2%) et bainite (60%). Entre la température 360°C, il n'y a pas de transformation martensite. Le pourcentage de martensite dépend de la température de refroidissement à atteindre. d'austénite jusqu'à la température 290°C ou il y aura apparition de la martensite et d'austénite résiduel

5. Pour confirmer la trempabilité de l'acier, on peut dire qu'il faut former au moins 50% de martensite à partir de l'austénite non transformée. La loi de refroidissement qui nous donne une trempabilité convenable de la pièce est celle qui correspond à la vitesse critique de trempé. La courbe N°5 qui donne 40 HRC correspond donc à la Vitesse critique de refroidissement.

La vitesse de refroidissement dans ce cas est par convention : [8]

$$V_r = \frac{700^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}}{t_{300} - t_{700}} = \frac{400}{185} = 2.162^{\circ}\text{C}\text{s}^{-1} \quad (14)$$

V. Les Tôles

V.1. Définition:

La tôle est l'un des premiers matériaux de couverture métallique utilisé dans le secteur de la construction. Son invention par H. Palmer remonte à 1829. Il s'agit d'un matériau plat produit à l'aide du laminage. Le produit de départ appelé brame est étiré, puis y est appliquée une forte pression par le passage alterné entre deux rouleaux. Il en résulte des lames fines et uniformes.

V.2. Les différents types de tôles

Suivant sa méthode de fabrication, on peut distinguer deux types de tôles. D'un côté, il existe la catégorie de laminage effectué à chaud. L'acier est réchauffé entre 800 et 1200°C, puis écrasé successivement entre deux (02) rouleaux. Le produit ainsi obtenu atteint une épaisseur de plus de 3 mm, appelé tôle forte, ou moins de 3 mm, ou tôle mince. D'un autre côté, on retrouve la technique de laminage à froid à partir de feuilles d'acier fines. Elle permet d'obtenir uniquement des lames minces.



Figure N° 18: Photo d'une brame.

On distingue également les types de tôle par leur finition. On retrouve ainsi la tôle noire dont les faces ont un fini brut, sans revêtement. Les galvanisés, pour leur part, sont dotés d'un revêtement anticorrosion au niveau de leur deux faces. Enfin, on peut trouver les prés laqués qui présentent une surface anticorrosion comme chez les galvanisés, en-dessus de laquelle, on ajoute une/des couches de peinture.



Figure N° 19: Pré laqué anticorrosion.

V.3. Le conditionnement

La fabrication de la tôle passe par des techniques artisanales de mise en forme et de montage. En fin de processus, il ne reste plus qu'à la présenter sous son format de commercialisation. Cela peut aller de la bobine, aux feuilles prédécoupées en passant par des bandes refondues. Cette diversité donne aux consommateurs un large choix quant à l'utilisation et au stockage de la tôle. L'aspect final du produit a également son importance. Elle peut être plane (sans aucun relief), perforée, ondulée, texturée, surfacée, déployée, gaufré ou encore gravée.

V.4. Les domaines d'utilisation

Tous les types de tôle d'acier sont conçus à partir de la tôle plane, c'est-à-dire à surface lisse. En travaillant cette base, les possibilités d'usage sont nombreuses : fabrication de mobilier métallique, de portail, de volets, de couverture, gouttière, d'objets de décoration, etc. Sous sa forme perforée, elle peut servir au tri des produits dans l'industrie, à couvrir les sorties d'aération dans les bâtiments, à fabriquer des cloisonnements intérieurs, etc.

La tôle perforée est intéressante sur le point de vue esthétique grâce aux différentes formes et motifs de perforation disponibles. La tôle à relief, pour sa part, regroupe différents modèles : surfacée, emboutie, texturée, etc. Grâce à leur surface bombée, ces modèles font d'excellents revêtements de sol avec des propriétés antidérapantes. Elles peuvent donc être utilisées pour la fabrication de planchers (bus, train,...), de marchepieds, de marches d'escalier, d'échafaudage, etc. Quant à la version ondulée, elle est célèbre dans le domaine de la toiture.

Elle est non seulement facile à poser, mais également favorable à l'écoulement des eaux de pluie. En somme, la tôle dans toutes ses formes peut avoir plusieurs fonctionnalités dans des domaines aussi variés que l'industrie, le bâtiment, le transport, la décoration,... etc.



Figure N° 20: Tôle plane.

V.5. Les avantages de la tôle

L'arrivée de l'acier sous forme de plaque dans le secteur du bâtiment a apporté une réelle révolution. En effet, la tôle présente l'avantage d'avoir une densité élevée, ce qui est gage de solidité et de longévité. Votre ouvrage vous durera donc de nombreuses années sans signes d'usure ni de déformation. Elle reste pourtant légère, garantissant la facilité de son transport ainsi que de son utilisation. A cela s'ajoutent ses multiples possibilités d'utilisation grâce à la variété disponibles sur le marché : pour la toiture, le sol, les cloisons, les rampes d'escalier, et bien d'autres encore. Enfin, ce matériau ne nécessite qu'un minimum d'entretien. Etant donné que son point faible est la rouille, il suffit d'opter pour une tôle inoxydable ou d'appliquer une peinture spéciale anti rouille.

V.6. Les techniques de manipulation

En plus d'être commercialisé sous différents formats, textures et finitions, la tôle offre encore une grande marge de manœuvre quant à son façonnage. La découpe ne nécessite pas d'appareil industriel grâce à sa faible épaisseur. L'idéal serait d'utiliser une scie sauteuse qui apporte de la précision et un fini lisse. Pour ce faire, il importe de bien sécuriser les deux bouts de la plaque à sectionner afin de l'empêcher de bouger lors de l'opération. Des cisailles peuvent également faire l'affaire mais risquent de donner des bords irréguliers. Le cas échéant, il faut passer la bordure avec une ponceuse électrique vibrante. Outre la découpe, il est aussi possible de plier la plaque selon vos besoins. Pour ce faire, la tôle doit être placée entre deux matériaux plats puis fermement serrée à l'aide d'un étau. On fait dépasser la partie à plier, puis on la plie avec un profilé. Quant à l'assemblage, elle peut être effectuée à l'aide de vis et de rivets, sachant que ce matériau est simple à perforer. L'utilisation de bande

adhésive double face est également possible. Enfin, vous êtes libres d'appliquer la finition désirée sur votre produit fini. [9]

VI. Types de corrosion

VI.1. Définition

La corrosion métallique est un phénomène qui existe depuis que les hommes ont réussi à préparer des métaux qui ne se trouvaient pas à l'état pur dans la nature.

La corrosion est le phénomène suivant lequel les métaux et les alliages métalliques subissent de la part de leur environnement, quel qu'il soit, une attaque dont la conséquence est de les faire retourner vers leur forme d'origine, de minerais.

Il convient de faire une distinction entre la corrosion à chaud et la corrosion aqueuse :

VI.1.1. La corrosion sèche ou à chaud

Se développe à la température élevée (plusieurs centaines de °C) quand le métal est exposé à un gaz oxydant tel qu'oxygène, soufre ou halogènes. Ce type de corrosion se produit en l'absence d'électrolyte.



