

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie- Mécanique



Mémoire de Fin d'étude

Présentée pour obtenir le titre de

Master Académique

Spécialité : Génie Des Matériaux

THEME

**ETUDE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUES MICROGRAPHIQUES
ET DES PROPRIETES MECANIQUES DE LA SURFACE AU CŒUR D'UN
ARBRE EN ACIER S355J2+N DONT LE DIAMETRE EST
 $\varnothing = 105\text{mm}$ UTILISE A E.I.AZAZGA**

Présenté par : **Mr. BENALIA Kamal**

Proposé par : **E.I.AZAZGA**

Dirigée par : **Mme. MOHELLEBI Fadila (UMMTO)**

Co- Dirigée par : **Mme. BAGUENANE Ghalia(UMMTO)**

Co-Encadrée par : **Mme. YOUNSI Naouel(E.I.AZAZGA)**

Promotion : 2021/2022

Résumé

On a effectué un travail de contrôle qualité au sein de l'entreprise electro-industries d'AZAZGA.

Afin de vérifier est ce que le fournisseur a respecté le cahier des charges et la Norme exigée par l'entreprise.

Notre travail a était de la caractérisation de l'acier S355J2+N chimiquement par l'analyse chimique et mécaniquement par des différents essais exigé par la Norme et le cahier des charges tels que : l'essai de traction ; de résilience ; de dureté ; et de Micro-dureté et la microstructure par microscopie optique à défaut du Microscope électronique a balayage (MEB).

Sommaire

Résumé	
Remerciements	
Dédicaces	
Liste des Figures	5
Liste des Tableaux	7
I. Etude Théorique	12
I.1 Introduction	12
I.1.1 Présentation de l'entreprise	13
I.2 Généralités sur les aciers [1]	18
I.2.1 Les aciers à traitement de surface	19
I.2.2 Aciers de cémentation	19
I.2.3 Aciers à Nitruration	19
I.2.4 Aciers pour trempes superficielles	20
I.2.5 Aciers à outils alliés	20
I.2.6 Aciers rapides	23
I.2.7 Aciers de construction alliés sans traitement	23
I.2.8 Aciers de construction alliés avec traitement	24
I.2.9 Aciers de décolletage	25
I.3 Diagramme d'équilibre binaire Fer-Carbone	25
I.4 Elément d'alliage dans les aciers [2]	28
I.5 Les aciers alliés [6]	32
I.5.1 Insuffisances des aciers au carbone	32
I.5.2 Eléments gammagène	33
I.5.3 Eléments Alphagène	34
I.5.4 Eléments carburigène	35
I.5.5 Influence des éléments d'alliages sur l'acier	36
I.5.6 Influence des éléments d'alliages sur les carbures	37
I.5.7 Influence des éléments d'alliages sur l'austénisation	37
I.5.8 Composition chimique de l'austénite	38
I.5.9 Composition chimique de notre acier à la livraison selon la norme (Annexe 1)	39
I.5.10 Comportement mécanique de notre acier selon la Norme	40
I.5.11 Les principes de désignation des aciers selon la norme EN 10027-1-2	42
II. Partie Pratique	50
II.1 Matières premières :	50

II.2	Techniques utilisées.....	51
II.2.1	Appareillages :.....	51
II.2.2	Essais de Traction.....	58
II.2.3	Norme sur l'essai.....	59
II.2.4	Principe d'un essai de Traction [8].....	59
II.2.5	Caractéristiques de Traction.....	60
II.2.6	Les étapes de préparation de l'essai Charpy : [2].....	70
II.2.7	Principe de l'essai de la dureté Vickers.....	74
II.2.8	Calcul de la dureté Vickers : [2].....	74
II.2.9	Mesure de la diagonale « d » de l'empreinte.....	74
II.2.10	Mode opératoire.....	75
II.2.11	Partie pratique essai Vickers.....	76
II.3	Essais de dureté sous charge réduite « Micro-dureté » [2].....	76
II.3.1	Principes.....	76
II.3.2	Choix de la force.....	77
II.3.3	Conditions d'essai Vickers.....	78
II.3.4	Principe du duromètre FRANK modèle 38500.....	78
II.3.5	Travail expérimental :.....	79
II.3.6	Normes d'essai de microdureté.....	80
II.3.7	Microduromètre Hanemann.....	80
II.3.8	Microscéléromètre Girschig.....	81
II.3.9	Signification de la microdureté.....	81
II.3.10	Résultats de l'analyse chimique de notre Acier S355J2+N.....	84
II.4	Résultats des observations Microstructurales.....	85
II.4.1	Observation au microscope optique (MO).....	85
II.4.2	Interprétation des résultats comparatifs de l'essai de résilience.....	114
II.4.3	Les résultats et interprétations de la Micro-dureté.....	116
III.	Conclusion Générale.....	118
III.1	Perspectives.....	119
	Références	
	Annexes	

Remerciements

Je remercie l'entreprise Electro-industrie d'AZAZGA et particulièrement ma Co-Promotrice Madame N. YOUNSI et aussi Monsieur Mohand-Ouamar BENACER, Madame L. GUEMOURI et Messieurs BELABBAS Ferhat et Khelaf. Et, tout le personnel qui m'a aidé de près ou de loin pour le bon déroulement du stage de fin d'études.

Je veux exprimer mes sincères remerciements à l'ensemble des personnes qui m'ont aidé à la réalisation des différents essais nécessaires à la préparation de mon mémoire (Annexe 4) ; parmi eux Monsieur BOUSSADIA Younes ; Les responsables et les ingénieurs des Laboratoires qui m'ont accueilli en leur sein.

Je remercie d'abord les directeurs Monsieur ZOUYED (SNVI), Monsieur BOUALI Yahia (ENIEM) et Monsieur BELKACEMI Djamel (E.I AZAZGA) pour m'avoir accueilli dans leurs entreprises.

Je tiens à remercier très sincèrement ma promotrice Madame F. MOHELLEBI et ma Co-Promotrice G.BAGUENANE de m'avoir encadré pour la réalisation de mon mémoire de fin d'étude en Master Académique en filière Génie-Mécanique, option Génie des Matériaux, pour toutes les contributions intellectuelles, leurs conseils scientifiques, leurs aides dans les expérimentations et particulièrement pour leurs aides dans toute la rédaction, ce qui a dû parfois leur causer quelques maux de tête.

Je remercie également les membres du jury de s'être intéressés à mes études en acceptant de faire partie du jury de soutenance de mon mémoire de fin d'étude.

Je n'oublie pas de remercier également Mesdames les Secrétaires, pour leur gentillesse, très chaleureuse, leur disponibilité et leur efficacité très appréciée dans toutes les missions.

Je voudrais remercier aussi tous mes amis aussi tous ceux qui ne sont pas cités.

Finalement, je remercie Notre chef de département qui nous a facilité l'accès à tout.

Merci à toutes et à tous.

Résumé

On a effectué un travail de contrôle qualité au sein de l'entreprise électro-Industries d'AZAZGA. Afin de vérifier est-ce que le fournisseur à respecter le cahier de charges et la Norme exigée par l'entreprise (la conformité).

Le but de notre travail est la caractérisation de l'acier S355J2+N chimiquement par l'analyse chimique et mécaniquement par différents essais exigés par la Norme et le cahier des charges tels que : l'essai de traction ; de résilience ; de dureté ; de microdureté et la microscopie optique à défaut du microscope électronique à balayage (MEB).

Liste des Figures

Figure 1: Infrastructure de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES.	13
Figure 2: Organigramme de la société par ACTION ELECTRO-INDUSTRIES.	15
Figure 3: Diagramme d'équilibre Fe-Fe ₃ C.....	27
Figure 4: Zoom sur la partie acier du diagramme d'équilibre Fer-Carbone	28
Figure 5: Diagramme d'équilibre de l'alliage Fe-Cr.....	29
Figure 6: Diagramme d'équilibre des alliages Fe-Ni.....	30
Figure 7: Exemple de modification du domaine de stabilité de l'austénite par éléments d'alliage.....	30
Figure 8: Influence des éléments d'alliage sur la température de l'eutectoïde dans chaque système Fer-Carbone-élément d'alliage.....	31
Figure 9: Influence des éléments d'alliage sur la teneur en carbone de l'eutectoïde dans chaque système Fer-Carbone-élément d'alliage.....	32
Figure 10: Diagramme d'équilibre Fe-Ni.....	34
Figure 11: Diagramme d'équilibre Fe-Si.....	34
Figure 12: Système Fe-C-Cr à 20°C.....	35
Figure 13 : Durcissement de la ferrite par éléments d'alliage.....	36
Figure 14: Durcissement de la ferrite α par le Mn et le Cr en présence de 0,1%C.....	36
Figure 15: Influence du Mn sur les caractéristiques mécaniques d'un acier perlitique à 0,55% de carbure recuit ou normalisé.....	37
Figure 16: Système Fe-C-Mn	37
Figure 17: Système Fe-C-Cr.....	38
Figure 18: Variation de la température eutectoïde en fonction des éléments d'alliage. [5].....	38
Figure 19: Variation de la composition eutectoïde en fonction des éléments d'alliage.[6].....	39
Figure 20: Epruvettes sciées en trois fois pour les essais mécaniques ; b. pièce extraite d'un rond plein pour épruvettes de résilience.	50
Figure 21: Vue générale du tour automatique	51
Figure 22: Tour lors de la réalisation d'une épruvette pour l'essai de Traction.....	51
Figure 23: Polisseuse à deux vitesses de rotation du plateau : 75(tr/s) et 150(tr/s).....	52
Figure 24: Polisseuse à deux vitesses de rotation du plateau : 150(tr/s) et 300(tr/s).....	52
Figure 25: Produit d'attaque chimique « le Nital ».....	53
Figure 26: Microscope Optique utilisé.....	54
Figure 27: Machine de Traction SHIMADZ utilisée.	55
Figure 28: Détermination graphique de Re 0,2	56
Figure 29: Courbes de traction de divers matériaux.	57
Figure 30: Les neufs (09) épruvette de l'essai de Traction. (Annexe 10 et 13)	58
Figure 31: Localisation de zones étudiées surface, milieu et cœur.....	58
Figure 32: Diagramme conventionnelle de Traction.	60
Figure 33: Evolution de l'allongement et la striction de l'épruvette en Traction.....	60
Figure 34: Diagramme de mise en évidence de la difficulté du calcul E.....	62
Figure 35: La courbe rationnelle.	64
Figure 36: Dimensions des épruvettes de Tractions normalisées.	65
Figure 37: a1, a2) début de l'essai de traction ; b) début d'écroûissage ; c) la section de striction diminue ; d) Rupture ; e) épruvettes après rupture.....	66
Figure 38: Machine ROBOFIL 200 CHARMILLES Technologie.	67
Figure 39: Le Mouton Charpy ZWICK 5101.....	68
Figure 40: Le calibrage de l'épruvette sur le porte échantillon pour que l'impact	70