Figure N° 21: Corrosion à chaud des métaux et des alliages

VI.1.2. La corrosion aqueuse ou humide

Malgré la température peu élevée, se révèle très insidieuse car elle ne résulte pas d'une suite simple de mêmes processus physiques et chimiques. Il existe une dizaine de types de corrosion aqueuse :

- La corrosion uniforme : c'est la forme la plus connue et la plus fréquente
- La corrosion galvanique : elle se rencontre quand il y a couplage de métaux différents au sein d'un même électrolyte

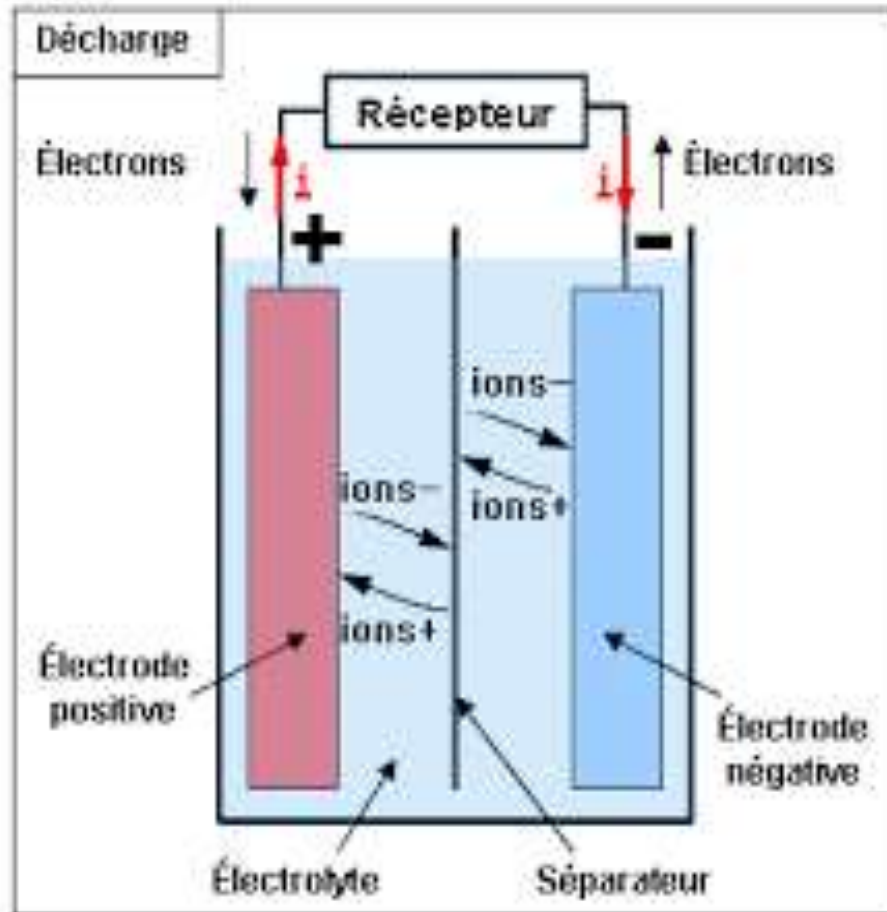


Figure N° 22: Electrolyte

- La corrosion par aération différentielle : elle résulte de différence de concentration en oxygène dans l'électrolyte où est maintenu le métal
- La corrosion par piqûres : c'est un type de corrosion localisée affectant des métaux ou alliages passivable au contact avec des solutions riches en éléments tels les chlorures
- La corrosion intergranulaire : elle s'observe essentiellement dans les zones thermiquement affectées par une soudure
- La corrosion sous tension

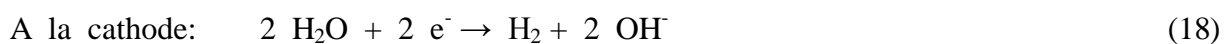


Figure N° 23: Corrosion aqueuse

VI.2.Principaux mécanismes de la corrosion

Les métaux employés dans le génie civil sont des donneurs d'électrons et constituent l'anode. L'eau, additionnée à des fondants éventuellement, les protons et l'oxygène sont, quant à eux, des accepteurs d'électrons et constituent la cathode. C'est la présence de ces éléments qui va provoquer l'oxydation des métaux et donc favorisé la corrosion.

Le phénomène de corrosion met en jeu des réactions d'oxydo-réduction. Les principaux couples en milieu aqueux sont :



Il est intéressant pour faciliter l'étude des phénomènes de corrosion de séparer les zones où se font les oxydations, des zones où s'effectuent les réductions, de manière à pouvoir mesurer le nombre d'électrons échangés entre anode et cathode.

VI.3. La vitesse de corrosion

Elle dépend de nombreux facteurs, dont les principaux sont :

- Le renouvellement ou la stagnation du milieu : lorsque le milieu est constamment renouvelé, il y a apport continu d'éléments participant à la corrosion alors que sa stagnation conduit à une consommation de ces éléments pouvant aboutir à un équilibre.

- L'agitation ou le repos du milieu : l'agitation disperse les éléments participant à la corrosion et l'éventuel dépôt formé par ces produits ne peut pas protéger le métal.

- La température : la vitesse de corrosion croît généralement avec la température.

- Les hétérogénéités du métal et du milieu : l'état de surface du métal, sa composition chimique superficielle, le pH de la solution, l'oxygène dissous,... sont autant de facteurs d'influence.

Il existe deux grands types de méthodes pour déterminer la vitesse de corrosion :

VI.3.1. La méthode voltamétrique

Qui consiste à mesurer un courant de corrosion entre l'électrolyte (le fondant testé) et l'électrode de travail (acier, zinc, aluminium). Ce courant est traduit en perte de masse par unité de temps et de surface. (Voir l'annexe)

VI.3.2. La méthode gravimétrique

Qui consiste à mesurer directement la perte de masse par unité de temps et de surface. (Méthode d'essai décrite dans l'annexe A de la NF P 98-181). [10]

Chapitre II

Procédures

expérimentales

II. Appareillage

Les différents dispositifs utilisés dans ce travail sont :

II.1 Polisseuse

Il s'agit d'une polisseuse, du laboratoire Sciences Des Matériaux (SDM) du département Génie-Mécanique.

La polisseuse Rotopol-31 est de type semi-automatique



Figure N° 24: La polisseuse utilisée.

II.2 Duromètre

C'est un duromètre de type WOLPERT DIA TESTOR RC, constitué de deux parties, la première est la partie d'essai, elle nous permet d'effectuer les trois type d'essais : Rockwell, Vickers et Brinell. Il est muni d'un sélectionneur de charges et d'un plateau ou table sur laquelle les éprouvettes sont posées. La seconde partie, nous permet de mesurer l'empreinte des billes et des pyramides à un grossissement de 70 ou 140 fois sur l'écran de verre dépoli, ce duromètre est alimenté sous une tension de 220V et d'une fréquence de 50HZ.



Figure N° 25: Le duromètre WOLPERT DIA TESTOR.

II.3 La Machine de traction

La machine de traction utilisée est de type CHENK-TREBEL, alimentée sous une tension de 220V, ayant une charge de 100KN, Elle est utilisée dans le laboratoire central physico-chimique à l'électro industrie. La date de mise en marche de cette machine est 1985.

Elle fonctionne à une température comprise entre 18 et 35°C, elle pèse 1000 kg. La vitesse de la traverse est comprise entre 0.125 et 500 mm/min.



Figure N° 26: Machine de traction CHENK-TREBEL.

II.4 Analyseur du carbone et du soufre CS800

Cet appareil a été conçu pour l'analyse chimique des métaux ferreux, il permet cependant l'analyse d'une grande variété de matériaux, comme le ciment le charbon, le caoutchouc, le plastique le sol...etc.



Figure N° 27: Analyseur du carbone et du soufre CS800.

II.5 Microscope optique

Pour pouvoir observer la microstructure de l'acier étudié après son polissage, nous avons utilisé un microscope optique universel de type ZEISS alimenté sous une tension de 220V, avec une fréquence de 50Hz et une puissance de 100W, muni d'une caméra liée à un ordinateur, ce qui nous permet d'obtenir un pouvoir de résolution allant de 50 à 500 fois. Il est utilisé dans le laboratoire SDM du département de Génie Mécanique de l'UMMTO.



Figure N° 28: Microscope optique.

II.5.1 Polissage des échantillons

Les échantillons ont subi un polissage mécanique en utilisant des papiers EMERI de granulométrie décroissante 120, 240, 400, 800, 1200, 2000,4000, placés sur un disque rotatif de polisseuses avec arrosage abondant pour éviter tout risque d'échauffement. Et, la finition a été effectuée, en utilisant le feutre imbibé d'une suspension abrasive d'aluminium. Afin d'éliminer les rayures produites par le papier abrasif, on a effectué une rotation de 90° à chaque fois qu'on change de papier abrasif.

II.2 Attaque chimique

Pour révéler la structure de notre acier, nous avons utilisé le réactif approprié le Nital qui est composé de : 1 à 4% de HNO_3 et

Le reste c'est l'alcool (éthanol) $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$;

L'attaque a été chronométrée, elle est de l'ordre de 45secondes à froid, puis l'échantillon a été lavé sous un jet d'eau puis sécher à l'aide d'un séchoir.

II.3 Microscope optique

Les surfaces préparées selon le procédé décrit précédemment sont ensuite observés au microscope optique. Ces observations permettent d'évaluer l'état de la microstructure des différents échantillons. Le microscope est relié à un ordinateur, ce qui nous permet de prendre des photos à différentes échelles.

III.1 L'analyse chimique

Nous avons utilisé l'analyseur CS 800 pour vérifier la composition chimique exigée par la norme et le cahier de charge, en ce qui concerne le soufre, le carbone ainsi que le manganèse.

L'analyse de l'acier est décrite ci-dessous.

S'assurer que les arrivées d'air comprimé et d'oxygène sont ouvertes. Elles ne doivent généralement jamais être fermées. En mettant l'interrupteur en position 2, le chauffage du tube de puissance et le refroidissement sont mis en route, la vanne qui permet le passage de l'oxygène à travers l'appareil est ouverte. Il est recommandé de laisser l'appareil se purger et se stabiliser en température quelques minutes avant de commencer une analyse .pendant des

arrêts brefs de l'analyse, laisser l'interrupteur en position 2, l'oxygène restant ainsi en balayage. Les produits chimiques corrects doivent être utilisés.

➤ **Les étapes à suivre pour déterminer le taux de carbone et du soufre dans l'acier**

Pour faire une analyse chimique du carbone et du soufre, on utilise :

- Des creusets en porcelaines
- Des pinces propres
- Une balance analytique reliée à l'appareil (analyseur CS 800)
- Deux gaz sont nécessaires pour le fonctionnement de l'appareil, qui est l'oxygène et l'air comprimé
- On utilise le tungstène (W) pour accélérer la fusion

➤ **Procédure d'analyse :**

S'assurer que les arrivées d'air comprimé et d'oxygène sont ouvertes.

- Les creusets doivent être manipulés avec une pince propre
- Tarer la balance
- Mettre le creuset sur la balance
- Peser à peu près 1.5 à 2g de tungstène (w)
- Tarer la balance
- Peser à peu près 0.3 à 0.5g de l'échantillon à analyser
- Appuyer sur la touche F4 pour enregistrer le poids
- Ouvrir le capot de la balance
- Prendre le creuset avec une pince propre, et le mettre dans le piédestal de l'appareil
- Puis appuyer sur la touche F5 pour l'envoyer au four
- Le logiciel nous affiche le taux de carbone et de soufre

III.2 Dosage du carbone et du soufre (%C, %S)

Faite par l'analyseur CS800. (Voir la procédure d'analyse ci dessus)

III.3 Dosage du manganèse (Mn)

On utilise une méthode classique pour l'acier

➤ Prise d'essai

$$m_1 (\text{éch}) = 0.2010\text{g}$$

Volume titré

$$V_{(\text{arcanite})} = 13.5\text{ml}$$

$$\% \text{Mn} = \frac{V (\text{AS}) \times 0.1 \times \text{prise de l'essai}}{0,2} \quad (20)$$

$$\% \text{Mn} = \frac{13.50 \times 0.10 \times 0.2010}{0.2} = 1.35\%$$

$$\% \text{Mn} = 1.35\%$$

IV. Etude des propriétés mécaniques de l'acier

L'ingénieur mécanicien a besoin de connaître le comportement mécanique des matériaux utilisés pour fabriquer diverses structures. Ce sont les essais mécaniques qui peuvent lui fournir ces données nécessaires. Elles sont tout d'abord indispensables pour la mise au point des procédés de mise en forme.

Par essais mécanique, on entend les différents essais tels que la résistance, la ténacité, la dureté, la traction, la résilience...etc.

IV.1 Essai de traction

Il s'agit de l'un des essais les plus pratiques et qui permet de déterminer des caractéristiques mécanique fondamentales des matériaux ; limite d'élasticité ; charge à la rupture ; allongement à la rupture.

Il consiste à appliquer à une éprouvette ; un champ de contraintes uniforme uni axiale de traction et à enregistrer les caractéristiques mécaniques

La déformation est mesurée au moyen d'un extensomètre attaché à l'éprouvette; les résultats de cet essai est la contrainte nominale:

$$\sigma = F/S \quad (21)$$

En fonction de la déformation nominale :

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \quad (22)$$

Ce qui est résumé dans une courbe de traction.

La figure N°26 ci-dessous nous montre la géométrie du type d'éprouvettes qu'on a utilisé pour cet essai et notre acier (Norme DIN50125-2009-07-A 12×60) (Voir l'annexe)

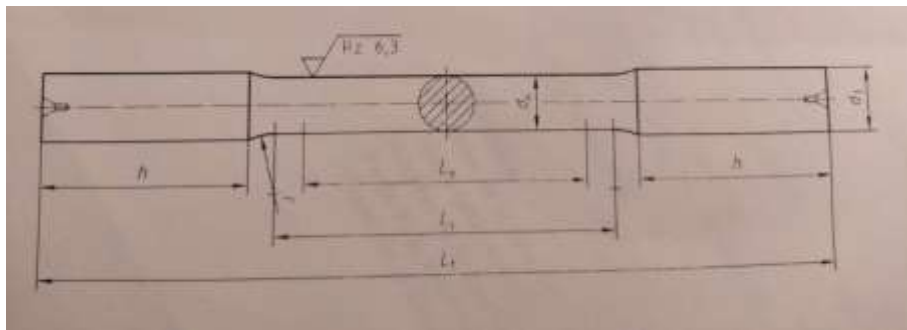


Figure N° 29: Géométrie de l'éprouvette utilisée

d_0 : diamètre de la pièce à tester (en mm).

L_0 : longueur de la jauge d'origine ($L_0 = 5d_0$) (en mm).

d_1 : diamètre des extrémités saisies ($\geq 1,2d_0$) (en mm)

L_c : longueur parallèle ($L_c \geq L_0 + d_0$) (en mm)

H : longueur des extrémités saisies (en mm)

L_r : longueur totale de l'éprouvette (en mm)

➤ **Conditions d'exécution de l'essai**

Le système de mesure des forces doit être réglé à zéro après assemblage du train de chargement des essais mais avant que l'éprouvette soit amarrée aux deux extrémités. Une fois que le zéro en force a été réglé, le système de mesure des forces ne doit pas être modifié d'aucune façon pendant l'essai.

➤ **Méthode d'amarrage**

Les éprouvettes doivent être maintenues par des moyens appropriés tels que clavettes, ancrages à vis, blocs-mâchoires parallèles, supports épaulés, etc.

Il convient que tout soit mis en œuvre pour assurer que les éprouvettes soient maintenues de façon que la traction soit appliquée aussi axialement que possible de manière à minimiser la flexion (des informations complémentaires sont disponibles dans l'ASTM E 1012[8]). Ceci est particulièrement important lors d'essais des matériaux fragiles ou lorsqu'on détermine la limite conventionnelle d'élasticité (pour une extension plastique), la limite d'extension ou la limite apparente d'élasticité.