Figure 41: Les étapes de l'essai : étalonnage de l'appareil, et placer le pendule charger à 50 (J) puis placer les éprouvettes qui sont à -20°C sortie du congélateur sur les portes échantillons.....	70
Figure 42: Le mouton de Charpy (Mouton-Pendule).....	71
Figure 43: Norme de l'éprouvette soit en U ou Kcu ou en V pour le Kcv. [6].....	71
Figure 44: Le point d'application du choc sur l'éprouvette en la réglant avec l'outil de la figure ci-dessus.....	72
Figure 45: Bloc de l'arbre à partir du quel on a prélevé les éprouvettes de résilience (cœur, milieu, surface). .	72
Figure 46: Les dimensions normalisées des éprouvettes de résilience	72
Figure 47: Congélateur Aux Températures Négatives utilisé.....	73
Figure 48: Le Thermocouple a température négatives et positives	73
Figure 49: Schéma du duromètre	75
Figure 50: Microduromètre SHIMADZ utilisé.....	82
Figure 51: Spectromètre d'émission par étincelage (SPECTROMAX)	82
Figure 52: Micrographie optique du cœur de l'arbre de l'acier S355J2+N	86
Figure 53: Micrographie optique du milieu de l'arbre de l'acier S355J2+N	86
Figure 54: Micrographie optique de la surface de l'arbre de l'acier S355J2+N	87
Figure 55: Micrographie optique du milieu de l'arbre de l'acier S355J2+N	87
Figure 56: Micrographie optique du cœur de l'arbre de l'acier S355J2+N.....	88
Figure 57: Micrographie optique de la surface de l'arbre de l'acier S355J2+N	88
Figure 58: Micrographie optique du cœur de l'arbre de l'acier S355J2+N.....	89
Figure 59: Micrographie optique du milieu de l'arbre de l'acier S355J2+N	89
Figure 60: Micrographie optique de la surface de l'arbre de l'acier S355J2+N	90
Figure 61: Micrographie optique du milieu de l'arbre de l'acier S355J2+N	90
Figure 62: Micrographie optique du cœur de l'arbre de l'acier S355J2+N.....	91
Figure 63: Micrographie optique de la surface de l'arbre de l'acier S355J2+N	91
Figure 64: Courbe conventionnelle du milieu M3	93
Figure 65: Courbe conventionnelle du milieu M2	93
Figure 66: Courbe conventionnelle du milieu M1	94
Figure 67: Courbe conventionnelle du milieu C3.....	94
Figure 68: Courbe conventionnelle du milieu C2.....	95
Figure 69: Courbe conventionnelle du milieu C1.....	95
Figure 70: Courbe conventionnelle du milieu S3.....	96
Figure 71: Courbe conventionnelle du milieu S2.....	96
Figure 72: Courbe conventionnelle du milieu S1.....	97
Figure 73: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C3	102
Figure 74: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C2	103
Figure 75: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C1	105
Figure 76: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M3.....	106
Figure 77: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M2.....	107
Figure 78: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M1.....	108
Figure 79: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S3	110
Figure 80: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S2	111
Figure 81: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S1	113

Liste des Tableaux

Tableau 1: Présentation Administrative de l'entreprise.....	13
Tableau 2: La Composition Chimique exigée par la Norme de notre acier S355J+N.(Annexe 1) :.....	39
Tableau 3: Caractéristiques mécaniques, l'Énergie de rupture (KV) en flexion par choc, en long, sur les produits plats et longs (Annexe 2) :.....	40
Tableau 4:Caractéristiques mécaniques à la température ambiante des nuances et qualités d'acier pour les produits plats et longs avec valeurs d'énergie de rupture en flexion par choc (Annexe 3)	41
Tableau 5: Les nuances existantes dans la base de données du spectromètre	42
Tableau 6: Facteur pour les aciers faiblement alliés.....	46
Tableau 7: Anciennes désignations équivalentes (Annexe 15).....	48
Tableau 8: Les réactifs de l'attaque chimique selon le matériau à observer.	54
Tableau 9: Données Techniques de la Machine ZWICK 5101 de résilience.....	69
Tableau 10: Principe de l'essai de dureté Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop.	74
Tableau 11: Dureté Knoop	77
Tableau 12 : Normes NF A 03-502, 03-503 et 03-504 respectivement pour les machines d'essais Brinell, Rockwell et Vickers	80
Tableau 13: Normes d'étalonnages utilisé pour les machines d'essais Brinell, Rockwell et Vickers	81
Tableau 14: Le résultat de notre analyse chimique de l'acier S355J2+N :	84
Tableau 15: Base de données des références des matériaux existant dans la machines :	85
Tableau 16: represente les ci-dessus C3	101
Tableau 17: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C3:.....	101
Tableau 18: represente les ci-dessus C2	102
Tableau 19: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C2.....	103
Tableau 20: represente les ci-dessus C1	104
Tableau 21: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C1.....	104
Tableau 22: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M3.....	105
Tableau 23: represente les ci-dessus M3.....	106
Tableau 24: represente les ci-dessus M2.....	106
Tableau 25: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M2.....	107
Tableau 26: represente les ci-dessus M1.....	107
Tableau 27: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M1.....	108
Tableau 28: represente les ci-dessus S3	109
Tableau 29: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S3	109
Tableau 30: represente les ci-dessus S2	110
Tableau 31: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S2	111
Tableau 32: represente les ci-dessus S1	112
Tableau 33: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S1	112
Tableau 34: Calcul des paramètres mécaniques de l'essai de traction suivant les équations ci-dessus.....	113

Tableau 35: Résultats de l'essai de résilience des éprouvettes de la surface, le milieu et le cœur	114
Tableau 36: La Norme exigée des valeurs des énergies minimale (J) en fonction de la température (°C) et de l'épaisseur nominale (mm) des éprouvettes de résilience.....	114
Tableau 37: Mesure des Empreintes et la moyenne de la dureté Vickers	115
Tableau 38: Calcul de la surface de la forme pyramidale de l'empreinte :	115
Tableau 39: Tableau des contraintes appliquées sur les phases cristallographie de notre acier	116

Problématique

Problématique

La matière première ceux sont des aciers livrés à l'état fini ou semi-fini d'après le cahier des charges, ces aciers doivent subir un traitement thermique ou non, avant l'utilisation finale.

L'entreprise doit d'abord vérifier si le fournisseur a respecté la Norme et le cahier des charges.

Notre travail est proposé par l'entreprise électro-Industries d'Azazga, qui a un problème car après l'importation de la matière première, elle doit passer par le département contrôle qualité qui a des laboratoires qui nous ont permis de réaliser cette expertise sur l'acier S355J2+N (Composition chimique, Propriétés mécaniques), en stage et la réalisation des essais nécessaire pour finaliser notre travail de mémoire de Master Académique en Génie-Mécanique, option Génie Des Matériaux.

Partie Théorique

I. Etude Théorique

I.1 Introduction

L'acier est un alliage Fer- Carbone qui peut être allié avec des éléments d'alliage (Mn, Ni, Cr,...), selon leur domaine d'application (mécaniques, construction, aéronautiques, médical, etc.) comme dans notre cas dans le domaine électromagnétique (moteur monophasé ou triphasé).

Pour répondre à ses exigences, on fait varier la composition chimique, les traitements thermiques...

L'acier laminé à chaud est un acier qui a subi le processus de formage à une température qui est supérieure à 926°C, pour l'empêcher de se recristalliser. Les mises en forme de cet acier au-dessus de la température de recristallisation sont faciles à réaliser.

Dans notre cas, les aciers sont livrés à l'état fini ou semi-fini à l'entreprise ; d'après le cahier des charges, ces aciers doivent subir un traitement thermique ou non, avant l'utilisation finale.

Notre acier S355J2+N a subi un traitement thermique de recuit de normalisation, qui est utilisé comme arbre de rayon 105mm, d'un moteur électrique. Le recuit de normalisation est un traitement thermique qui permet l'obtention d'une structure fine et uniforme et à améliorer les propriétés d'un acier après une déformation à chaud.

Le but de notre travail est la caractérisation comparative à l'état livrer de notre acier, donc c'est un travail de contrôle qualité.

Dans le chapitre 1 : On a présenté l'étude théorique (généralités sur les aciers, diagramme d'équilibre, compositions chimique, propriétés mécaniques et domaines d'application).

Dans le chapitre 2 : On a exposé l'étude pratique (Matière première, techniques utilisées, Composition chimique vérifiée, Microstructures, Propriétés mécaniques, et Interprétations des résultats).

Dans la dernière partie : On a regroupé la Conclusion générale et les Perspectives.

I.1.1 Présentation de l'entreprise

Electro-industries est issue de la réorganisation du secteur industriel opérée en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (Entreprise Nationale des Industries Electrotechniques) en un certain nombre d'EPE/SPA, parmi lesquelles celle présentée sur la Figure ci-dessous de l'**ELECTRO-INDUSTRIES**.



Figure 1: Infrastructure de l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES.

Le Tableau.1 ci-dessous donne la Présentation Administrative de l'entreprise électro-Industries :

Tableau 1: Présentation Administrative de l'entreprise.

Raison sociale	ELECTRO-INDUSTRIES
Forme juridique	ENTREPRISE PUBLIQUE ECONOMIQUE Société par actions SPA
Capital social	4 753 000 000 DA détenus à 100% par le GROUPE ELEC EL DJAZAIR pour le compte de l'ETAT
Président Directeur Général	Mr. Belkacemi. Djamel
Activité principale	Production et commercialisation des transformateurs, moteurs électriques et groupes électrogènes.