De façon à obtenir une éprouvette droite et assurer l'alignement de l'éprouvette et du dispositif d'amarrage, une force préliminaire peut être appliquée pour autant qu'elle ne dépasse pas une valeur correspondant à 5 % de la limite apparente d'élasticité spécifiée ou escomptée.

Il convient d'effectuer une correction de l'extension pour tenir compte de l'effet de la force préliminaire.

La méthode A est destinée à minimiser la variation des vitesses d'essai au moment où les paramètres sensibles à la vitesse de déformation sont déterminés et à minimiser l'incertitude de mesure des résultats d'essai.

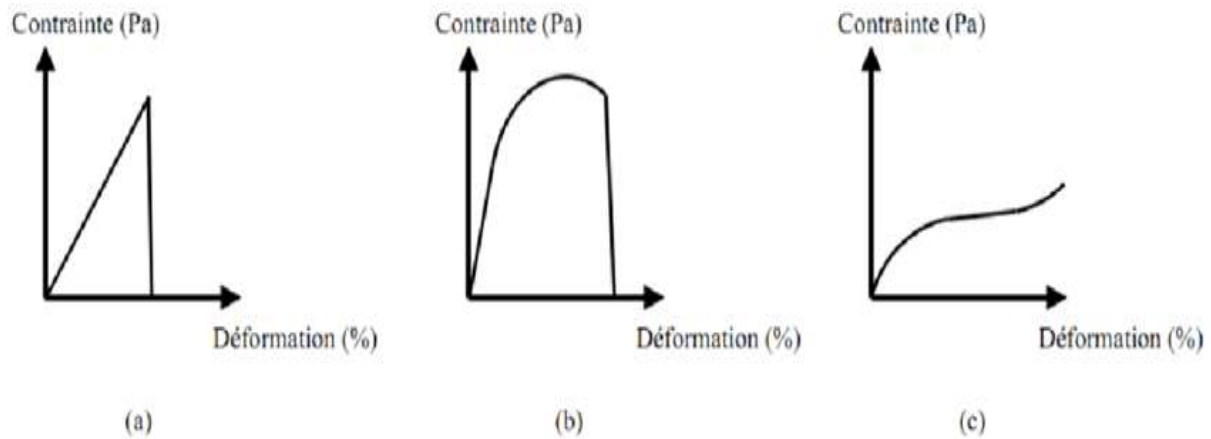


Figure N° 30: Allure des courbes de traction (a) fragile (b) ductile (c) élastique non linéaire.

➤ Interprétation de la courbe de traction

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

Pour un matériau fragile, c'est la contrainte à laquelle le matériau se rompt, notamment du fait de ses microfissures internes. Le critère de Griffith permet alors d'estimer cette contrainte-seuil.

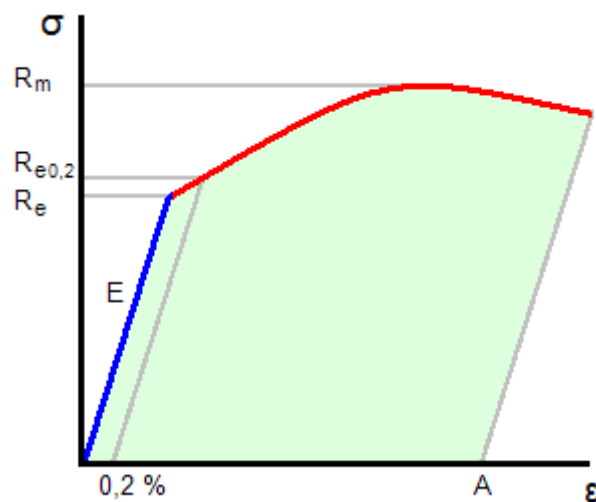


Figure N° 31: Courbe de contrainte-déformation.

Pour un matériau ductile, c'est la zone en rouge sur le graphique ci-contre, au-delà du domaine élastique E représenté en bleu dans lequel l'augmentation de la contrainte donne une déformation réversible à la suppression de cette contrainte (et souvent assez linéaire en fonction de cette contrainte).

Les déformations subies au-delà de la limite d'élasticité restent permanentes, ceux sont des déformations plastiques. Elles se mesurent ou se vérifient habituellement à l'aide d'un essai de traction.

Dans les matériaux ductiles le coefficient de striction est donné par la relation suivante :

$$Z(\%) = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100 \quad (\%) \quad (23)$$

Avec :

S_0 : section initiale de l'éprouvette (en mm^2)

S_f : section finale de la surface à la rupture (en mm^2)

On peut aussi tirer de la courbe de traction, les informations suivantes :

Le module de Young E :

La pente de la partie linéaire de la courbe de traction correspond au module de Young E avec

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (24)$$

➤ Limite d'élasticité

La vitesse de déformation, e_t doit être maintenue aussi constante que possible jusqu'à ce qu'on puisse déterminer les caractéristiques suivantes (R_{eh} , R_p ou R_t^e).

Durant la détermination de ces caractéristiques du matériau, la vitesse de déformation, e_{te} , doit être comprise dans l'un des intervalles spécifiés suivants.

Intervalle 1: $e_{te} = 0,000\ 07\ \text{s}^{-1}$, avec une tolérance relative de $\pm 20\ \%$

- t_{el} temps, dans le domaine élastique, pour la détermination des paramètres énumérés (S)
- t_f temps, généralement jusqu'à la rupture, pour la détermination des paramètres énumérés (S)
- t_{pl} temps, dans le domaine plastique, pour la détermination des paramètres énumérés (S)
- 1 intervalle 1: $\dot{\epsilon} = 0,000\ 07\ s^{-1}$, avec une tolérance relative de $\pm 20\ %$
 - 2 intervalle 2: $\dot{\epsilon} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, avec une tolérance relative de $\pm 20\ %$
 - 3 intervalle 3: $\dot{\epsilon} = 0,002\ s^{-1}$, avec une tolérance relative de $\pm 20\ %$
 - 4 intervalle 4: $\dot{\epsilon} = 0,006\ 7\ s^{-1}$, avec une tolérance relative de $\pm 20\ %$ ($0,4\ min^{-1}$, avec une tolérance relative de $\pm 20\ %$)

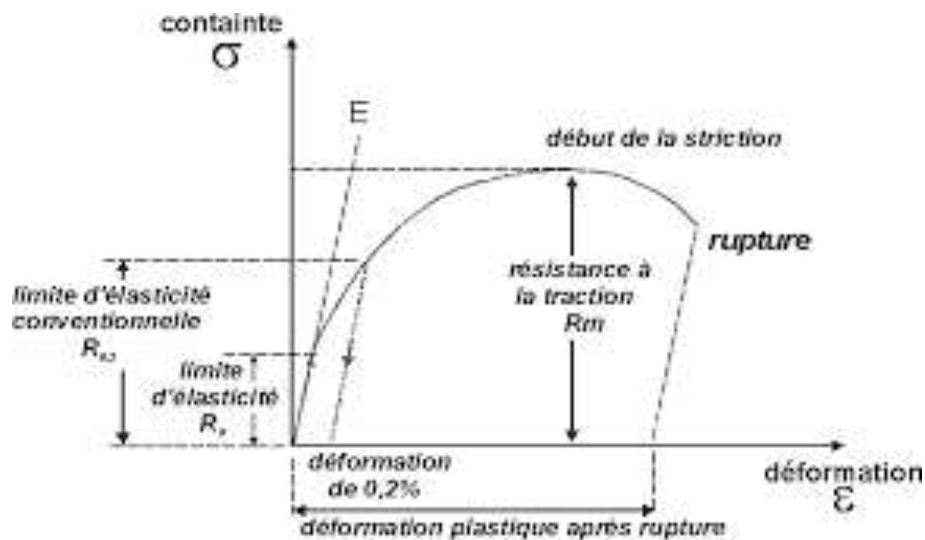


Figure N° 33: Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2%

➤ **Résistance à la traction**

Elle est calculée comme le rapport de l'effort maximal de traction F_m à la section initiale S_0 de l'éprouvette.