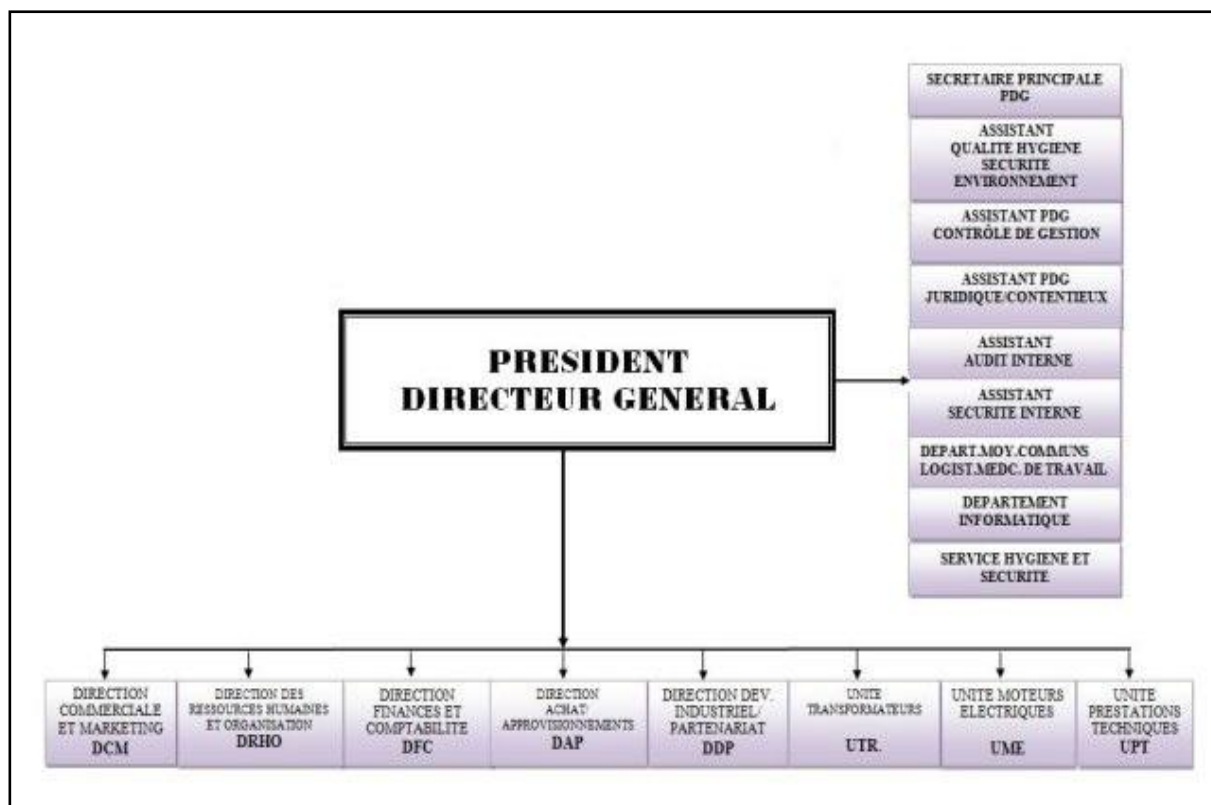


Figure 2: Organigramme de la société par ACTION ELECTRO-INDUSTRIES.

Conjoncture

Au plan national, la signature depuis Septembre 2005 de l'accord d'association avec l'union européenne et la suppression ou l'allégement 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 de sa valeur ajoutée et de son résultat net.

Introduction Générale

I.1 Introduction

L'acier qui est une variante du fer allié au carbone est souvent à d'autres éléments ajoutés pour le préparer à la transformation et à l'utilisation industrielle. L'un d'eux est un 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 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 finale moins prévisibles que le laminage à froid.

Le laminage à chaud permet une grande variété de formes et de pièces ainsi que les possibilités 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 c'est de réaliser une expertise sur la composition chimique et les Propriétés Mécanique de l'acier S355J2+N (acier rond de diamètre $\varnothing = 105\text{mm}$, laminé à chaud qui a subi un traitement thermique de normalisation) pour vérifier si le fournisseur a respecté le cahier des charges et la Norme. Cet acier est utilisé par l'Entreprise en Electro- Industries d Azazga.

Le mémoire es formé d'une partie Bibliographique qui composée d'un premier chapitre :

Dans ce premier chapitre : Nous parlerons sur l'acier et ces alliages ainsi que ses différentes propriétés chimique et mécaniques, le diagramme d'équilibre, l'influences des éléments d'additions,...etc.

Et, Dans ce deuxième chapitre : On a une partie expérimentale dans laquelle on détaillera les chapitres suivants (matière première, matériels utilisé, les procédés utilisés, résultats et interprétations)

Et, on va achever cette étude par une conclusion générale et des perspectives.

1.2 Généralités sur les aciers [1]

D'après les Normes, les aciers peuvent être classés selon leurs compositions chimiques, propriétés mécaniques... etc., comme le montre le classement ci-dessous :

1.1. Aciers à haute limite élastique

Cette famille d'acier de développement récent peut-être utilisée aussi bien en construction métallique (Ponts) qu'en construction chaudronnière (appareil à pression)

La majorité de ses aciers appartiennent à la série de type :

Dispersoïdes au (Nb, V, Nb-V) faiblement alliés. Les dispersoïdes sont les éléments (Nb, V, Al), dont l'influence sur l'acier qui contient généralement peu de carbone ($C < 0,25\%$) est triple sur la soudabilité.

Les dispersoïdes agissent sur la cristallisation au cours du laminage à chaud.

Ils ralentissent la recristallisation par suite de leur précipitation sous forme de nitrides, carbure ou carbonitrides au cours de laminage.

Le Niobium (Nb) est le plus efficace à partir de 0,1% et forme un mélange de carbures et de nitrides. L'Aluminium forme un nitride (Al-N), mais sa cinétique lente de précipitation nuit son efficacité.

La présence de dispersoïdes empêche la recristallisation de se produire entre les passes successives du laminage, les grains d'austénite (γ) s'allongent en conservant une grande surface de joints de grain et ils sont très écrouis, la germination de la ferrite au refroidissement après le laminage est accrue et les grains de ferrite sont d'autant plus fins que la déformation dans la zone de recristallisation ralentie sera plus importante (à 975°C).

Les dispersoïdes durcissent l'acier par précipitation :

Le durcissement peut-être obtenu par précipitation fine après la fin du laminage, si le dispersoïde n'est pas déjà antérieurement précipité, les particules formées pendant le laminage à chaud sont généralement plus grossières.

Le durcissement peut aussi être obtenu par réchauffage vers 900-950°C qui provoque l'austénitisation avec redissolution partielle des précipités formés au cours du laminage et aux refroidissements, on obtient la précipitation fine. Cette alternative n'est possible qu'avec le V, Al (pas avec le Nb).

Les dispersoïdes inhibent la croissance des grains au cours de la normalisation :

Elle est freinée par l'(Al, N, Nb, CN et VN). Cet effet est limité par la température de remise en solution des précipités.

Les aciers de type dispersoïdes peuvent atteindre des limites élastiques de 60(Kgf/mm²). Les aciers faiblement alliés au (Cr, Ni, Mo, B, et V) à l'état bainitique ou trempé-revenu sont aussi des aciers à haute limite élastique. Cette nuance peut atteindre 100(Kgf/mm²).

Des températures de transition (passage d'un état ductile à l'état fragile). Pour ces deux types d'aciers, elles sont très basses et peuvent descendre jusqu'à (-100°C).

I.2.1 Les aciers à traitement de surface

Une pièce traitée par trempé et revenu ne peut pas présenter simultanément les maxima de dureté, de résistance ou de limite élastique et des valeurs très élevées d'allongement ou de résilience. La température de revenu choisie pour un acier trempé, définit le compromis entre les propriétés de résistances et les propriétés de déformations. Dans certains cas, on recherche simultanément les duretés en surface les plus élevées possibles en même temps qu'un maximum des ténacités de l'ensemble d'une pièce. On aura alors recours à des aciers durcis en surface qui conserveront à cœur une ductilité suffisante. Les traitements de surface les plus utilisées sont : la cémentation, la nitruration et la trempé superficielle.

I.2.2 Aciers de cémentation

Leurs teneurs en carbone sont généralement limités à 0,25%. Leur aptitude à la cémentation est conditionnée par une uniformité de pénétration du carbone. Ceci n'est possible (compatible) qu'avec une finesse des grains convenable qui de plus résistera au grossissement au cours de la cémentation. Le traitement de cémentation ou de diffusion du carbone est suivi par une opération de trempé et de revenu à basse température. Généralement trois objectifs sont recherchés :

- Dureté très élevée en surface qui est de l'ordre de 58 HRC sans fragilité.
- Bonne ténacité à cœur.
- Contrainte de compression en surface.

Les principaux aciers utilisés sont : XC10, XC18, 16MC5, 20MC5, 18CD4, 25CD4, 16NC6, 10NC6, 20NC6, 14NC11, 20NCD2 et 18NCD6.

I.2.3 Aciers à Nitruration

La Nitruration consiste en un enrichissement en Azote de la surface de l'acier par maintien de la pièce dans un milieu approprié à une température inférieure à A_{C1} . L'épaisseur de la couche nitrurée est très faible, de l'ordre de 1/10 de mm. L'épaisseur de la couche n'est généralement pas suivie de trempé, par contre elle se fait souvent sur l'acier ayant subi au préalable un traitement thermique de trempé et de revenu et présentant de ce fait une structure de martensite revenue offrant un ensemble de caractéristiques

mécaniques élevées. Les aciers de nitruration sont des aciers alliés à base de Chrome (Cr) et de Molybdène (Mo) contenant en plus de l'Aluminium (Al). Les plus courants sont : 30CAD6-12, 40CAD6-12, et 30CD12.

Le traitement de nitruration permet d'atteindre en surface des duretés très élevées atteignant selon les nuances de 850 à 1200 Vickers. Ce traitement est recommandé pour les pièces devant présenter une très grande résistance à l'usure par frottement sans choc. Comme la cémentation, la nitruration crée des contraintes de compression favorables à la résistance à la fatigue.

1.2.4 Aciers pour trempe superficielle

Une trempe superficielle des pièces d'acier atteint au moyen des techniques différentes sont sensiblement, analogues à ceux de la cémentation ou de la nitruration avec création des craintes de compression.

La trempe superficielle se fait sans modification chimique de la surface de la pièce. Elle nécessite l'emploi d'aciers contenant assez de carbone pour atteindre des duretés élevées après trempe avec absence sur les pièces de toute décarburation de la surface. Les pièces destinées à la trempe superficielle sont chauffées en surface au-dessus de A_{C3} pendant des temps très courts, et immédiatement refroidis au moyen de jets d'eau sous pression, le chauffage se fait généralement par induction moyenne avec une haute fréquence (10^3 à 10^6 Hertz).

L'acier utilisé doit être homogène surtout en carbone et présenter une grande finesse du grain, insensible au grossissement lors du chauffage rapide. Les nuances généralement utilisées sont : XC38, XC42 et XC48 pour les quelles, on obtient respectivement les duretés superficielle suivantes : HRC 52,55 et 57.

On utilise également des aciers au Chrome-Molybdène et au Nickel-Chrome-Molybdène titrant 0,4%C pour lesquels, on obtient une dureté superficielle HRC=55. L'épaisseur de la couche trempée peut varier de quelques mm, suivant la fréquence utilisée.

1.2.5 Aciers à outils alliés

A l'intérieur de cette grande famille d'acier, les nuances sont classées selon le mode de travail de l'outil, on peut distinguer :

- ***Le travail à froid***

Il chauffe peu l'outil, la température du revenu, si nécessaire doit être relativement basse de façon à conserver à l'acier, la dureté maximale compatible avec la ténacité requise pour les conditions d'emploi.

- **Le travail à chaud**

Il amène à des températures plus élevées. La composition de l'acier est établit de façon à conserver à l'outil des caractéristiques mécaniques suffisantes à la température de travail qui doit-être inférieure à la température de revenu.

- **Travail de coupe à vitesse élevée**

Les aciers rapides sont destinés à cet usage. L'échauffement de l'arête coupante peut être très grand. La composition chimique et le traitement thermique de ces aciers sont tels qu'ils conservent aux températures normales de travail. Leurs propriétés de coupe et notamment leur dureté et leur résistance à l'usure.

I.2.5.1 Acier à outils alliés pour travail à froid :

- **Acier au Manganèse : (exemple : 90MV8)**

La composition type : C=0,9%, Mn=2%, Cr, W, V.

Ces aciers sont dits indéformables, le Mn apporte une bonne trempabilité et une basse température de trempe, il résiste bien à l'usure.

- Le recuit d'adoucissement est effectué entre 750°C-775°C.
- Trempe à l'huile à partir de 760°C
- Revenu (HRC=61) entre 150°C-200°C

Ils sont utilisés pour faire des calibres et des matrices de précision

- **Acier au Chrome : (Exemple 100C6 et Z200CD12)**

1^{ère} composition type : C=1%, Cr=1,5%

La teneur élevée en Carbone leur confère une grande dureté, le Chrome améliore la trempabilité et la résistance.

- Recuit d'adoucissement entre 720°C-740°C,
- Trempe à l'huile à partir de 830°C
- Revenu à 220°C ; HRC=65.

2^{ème} composition type : %C=2% ; Cr=12% ; Mo, V, W, Ni, Co ;

Les teneurs sont très résistants à l'usure, l'addition du Mo rend possible une trempe à l'air de fortes sections. Ils sont indéformables.

- Recuit d'adoucissement entre 850°C-900°C,
- Trempe à l'air après un maintien entre 950°C – 1050°C, HRC=66.
- Revenu à 200°C.

- **Acier au Chrome-Tungstène** : (Exemples : 100WC10 ; 100WC2 et 100WC20)

1^{ère} composition Type : 1%C, 1,5%W, 1%Cr, Mo, V. ils sont caractérisés par: la facilité à la coupe et la bonne résistance à l'usure.

- Recuit d'adoucissement à 750°C.
- Trempe à l'eau après un maintien entre 780-800°C.
- Revenu entre 220-230°C

I.2.5.2 Aciers à outils alliés pour travail à chaud

La teneur en carbone est assez basse et ne dépasse pas en général 0,7% ; Les éléments d'alliage permettent d'améliorer la résistance à l'adoucissement à chaud.

- **Acier au Chrome-Nickel-Molybdène**

Composition type: 0,6%C, 0,5%Cr, 1,5% Ni, 0,37%Mo : ils sont caractérisés par une résistance aux chocs mécaniques (Exemple : 55MCDV7)

Le Nickel confère une forte pénétration de trempe :

- Recuit d'adoucissement à 750°C
- Trempe à l'huile à partir de 850°C
- Revenu à 450°C : (R=120 Kg/mm², 110 Kg/mm² ; A=8%)

- **Acier au Molybdène –Chrome-Vanadium**

Composition Type : 0,3%C ; 0,3%Cr ; 3%Mo ; 0,5%V

Ils ont une bonne résistance aux chocs thermiques (Exemple : 30CDV28)

- **Aciers au Chrome-Tungstène**

Composition type : 0,4%C ; 0,3%Cr ; 4%W ; 0,4%Mo ; 0,8%Sc ; 0,5%V.

Ils ont une grande résistance à l'usure à chaud (Exemple : Z40WCV5)

Les résistances à l'adoucissement et à l'usure à chaud sont assurées par W, Mo.

- Le recuit d'adoucissement à 750°C,
- La trempe à l'huile à partir de 1000°C,
- Revenu entre 400°C-500°C :(R=130 à 140 Kg/mm²)

La composition Type : 0,3%C ; 3%Cr ; 9%W ; V ; Mo ; Ni ; Co.

Résistance à l'usure à chaud (Exemple : Z30WCN9)

- Recuit d'adoucissement à 800°C
- Trempe à partir de 1050°C – 1200°C :(R= 170 Kg/mm²)
- Revenu à 500°C.

I.2.6 Aciers rapides

Ils sont destinés à l'usinage par coupe à grande vitesse, ou avec de fortes passes. Dans ces conditions les parties travaillantes de l'outil sont soumises à des abrasions et à des échauffements sévères.

Les caractéristiques nécessaires sont obtenues grâce à des additions importantes d'éléments susceptibles de former des carbures durs (Cr, W, Mo, V).

Après le traitement thermique final, une partie des éléments d'alliage restent en solutions dans la matrice qui lui permet de conserver sa dureté aux températures élevées, tandis que le reste, se précipite sous forme de carbures, il se trouve à l'état de dispersion fine et lui confère une bonne résistance à l'usure. Plusieurs de ces nuances peuvent être utilisées pour certains travaux à chaud ou à froid avec un traitement thermique approprié. Les compositions sont très variées : voici certains sous-groupes :

- Acier fortement allié au W
- Acier fortement allié au Co
- Acier fortement allié au V
- Acier fortement allié au Mo
- Acier fortement allié au W-Mo

Deux conditions sont nécessaires pour conserver une dureté satisfaisante entre 500°C-600°C

- Contenir en suffisance : W, Cr, V, Mo, Co ;
- Austénitisation à très haute température : 1300°C

I.2.7 Aciers de construction alliés sans traitement

Ils remplacent les aciers doux dont la limite élastique comprise entre (22 et 26 Kg/mm²) est trop faible, on ne peut élever la teneur en Carbone car l'acier devient trempant, ce qui est nuisible à la soudabilité. Les aciers utilisés contenant généralement moins de 0,2% de Carbone. Ils sont obtenus par addition d'éléments durcissant essentiellement, la ferrite (Si et Cu) et peu ou faiblement carburigène (Mn, Cr), le Silicium, très soluble, relève E et R, mais, il favorise tellement la retassure du lingot alors sa teneur doit être limitée pour réduire les pertes avant laminage. Le cuivre produit un durcissement structural par refroidissement lent entre 450 et 500°C.

Le Manganèse ajouté jusqu'à 2 ou 3% à une fonction modérée sur la résistance, son action est généralement renforcée par le Si et le Cu.

I.2.8 Aciers de construction alliés avec traitement

La teneur en carbone est toujours limitée à un maximum de 0,5% afin d'obtenir les caractéristiques souhaitées de ductilité et de ténacité. On les classe par rapport à un ou à la combinaison de plusieurs éléments d'alliage.

- **Les aciers au Manganèse** : 40M5 (0,3-0,5%C ; 1-1,5%Mn) :
 - Trempe à l'eau ou à l'huile à partir de 830°C
 - Revenu entre 200°C-550°C
- **Les aciers au Chrome-Manganèse** : 16MC5 (0,12-0,25%C ; 0,7-1,5%Cr ; 1-1,5%Mn)
 - Trempe à l'eau-huile à 850°C
 - Revenu entre 200°C-550°C
- **Aciers au Chrome** : 45C4 (0,1-0,5%C ; 0,5-1,5%Cr ; 0,5-0,9%Mn)
 - Trempe à l'eau à partir de 850°C (si C<0,25% ; huile si C>0,25%)
 - Revenu entre 200-550°C
- **Aciers au Nickel-Chrome** : 20NC6 et 14NC11 (0,15-0,4%C ; 0,8-2%Cr ; 1,2-4,5%Ni ; 0,2-0,8%Mn)
 - Trempe à partir de 850°C (à l'huile si Ni<3,5%, à l'air si Ni>3,5%)
 - Revenu entre 200-600°C
- **Aciers au Chrome-Molybdène** : 18CD4 et 30CD12 (0,15-0,45%C ; 0,8-3,3%Cr ; 0,15-0,5%Mo ; 0,3-1%Mn)
 - Trempe à 850°C
 - Revenu entre 200-600°C
- **Acier au Chrome-Nickel-Molybdène : 20NCD2, 35CND16**
 - Trempe à 850°C (à l'huile si Ni<3,5%, à l'air si Ni>3,5%)
 - Revenu entre 200°C - 600°C.
- **Acier au Chrome-Nickel-Molybdène : 30NCD8**
 - Trempe à partir de 900°C à l'air et revenu à 200°C ou
 - Trempe à partir de 850°C à l'huile et revenu à 800°C

La trempe à l'air conduit à une meilleure résistance et celle à l'huile a une plus grande ductilité.