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (25)$$

➤ **Allongement après rupture**

L'allongement après rupture représente la différence de longueur L de l'éprouvette reconstituée après rupture et la longueur initiale L_0 rapportée à la longueur initiale.

$$A = \frac{L_F - L_0}{L_0} \times 100 \quad (26)$$

➤ **Préparation des éprouvettes de l'essai de traction**

L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un échantillon prélevé dans le produit ou d'un flan embouti ou d'une pièce moulée. Cependant, les produits de section transversale constante (profilés, barres, fils, etc.) ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (c'est-à-dire pour les fontes et les alliages non ferreux) peuvent être soumis à essai sans être usinés.

La section transversale des éprouvettes peut être circulaire, carrée, rectangulaire, annulaire, ou dans des cas particuliers, une autre section transversale uniforme.

Les éprouvettes à utiliser de préférence présentent une relation directe entre la longueur initiale entre repères.

La relation entre L_0 et l'aire initiale de la section transversale, S_0 , est illustrée par l'équation :

$$L_0 = \sqrt{k S_0} \quad (27)$$

Où k est un coefficient de proportionnalité; elles sont dénommées éprouvettes proportionnelles. La valeur k adoptée sur le plan international est 5,65. La longueur initiale entre repères ne doit pas être inférieure à 15 mm. Lorsque l'aire de la section transversale de l'éprouvette est trop faible pour que cette condition soit remplie avec la valeur 5,65 du coefficient k , on peut utiliser soit une valeur de k supérieure (de préférence 11,3), soit une éprouvette non proportionnelle.

Dans le cas des éprouvettes non proportionnelles, la longueur initiale entre repères, L_0 , est prise indépendamment de l'aire initiale de la section transversale, S_0

Les éprouvettes doivent être prélevées et préparées conformément aux exigences des Normes internationales applicables relatives aux différents matériaux (par exemple ISO 377).

IV.2 Essai de dureté

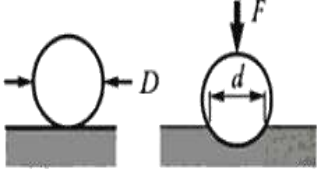

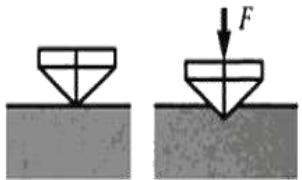
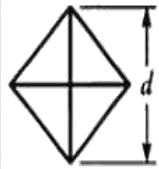

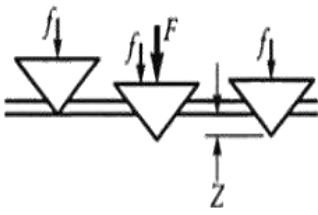
La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière met en jeu une série de facteurs dont les principaux sont : les déformations élastiques et plastiques, le frottement entre le pénétrateur et le matériau, la géométrie du pénétrateur, ses propriétés mécanique et la charge qui est appliquée.

Le tableau qui suit résume les caractéristiques des principales méthodes de mesure des duretés utilisés : la dureté Brinell (HB), la dureté Vickers (HV), la dureté Rockwell C et Rockwell B (HRC et HRB)

Pour cet essai, nous avons choisi l'essai Vickers (HRA) ayant pour paramètre d'essai :

Le pénétrateur à bill (HRC) forme pyramide a base carrée, la charge d'essai étant 100kgf, le temps de maintien est de 10 à 15secondes, les échantillons utilisés pour cette essai ont été pris sous une forme cylindrique diamètre 32 mm.

Tableau N° 2 : Caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	500 ou 3000 kgf		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136° 	5 à 100 kgf (microdureté: 5 à 1000 gf)		Diagonale de l'empreinte (d) 	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant d'angle au sommet de 120° 	Précharge f de 10 kgf; $F = 150$ kgf		Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRC = f(Z)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge f de 10 kgf; $F = 100$ kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRB = f(Z)$

Chapitre III

Résultats et interprétations

III .1. Introduction

L'acier S355J2 est un acier faiblement allié au manganèse (1,35%) à haut rendement. Il est appelé S355 en raison du rendement minimum moyen de ce matériau est de 355 MPa. En tant qu'acier de construction, il a une excellente résistance et soudabilité. Il peut être facilement soudé à d'autres aciers soudables. Pour son équivalent bas carbone, il possède de bonnes propriétés de formage à froid. Le S355J2 est généralement fourni dans un état normalisé. Dans ce chapitre nous allons d'abord présenter l'acier que nous avons étudié et sa composition chimique.

III.2 Acier étudié

Le S355J2 est une nuance d'acier de construction à faible teneur en carbone souvent utilisée pour des applications qui nécessitent de meilleures propriétés mécaniques que celles des nuances S275 et S235. Il est largement utilisé dans les industries de l'ingénierie et de la construction.

La composition chimique de l'acier rond laminé à chaud exigé par la norme EN10025 – édition janvier 2005 que nous allons étudier est présentée ci-dessous :

Tableau N° 3: Les Résultats de l'analyse de la composition chimique de notre acier

Analyse chimique	%	C	Mn	Si	P	S*	Cu	Al	Ca*	Nb	V	Ti
sur produit (nuance S355J2) selon la Norme	Mini	-	-	-	-	-	-	0.013	0.0020	-	-	-
	Maxi	0.23	1.7	0.60	0.035	0.035	0.060	0.015	-	0.06	0.15	0.06
Acier étudié		0.20	1.35	-	0.019	-	-	-	-	-	-	-

D'après ses résultats, nous constatons que la composition chimique qu'on a réalisée est très proche de celle exigée par la norme (la différence est égale à 0,03) .Cette teneur en carbone est très importante pour le comportement mécanique voulu citer ci-dessus.

Pour la teneur en manganèse de notre acier (%Mn =1.35%) est plus faible que celle exigée par la norme qui est de 1,7%, il y a un manque de 0,35%.On doit faire les essais mécaniques pour vérifier s'il n y a pas d'influence.

La teneur en Phosphore de notre acier qui est de 0.019% et aussi faible par rapport à celle exigée par la norme qui est 0.035% (la différence est égale à 0,016).

III.3 Interpretation des resultats des observations métallographique au Microscope Optique

III.3.1 Micrographies de notre acier sans attaques

A-1

La micrographie sans attaque obtenue par microscopie optique (M.O) de la Figure N°28 ci-dessous montre l'état de surface de notre acier , elle met en evidence une présence de la porosité et des oxydes qui peuvent fragiliser le matériau.

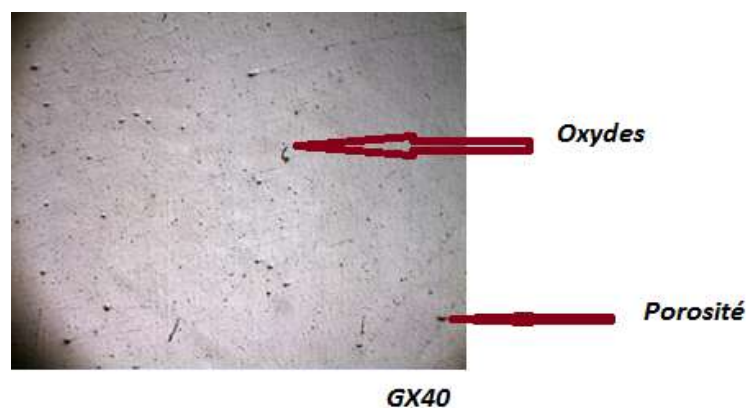


Figure N° 34: Micrographie de notre acier laminé à chaud sans attaque.