- **Aciers au Chrome-Aluminium-Molybdène : 30CAD6-12** (0,28-0,45%C ; 0,5-0,8%Mn ; 1,5-1,8Cr ; 0,25-0,4%Mo ; 1-1,3%Al)
 - Trempe à partir de 900°C à l'huile
 - Revenu à 625°C

- **Aciers au Chrome-Vanadium : 50CV4**

- Trempe à partir de 850°C à l'huile

- Revenu à 550°C

1.2.9 Aciers de décolletage

- **Acier au plomb** : Le plomb améliore l'usinabilité sans affecter de façon sensible les propriétés mécaniques.

- 10Pb2 et 20Pb2 sont des nuances pour cémentation après usinage.

- 35Pb2 est la nuance utilisée à l'état trempé et revenu.

- **Aciers au Soufre** : le soufre améliore l'usinabilité mais affaiblit les caractéristiques mécaniques.

Remarque :

- La nuance 10F2 peut-être cémentée ;
- La nuance 70F2 peut-être trempée et revenue.

- **Aciers au Manganèse-Soufre**

Le Manganèse améliore la trempabilité. La nuance 12MF4, c'est des petites pièces pour cémentation et trempé à l'huile.

La nuance 35MF4 destinée aux pièces moyennes (trempé à l'huile et revenue)

- **Aciers au Plomb-Soufre**

10PbF2 présente une meilleure usinabilité que 10F2.

1.3 Diagramme d'équilibre binaire Fer-Carbone [2], [3]

Le système Fer-Carbone est théoriquement décrit par le diagramme Fer-Carbone dans lequel le carbone, insoluble dans le fer α précipiterait sous forme de graphite. Mais, dans le domaine des aciers ($C \leq 2,11\%$, environ) non alliés, l'expérience révèle qu'il n'en est pas ainsi et que le carbone en excès précipite sous la forme du carbure de fer (Fe_3C), appelée cémentite. Il est donc alors normal de considérer le diagramme d'équilibre Fer-Cémentite (voir la Figure. 3.1) ci-dessous.

En dehors des domaines de solidification, ce diagramme Fer-Cémentite fait apparaître :

- Sur l'axe des ordonnées, les domaines de température dans lesquels les différentes formes allotropiques du fer pur sont stables ;
- Le domaine ABCDEFGHI d'existence du fer (γ) (dont la limite inférieure IHGF définit le point de transformation symbolisé par **Ae₁**) et qui inclut :
 - Le domaine mixte ABC (fer δ + fer γ),
 - Le domaine mixte DEFG (fer γ + cémentite),
 - Le domaine mixte GHI (fer γ + fer α)
 - Le domaine ACDGI d'existence du fer γ seul qui est aussi le domaine dans lequel un acier non allié fer-carbone est, à l'état solide, monophasé cubique à faces centrées(CFC), tout le carbone étant en solution solide dans le fer γ (phase appelée austénite) et dont la limite inférieure IG définit le point de transformation symbolisé par **Ae₃** ;
- La limite DG de solubilité du carbone dans le fer γ que l'on peut décrire approximativement avec la relation :

$$\log (\%C) = 1,363 - \left(\frac{1475}{T}\right) \quad (1)$$

Avec :

T (K) : La température et, qui définit le point de transformation symbolisée par **Ae_m** ;

Le domaine IGFJK d'existence du fer α (dont la frontière IG définit le point de la transformation symbolisée par **Ae₃** et qui inclut :

- Le domaine mixte IGH (fer α + fer γ),
 - Le domaine mixte HGFJK (fer α + cémentite),
 - Le domaine IHK d'existence du fer α seul qui est aussi le domaine dans lequel un acier non allié Fer-Carbone (à très basse teneur en carbone) est, à l'état solide, monophasé cubique centré (CC), le carbone étant en solution solide dans le fer α (phase appelée ferrite) ;
- La limite HK de solubilité du carbone dans le fer α que l'on peut décrire approximativement avec la relation :

$$\log (\%C) = 2,36 - \left(\frac{4030}{T}\right) (2)$$

— L'évolution, en fonction de la teneur en carbone, de la limite supérieure IG du domaine mixte (fer α - fer γ) (IGH) qui traduit l'influence du carbone sur l'état d'équilibre de l'austénite ; en présence du carbone en solution solide, celle-ci est stable à des températures inférieures à 912°C. le carbone stabilise donc l'austénite et, de ce fait, on le dit "gammagène" ;

— L'existence d'un eutectoïde dont les coordonnées sont : C = 0,77% à 727°C

Et, qui est constitué, lors de sa formation à 727°C, par un agrégat de grains de ferrite (contenant 0,02% de carbone) et de grains de cémentite Fe₃C (à 6,69% de carbone). Dans un alliage fer-carbone, cet agrégat contient en poids (les proportions en volume qui sont pratiquement identiques) 88,78% de ferrite et 11,22% de cémentite (les proportions à 20°C sont de 88,49% de ferrite pratiquement sans carbone et 11,51% de cémentite, cette dernière proportion a augmenté par la suite de la précipitation du peu de carbone qui était en solution dans la ferrite à 727°C). La réaction eutectoïde s'écrit :



Dans les conditions d'équilibre, elle se déroule à la température constante de 727°C (pour un acier Fe-C non allié) ;

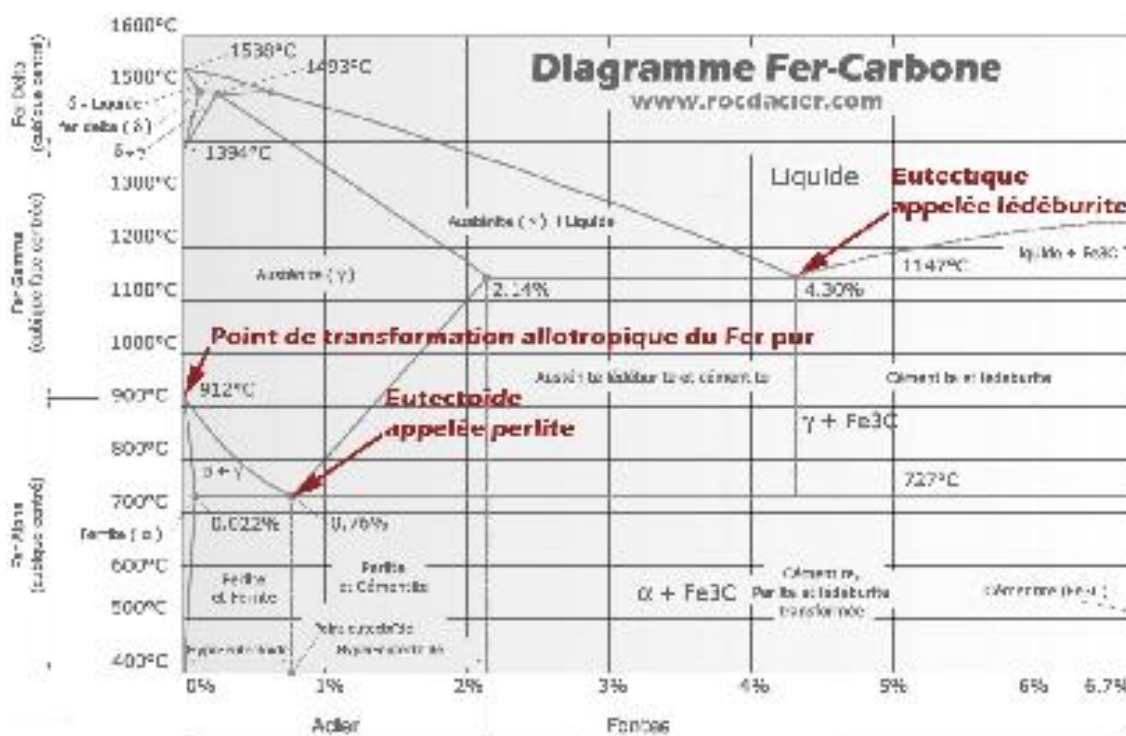


Figure 3: Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C

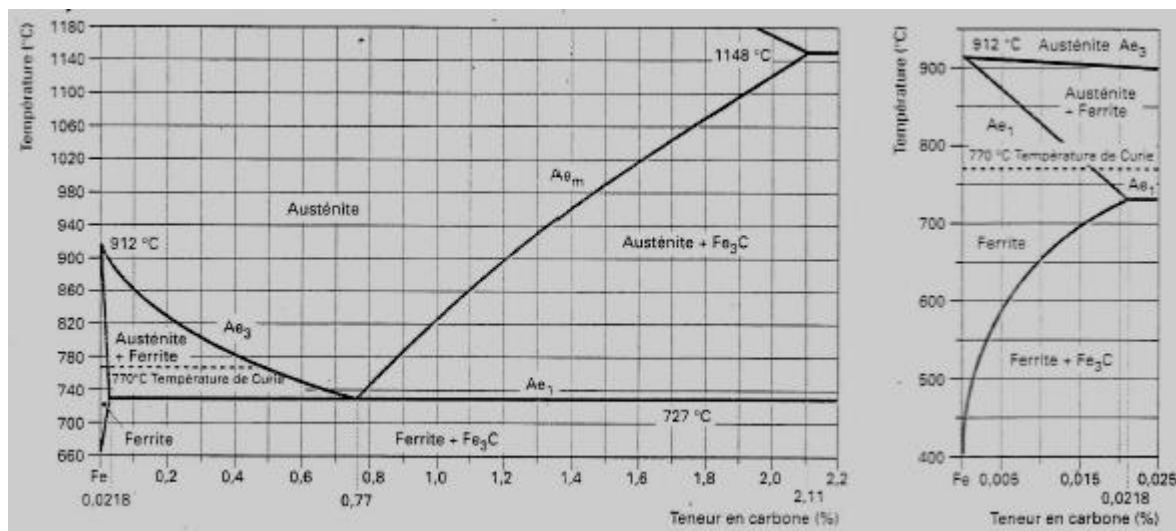


Figure 4: Zoom sur la partie acier du diagramme d'équilibre Fer-Carbone (Fe-Fe₃C).

— A l'équilibre à 20°C, les proportions des phases présentes évoluent en fonction de la teneur en carbone. Les deux formules suivantes quantifient ses relations (entre 0 et 2,11% de carbone) :

$$\% \text{ ferrite totale} = 100 - 14,95 (\%C) = 85,05\% \quad (3)$$

$$\% \text{ cémentite} = 14,95 (\%C) \quad (4)$$

Pour l'étude des transformations des aciers, on utilise essentiellement les parties utiles du diagramme Fe-Fe₃C telles qu'elles sont présentées par la Figure.4.

1.4 Élément d'alliage dans les aciers [4]

Les aciers contiennent souvent des éléments d'alliage qui sont susceptibles de modifier leurs états d'équilibre. Une première indication concernant ces effets peut être tirée de l'examen des diagrammes binaires fer-éléments d'alliage.

En effet, certains éléments d'alliages, tels le Chrome (Figure. 3.1), augmentent la stabilité de la phase α au point que l'alliage, au-delà d'une certaine teneur, reste Cubique Centré à toutes les températures ; un tel élément est dit **alphagène**. La liste des éléments alphagène comprend presque tous les éléments d'alliage habituels tels que (Si, Al, Cr, Mo, Ti, W).

D'autres éléments d'alliages, tels le Nickel (Figure.5), augmentent au contraire la stabilité de la phase (γ) au point qu'au-delà d'une certaine teneur, l'alliage peut rester Cubique à Faces Centrées quelle que soit la température. Un tel élément est dit **gammagène** ; la liste des éléments gammagène est assez limitée puisqu'elle ne comporte que le Ni, le Mn, et le Cu.

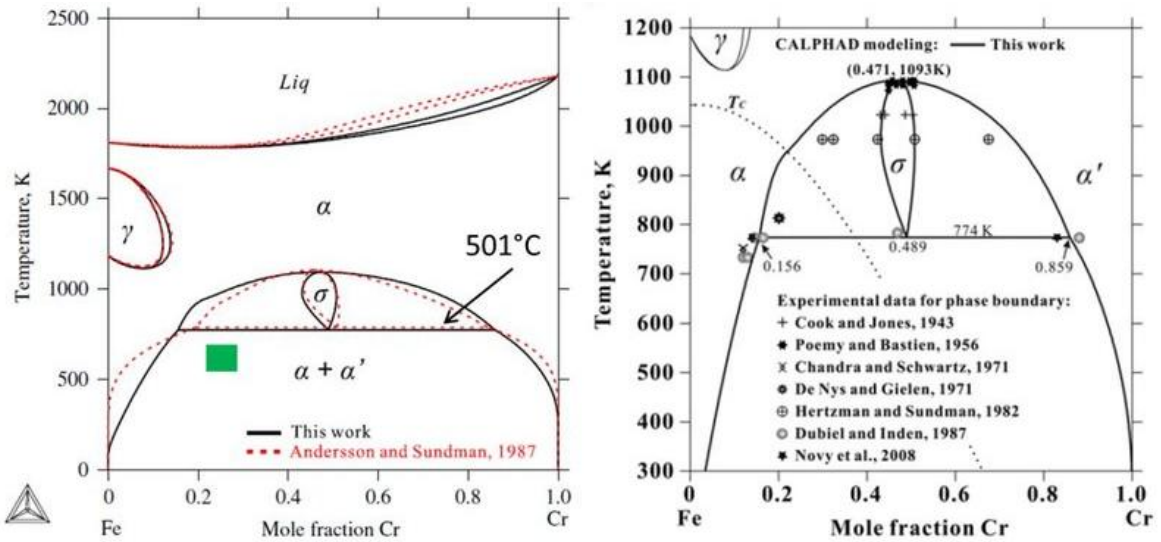


Figure 5: Diagramme d'équilibre de l'alliage Fe-Cr

Mais, il est nécessaire de considérer aussi l'influence des éléments d'alliage sur les états d'équilibre du système fer-carbone. Dans ce domaine, on constate tout d'abord que les éléments alphas augmentent la surface du domaine dans lequel la phase α est stable. La figure 5a, [10] illustre cet effet, en ce qui concerne le Manganèse.

Pour des teneurs limitées, ces modifications du tracé du diagramme d'équilibre Fer-carbone sont traduites par deux diagramme qui, en fonction de la teneur en élément d'alliage et cela pour chacun d'eux, représentent :

Pour le premier (Figure 6), l'évolution de la température à laquelle se déroule la transformation eutectoïde, la température qui correspond, si la teneur en carbone n'est pas inférieure à 0,0218%, à celle du point Ae_1 (courbe HGF de la Figure 1) ; cet effet peut aussi être quantifié à l'aide d'une formule empirique d'Andrews [13] :

$$Ae_1 (\text{°C}) = 727 - 10,7 \text{ Mn (\%)} - 16,9 \text{ Ni (\%)} + 29,1 \text{ Si(\%)} + 16,9 \text{ Cr (\%)} + 6,38 \text{ W (\%)} + 290 \text{ As(\%)} \quad (5)$$

Ces variations de la température à laquelle se déroule la transformation eutectoïde modifient les conditions en germination et de croissance des constituants de l'agrégat eutectoïde de telle sorte que celui-ci sera formé de grains de ferrite et de cémentite d'autant plus gros qu'elle sera plus élevée ;

Pour le second (Figure 7), les variations de la teneur globale de l'eutectoïde en carbone, variations qui conduisent toutes à un abaissement de la teneur globale en carbone de l'eutectoïde (nous verrons plus loin dans le paragraphe 2.1.2, les conséquences d'un tel abaissement).



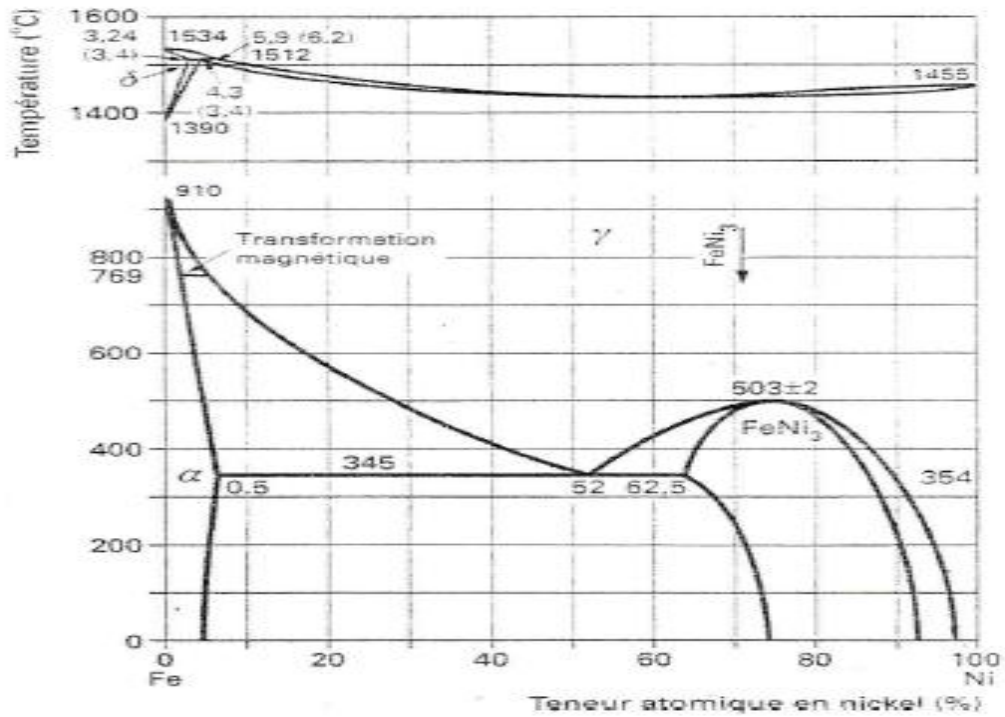


Figure 6: Diagramme d'équilibre des alliages Fe-Ni

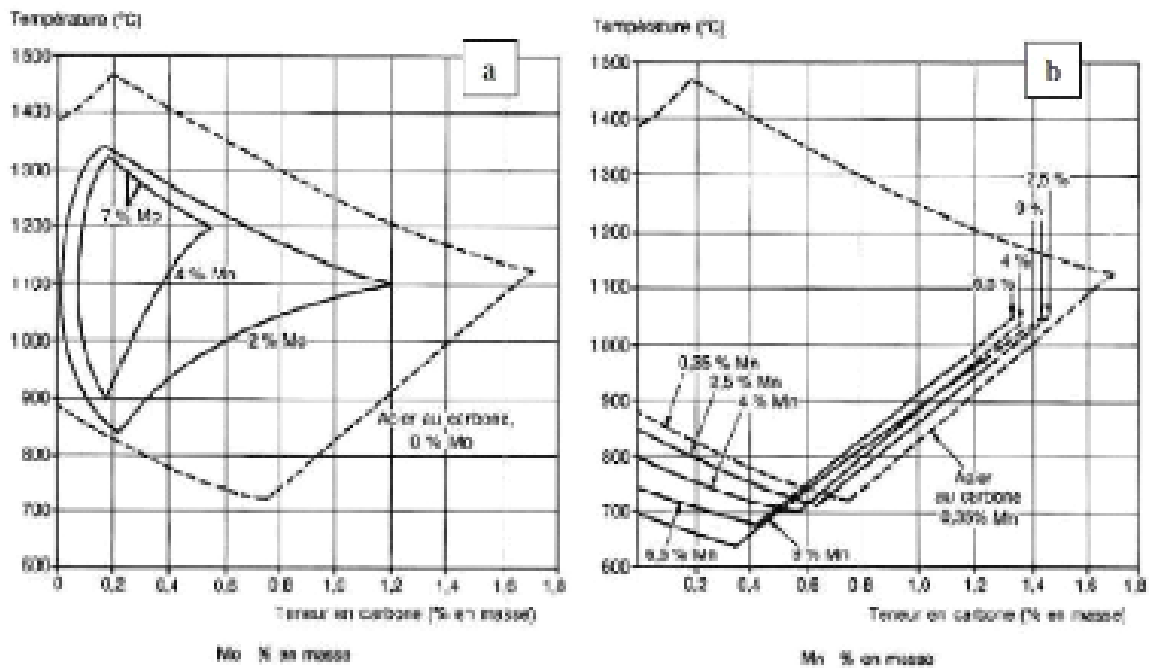
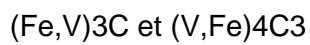