A-2

L'agrandissement de la figure N°28 ci-dessus, nous a permis de confirmer la présence des oxydes et de la porosité qui peuvent être des sièges de la rupture brutale surtout pour les pièces de sécurité.

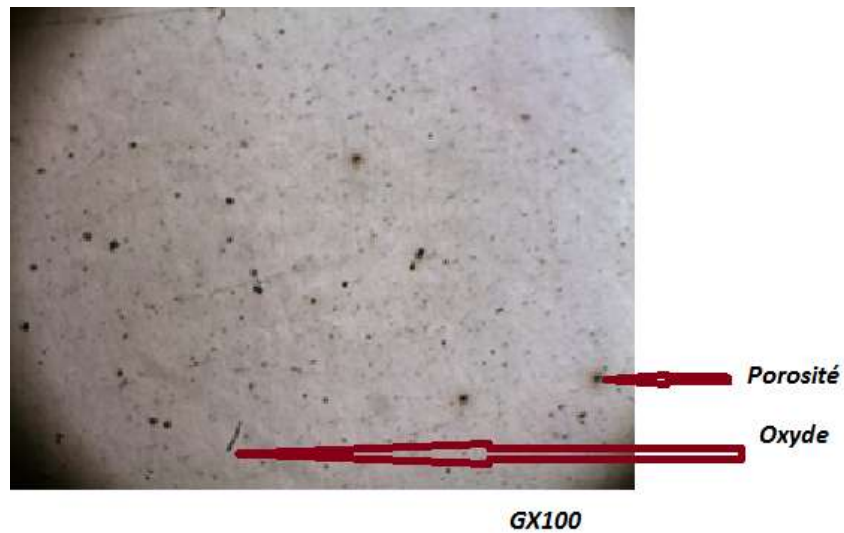


Figure N° 35: Micrographie de notre acier laminé à chaud sans attaque.

A-3

Le grossissement (GX200) de la figure N°30, nous permet d'identifier la présence des oxydes et de la porosité.

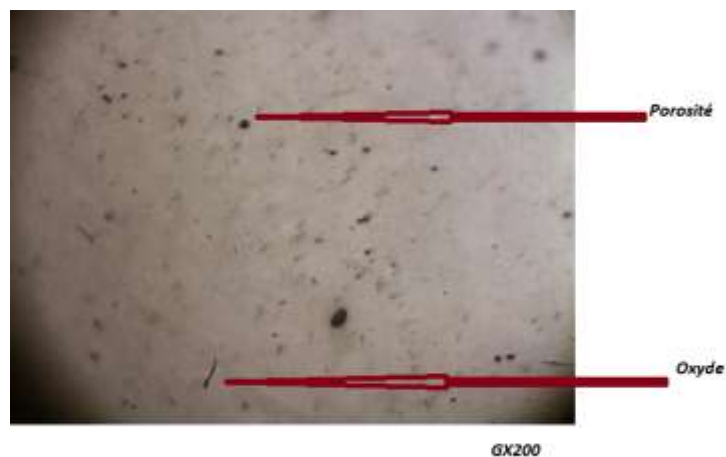


Figure N° 36: Micrographie de notre acier laminé à chaud sans attaque.

A-4

La figure N°31 suivante confirme la présence des microfissures (des criques) ; de la porosité et des retassures (Oxydes).

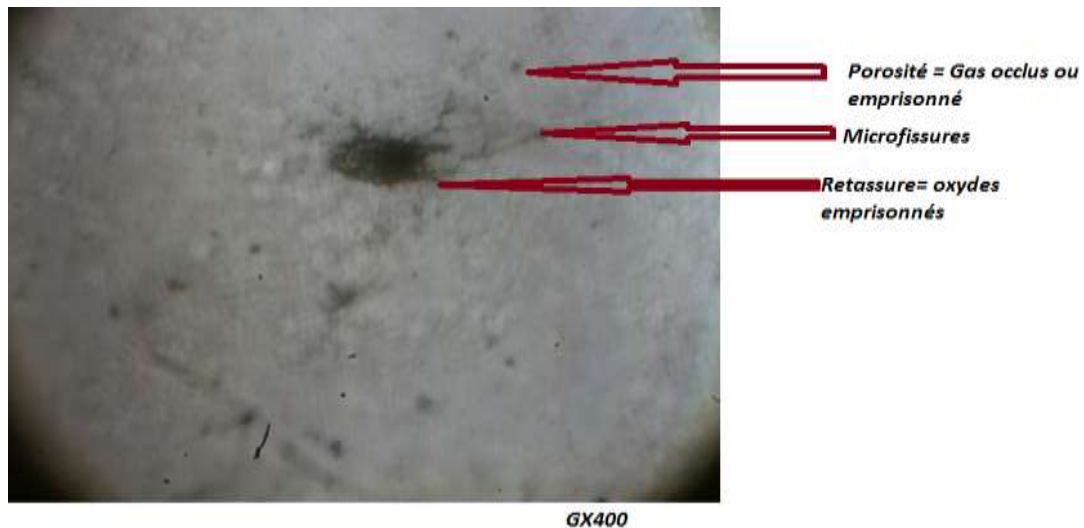


Figure N° 37 : Micrographie de notre acier laminé à chaud sans attaque.

III.3.2 Micrographies de notre acier avec attaque au Nital

B-1

La micrographie obtenue par microscopie optique (M.O) de la Figure N°32 ci-dessous montre une structure fine homogène recristallisée à cause de la Température du laminage à chaud subi par notre acier qui est comprise entre 800 °C et 1200°C(le même effet qu'un traitement thermique de recuit).

.Elle ressemble à une structure dendritique sur tous l' échantillon.On remarque aussi la présence de la perlite, de la ferrite qui sont fines.La quantité de perlite est plus importante que celle de la ferrite à cause de la présence du manganèse qui est gammagène. On constate aussi la présence des carbures de manganèse parce qu'on a un acier faiblement allié au manganése(1,35%Mn).

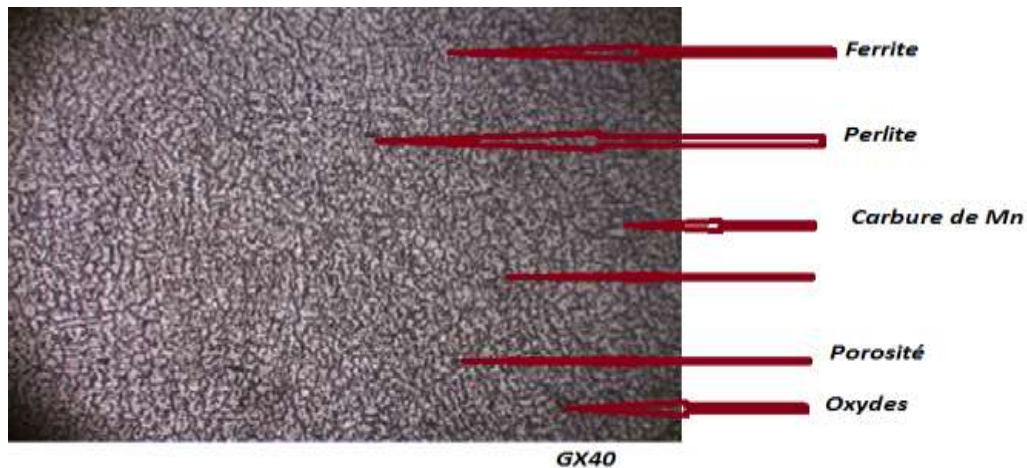


Figure N° 38: Micrographie optique de notre acier rond laminé à chaud attaqué au Nital.

B-2

L'agrandissement de la figure ci-dessus présente la présence de la perlite et de la ferrite, ainsi que la présence des carbures de Mn et de Si, de la porosité et des oxydes aussi.

Ces carbures marquent les joints de grains.