Figure 7: Exemple de modification du domaine de stabilité de l'austénite par éléments d'alliage

Par ailleurs, certains éléments d'alliage engendrent des modifications des carbures précipitent à l'état d'équilibre ; en leur présence, le carbone ne précipite plus sous la forme de carbure de fer mais sous d'autres espèces. On est ainsi amené à considérer les éléments dits carburigène, éléments qui ont pour le carbone une affinité plus grande que celle du fer. Ceux sont le (Mn, Cr, Mo, V, W, Nb, Ti). Il faut noter que ces éléments, à faible teneurs, ont souvent tendance à participer à la formation de la cémentite en se substituant partiellement au fer, donnant ainsi des carbures répondant à la formule générale M_3C . A forte teneurs, par contre, ils forment les carbures qui leur sont propres (en admettant parfois un peu de fer qui se substitue à eux). C'est ainsi, par exemple, qu'avec le Chrome, on pourra former des carbures répondant aux formules suivantes :

Alors qu'avec le Vanadium, on pourra identifier:



(7)

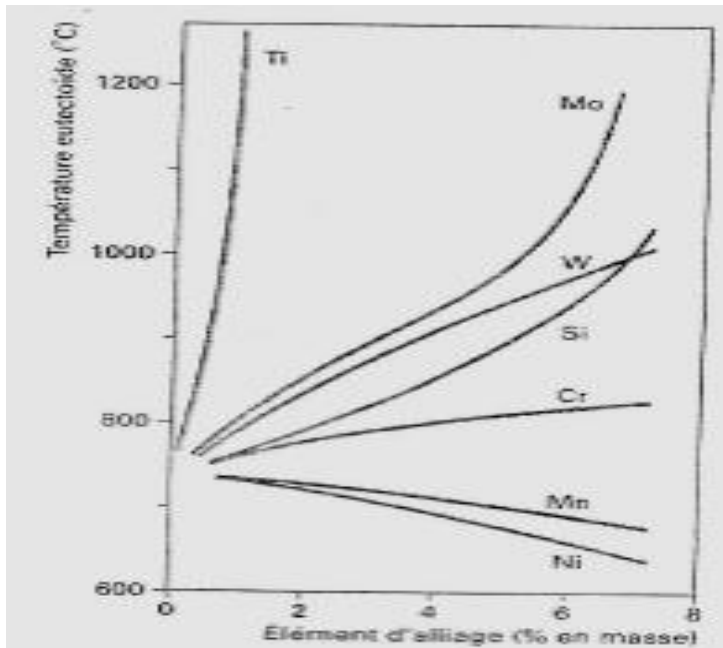


Figure 8: Influence des éléments d'alliage sur la température de l'eutectoïde dans chaque système Fer-Carbone-élément d'alliage

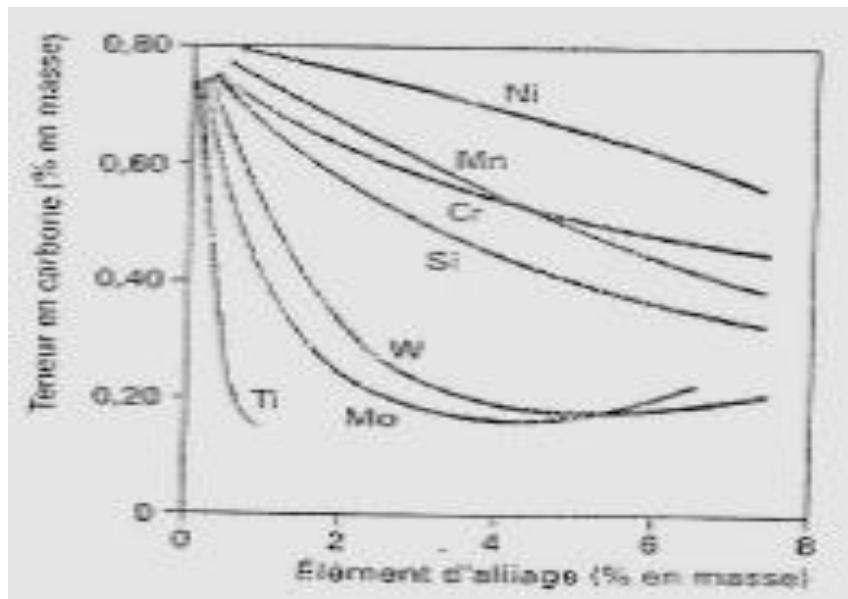


Figure 9: Influence des éléments d'alliage sur la teneur en carbone de l'eutectoïde dans chaque système Fer-Carbone-élément d'alliage

Dans ces cas, la transformation eutectoïde perd sa spécificité pour faire place à une transformation plus complexe s'étalant généralement sur un intervalle de température parfois assez large.

Ces éléments carburigène ont leurs solubilité propre qui, selon la température, leur permettra d'être solubles, totalement ou partiellement dans l'austénite ou au contraire leur interdira de passer en solution solide (ils ne seront alors solubles qu'à la fusion). La dissolution des états d'équilibre des alliages formés peut être partiellement fournie par des diagrammes ternaires (cas des alliages à trois composants du type Fe-C-5Cr)

1.5 Les aciers alliés [6]

1.5.1 Insuffisances des aciers au carbone

Le choix correct de la nuance d'acier et du traitement thermique permet d'avoir des combinaisons de propriétés mécaniques ; mais il n'en demeure pas moins que les aciers alliés ont connue très rapidement un important développement qui s'explique précisément par les insuffisances des aciers au carbone.

Dans l'état recuit ou normalisée : il y'a la difficulté du traitement des pièces importantes. Les variations de vitesses de refroidissement d'un point à l'autre entraînent des variations importantes de la dureté et la ductilité.

Dans l'état trempé : la sensibilité à la vitesse de refroidissement est encore un grave inconvénient, la vitesse critique de trempe élevée limite la capacité ou pénétration de trempe à quelques (mm). Cette pénétration est encore plus faible lorsque les grains d'austénite γ sont petits.

Enfin les risques de tapures constituent un handicap de l'utilisation des aciers au carbone dans l'état trempé.

Dans l'état trempé et revenu : les aciers au carbone deviennent doux très rapidement au cours de la montée en température. Dans ce cas, les aciers alliés seront utilisés de préférence aux aciers au carbone dans des applications faisant appel aux propriétés suivantes :

➤ **Résistance à l'usure :**

La présence des carbures alliés même la martensite renforce cette résistance, même à dureté égale.

Résistance aux attaques chimiques : Les additions passives.

➤ **Résistance mécanique :** aux températures élevées, l'acier au carbone flue à 400°C.

Résistances à basses températures : l'acier au carbone est fragile à basses températures.

➤ **Soudabilité :** les aciers contenant plus de 0,25% de carbone sont difficilement soudables.

➤ **Solubilité des éléments d'alliage dans le fer :**

Les éléments introduits dans le fer sont caractérisés par leurs actions sur les points de transformations du fer et leur solubilité dans le fer.

I.5.2 Eléments gammagène

On appelle ainsi les éléments qui étendent le domaine gamma(γ), ils forment eux-mêmes deux(02) groupes (Figure.5. 1) :

Le premier groupe dont l'élément type est le Nickel. Comprend les éléments qui donnent avec le fer un domaine de solubilité totale à l'état solide. Le Manganèse et le Cobalt font partie de ce groupe.

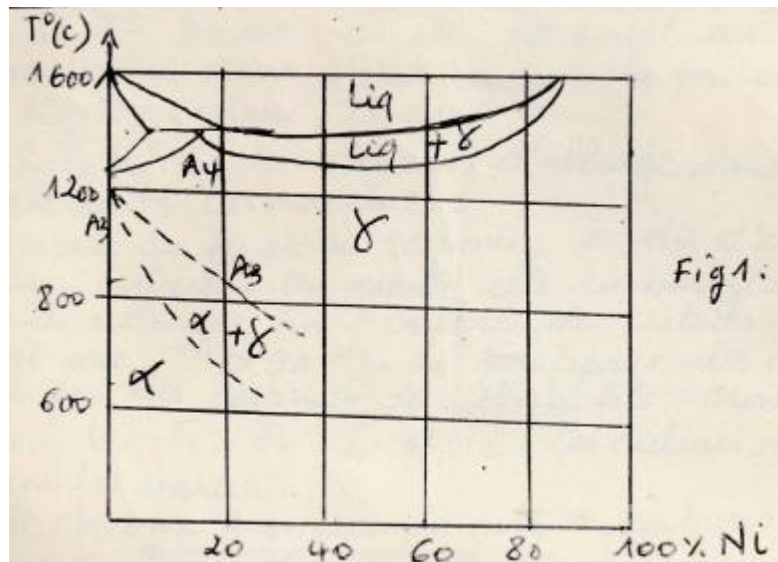


Figure 10: Diagramme d'équilibre Fe-Ni

Le deuxième groupe dont l'élément type est le carbone. Comprend les éléments qui tendent le domaine gamma(γ), par élévation du point A4 et abaissement du point A3 (Cuivre, Azote, zinc) font partie de ce groupe.

I.5.3 Eléments Alphagène

C'est les éléments qui rétrécissent le domaine gamma(γ), en relevant le point A3 et abaissant le point A4, on distingue deux groupes :

Le premier groupe dont le type est le Chrome comprend les éléments qui donnent un domaine gamma(γ), fermé appelé boucle gamma(γ), le Silicium, l'Aluminium, le Tungstène, le Molybdène, le Vanadium et le Titane appartiennent à ce groupe.