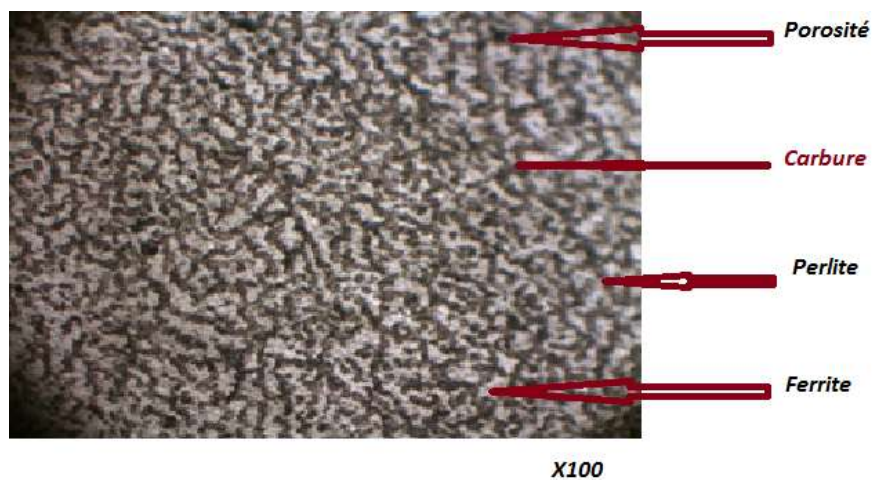


Figure N° 39: Micrographie optique de notre acier rond laminé à chaud attaqué au Nital.

B-3

L'agrandissement de la figure ci-dessus montre de la perlite et de la ferrite, ainsi que la présence des carbures de Mn et de Si, de la porosité et des oxydes aussi. Ces carbures se sont précipités sur les joints de grains en les marquant et dans les grains.

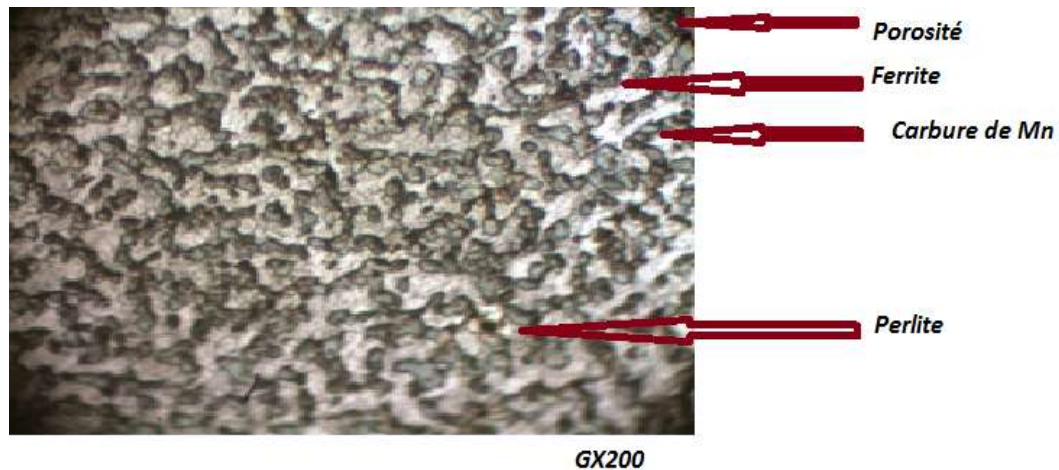


Figure N° 40: Micrographie optique de notre acier rond laminé à chaud attaqué au Nital.

B-4

L'agrandissement de la figure ci-dessus confirme la présence de perlite et de la ferrite, ainsi que la présence du carbure de Mn et de Si, de la porosité et des oxydes aussi. Ces carbures marquent les joints de grains et les grains.

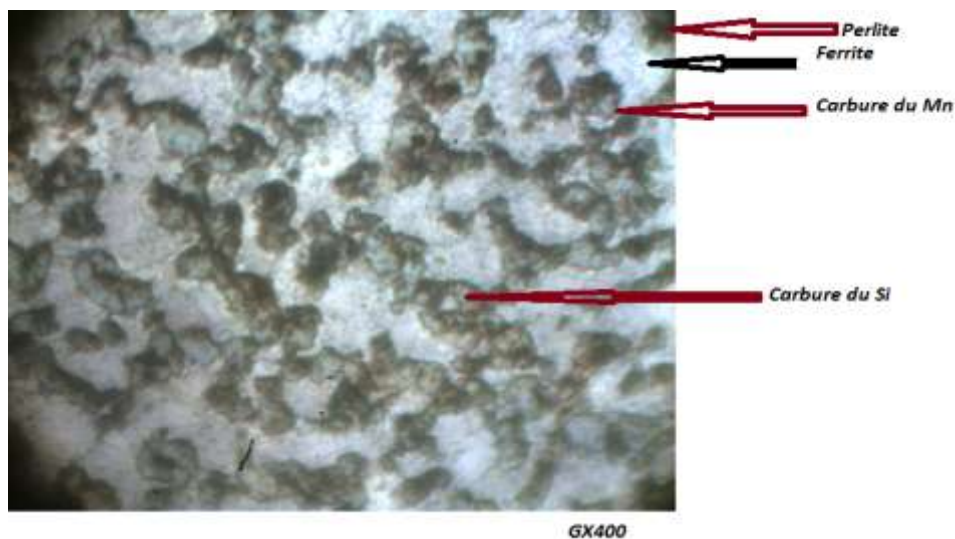


Figure N° 41: Micrographie optique de notre acier rond laminé à chaud attaqué au Nital.

V. Essai de traction

Cet essai a été fait dans les conditions suivantes selon la norme (ISO06892-1) :

$$T_a = 25 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad V = 1.05 \text{ mm/minutes} = 0.00025 \times L_c$$

$$L_c = 70 \text{ (mm)} \quad L_0 = 50 \text{ (mm)}$$

T_a ($^\circ\text{C}$) : température ambiante V : vitesse d'écartement des mâchoires

L_c : longueur calibrée L_0 : la longueur initiale

Dans le tableau N°04 suivant, on a regroupé les résultats de l'essai de traction qu'on a obtenu lors de nos essais et celle exigée par la norme.

Tableau N° 4 : Les résultats de l'essai de traction obtenus sur notre acier laminé à chaud (S355J2)

échantillons	\varnothing_0 (mm)	F_{ch} (N)	F_m (N)	As (%)	R_{eh} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)
Selon la norme	-	-	-	31.33	345	Entre (470-630)
ECH01	9.71/9.66/9.70	29270	39100	32.0	396.902	530.198
ECH02	9.6/9.63/9.78	29590	38360	23 (rupture à la limite de L_0)	403.112	522.587
ECH03	9.69/9.69/9.72	29680	38720	33	401.836	524.228

Nous remarquons que les résultats obtenus des différents échantillons sur lesquels on a réalisé des essais, les valeurs de l'essai de traction sont comprises dans l'intervalle exigé par la norme.

Les courbes ci-dessous représentent les courbes de traction

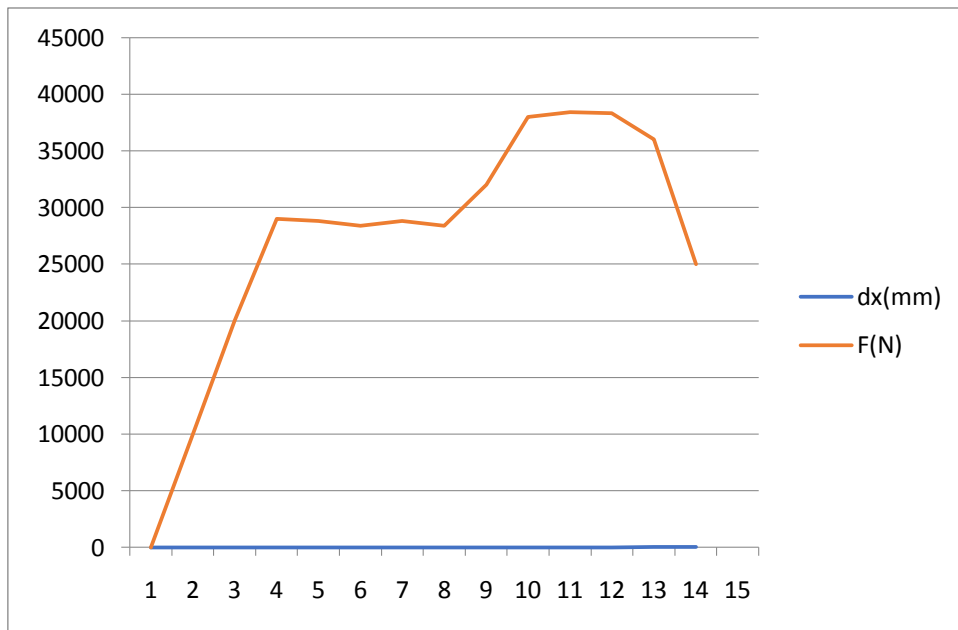


Figure N° 42: Courbe de traction de l'éprouvette N°01

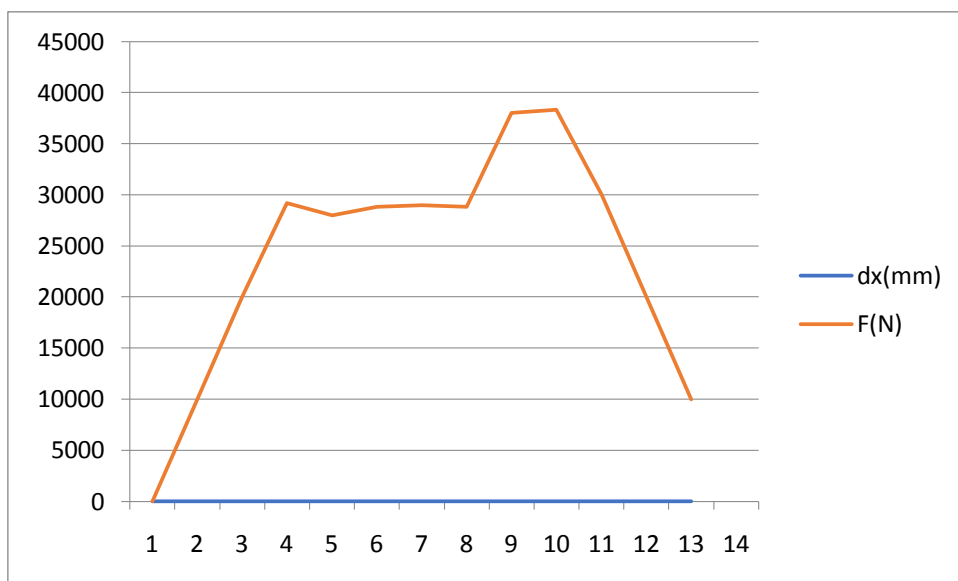


Figure N° 43: Courbe de traction de l'éprouvette N°02

D'après les courbes ci-dessus on voit que ces dernières sont composées de (4) zones :

- la zone élastique jusqu'à F_{eh} dite limite d'écoulement supérieure.
- palier d'écoulement.
- zone plastique.
- zone de restriction.

Ces courbes montrent que notre acier a un comportement d'un acier doux (présence de ces 04 zones) c'est dû à l'état normalisé et l'effet du laminage à chaud de notre acier.

VI. La dureté

Le Tableau N°05 regroupe les résultats des essais de dureté (HRA) qu'on a réalisé sur des échantillons de notre acier rond laminé à chaud.

Tableau N° 5 : Résultats de dureté réalisés sur des échantillons de notre acier rond laminé à chaud (S355J2)

N°DE L'ECHANTILLON	D (Diamètre en mm) selon la Norme	Dureté (HRA) aux milieux	Dureté (HRA) aux extrémités
ECH1	32	31.1	33.8
ECH2	32	31.2	30.05
ECH3	32	31.2	29
Selon la Norme	32	23	-

Les résultats des essais de dureté montre que celle-ci sont comprise entre 31 HRA et 33HRA alors que celle exigé par la norme c'est 23HRA, cela peut être due a la persistance de la forme lamellaire produit par le laminage a chaud (la température et le temps choisie n'ont pas était suffisant pour l'éliminer).La présence des carbures surtout sur les joints de grains. Le taux de manganèse, élément gamagène un peu plus faible que celui exigé par la norme.

Il s'est précipité dans la matrice de la ferrite et il a permis aussi la formation des carbures

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est la caractérisation physico-chimique et mécanique de l'acier rond laminé à chaud (S355J2) utilisé à l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES AZAZGA.

Pour ce travail, nous avons utilisé des techniques expérimentales telles que l'analyse chimique, la microscopie optique, et des essais mécaniques tel que : l'essai de traction, la résilience et la dureté.

Les principaux résultats de notre étude peuvent se résumer comme suite :

- La composition chimique qu'on a réalisée, nous a permis de vérifier si celle de notre acier est conforme à celle exigée par la norme et le cahier de charge car elle est intimement liée aux comportements ultérieurs de notre acier. Celle du carbone est très proche de celle exigée par la norme (la différence est égale à 0,03). Cette teneur en carbone est très importante pour le comportement mécanique voulu. Pour la teneur en manganèse de notre acier (%Mn = 1,35%) est plus faible que celle exigée par la norme qui est de 1,7%, il y a un manque de 0,35%. On doit faire les essais mécaniques pour vérifier s'il n'y a pas d'influence. La teneur en Phosphore de notre acier qui est de 0,019% et aussi faible par rapport à celle exigée par la norme qui est 0,035% (la différence est égale à 0,016).

- Les microstructures observées sur les échantillons avant et après attaque par le Nital montre la répartition des phases existantes dans cet acier et ont mis en évidence de nombreuses anomalies (la porosité, les oxydes, des microfissures). La présence de la perlite, de la ferrite et des carbures de manganèse et du silicium surtout sur les joints de grains.

- Les courbes obtenues lors de l'essai de traction effectué ont décrit un comportement élasto-plastique car les courbes ont tous les domaines correspondant.

- Nous avons remarqué que les duretés mesurées sont très proches de celles exigées par la norme donc la composition chimique qu'on a obtenue n'a pas influencé sur sa dureté.

Perspectives

À défaut du temps qui nous a été alloué, on n'a pas le temps de faire d'autres essais qui peuvent être faits par d'autre promotion, ainsi que des traitements thermiques même des élaborations de cet acier.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] (<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Acier.html>)
- [2] (<https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/matiere-fabrication-acier-835/>)
- [3] (<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Acier-page-2.html>)
- [4] (<http://iut.univ-lemans.fr/gmp/cours/rebiere/proprietesmecaniques.html>)
- [5] Kenza.Mokrani : étude numérique de la déformation des plaques en acier sous impactes à grande vitesses, univercité Abdelhamid ibn badis Mostaganem, 2020/2021
- [6] Kenza.Mokrani : étude numérique de la déformation des plaques en acier sous impactes à grande vitesses, université Abdelhamid ibn badis Mostaganem, 2020/2021
- [7] (<https://conceptec.net/fr/techniques-de-base/materiaux/traitements-des-materiaux/le-diagramme-ttt-temps-temperature-transformation>)
- [8] (<https://conceptec.net/fr/techniques-de-base/materiaux/traitements-des-materiaux/le-diagramme-trc>)
- [9] (<://huon.fr/tole-de-fabrication-a-lutilisation/>)
- [10] (<http://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr/qu-est-ce-que-la-corrosion-a4339.html>)

Annexes