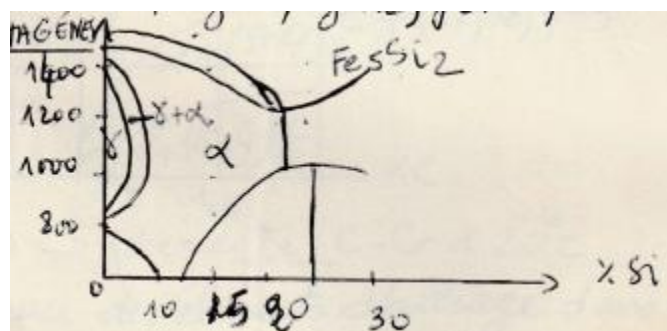


Figure 11: Diagramme d'équilibre Fe-Si

Le deuxième groupe dont l'élément type est le soufre comprend les éléments donnant un domaine gamma(γ), rétrécit (Zirconium, Niobium, Tantale) appartiennent à ce groupe.

Éléments provoquant un durcissement structural :

Ceux sont des éléments dont la limite de solubilité dans le Fer décroît lorsque la température baisse, ces éléments entraînent un durcissement structural par précipitation dans l'état trempé. Les précipités les plus importants sont : Azote, Carbone, Titane.

Solubilité des éléments d'alliage dans les aciers :

I.5.4 Éléments carburigène

En présence du Fer et du Carbone, les éléments d'alliage donnent de nouveaux carbures. On appelle éléments carburigène, les éléments formant dans les alliages Fer-Carbone des carbures stables (pour les dissoudre, il faut une température $> 900^{\circ}\text{C}$).

Les principaux éléments carburigène formant avec le Fer des carbures de stabilité croissante sont : (Mn, Cr, W, Mo, V, Ti, Zn, Ta et Tb). Ces carbures ont des structures et des formules variées ;

Avec le Chrome par exemple : On a trois (03) carbures (voir la Figure 12)

$(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$: Cémentite substituée

$(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ et $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$ apparaissent pour des teneurs élevées en chrome.

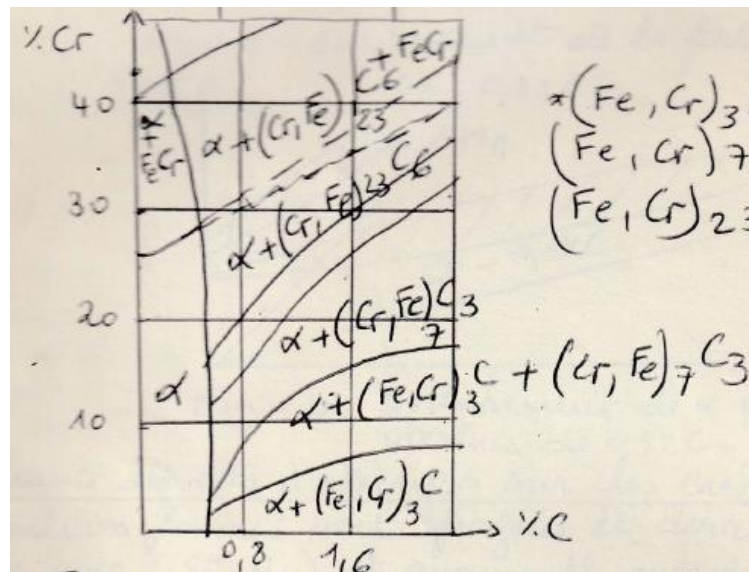


Figure 12: Système Fe-C-Cr à 20°C.

I.5.5 Influence des éléments d'alliages sur l'acier

Répartition des éléments d'alliages dans l'acier

On définit un coefficient de partage des éléments représentant le rapport des concentrations d'un élément dans la phase carbure et dans la phase ferrite.

Les éléments non carburigène : (Si, Al, Ni, Cu, Co) ont un coefficient de partage très petit.

Les éléments faiblement carburigène : (Mn, Cr, W, Mo) ont un coefficient de partage toujours plus grand que l'unité.

Les éléments fortement carburigène : (V, Ti, Zr, Tr, Nb) ont un coefficient de partage très grand (>2 ou 3).

Influence des éléments d'alliage sur la ferrite (voir la Figure 13) :

La Figure 13 ci-dessous montre le Durcissement de la ferrite par éléments d'alliage .

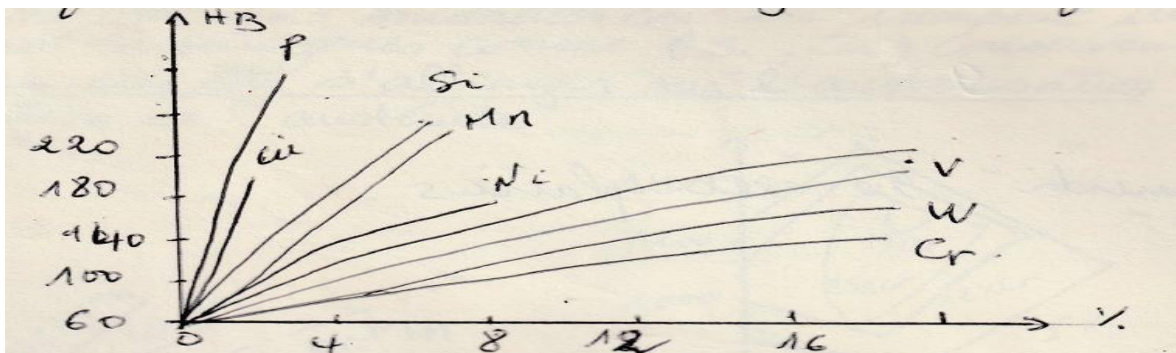


Figure 13 : Durcissement de la ferrite par éléments d'alliage.

Montre le Durcissement de la ferrite α par le Mn et le Cr en présence de 0,1%C Figure 14

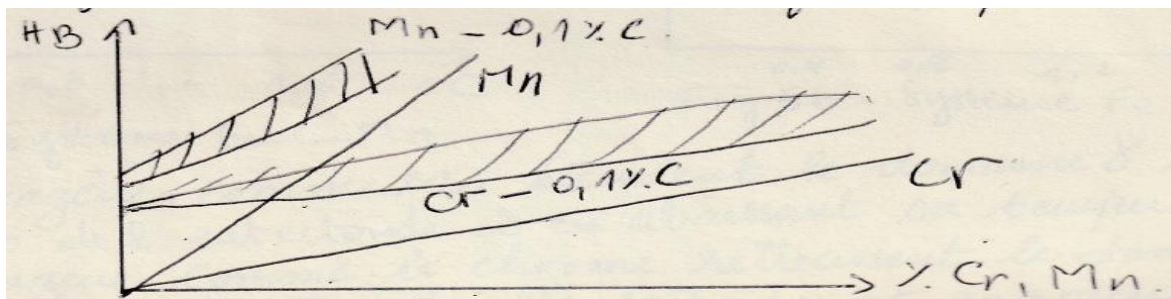


Figure 14: Durcissement de la ferrite α par le Mn et le Cr en présence de 0,1%C

I.5.6 Influence des éléments d'alliages sur les carbures

Les carbures formés sont fragiles et durs, leur stabilité est diminuée avec (Si, Ni) et augmente avec le (Cr, Mo, V, ...etc.)(Voir Figure15)

Les éléments d'alliage formant des carbures stables accroissent la résistance à l'usure (voir Figure 17).

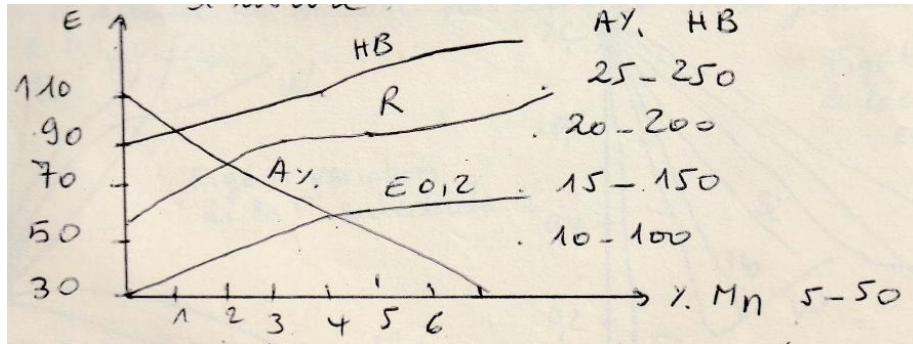


Figure 15: Influence du Mn sur les caractéristiques mécaniques d'un acier perlitique à 0,55% de carbone recuit ou normalisé.

La dureté et la résistance croissent, la ténacité et la ductilité décroissent, ce qui montre l'évolution en fonction de la teneur en Mn. (Figure.15) les propriétés mécaniques des aciers à 0,55%C. Les aciers ne sont pas soudables car ils trempent trop facilement les éléments non carburigène comme (Si, Cu) qui conservent la soudabilité.

I.5.7 Influence des éléments d'alliages sur l'austénisation

La Figure 18 ci-dessous représente le Système ternaire (Fe-C-Mn) et montre l'influence des éléments d'alliages sur l'austénisation, ici le Mn qu'on utilise dans notre cas.

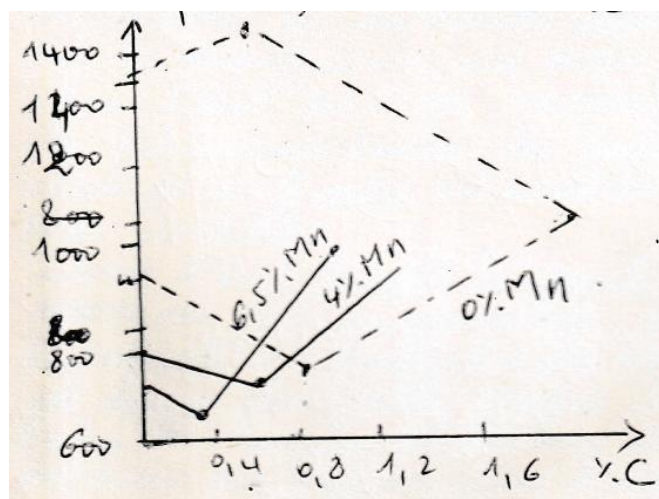


Figure 16: Système Fe-C-Mn

La Figure 19 montre le Système ternaire (Fe-C-Cr) et l'influence du Cr sur le diagramme d'équilibre

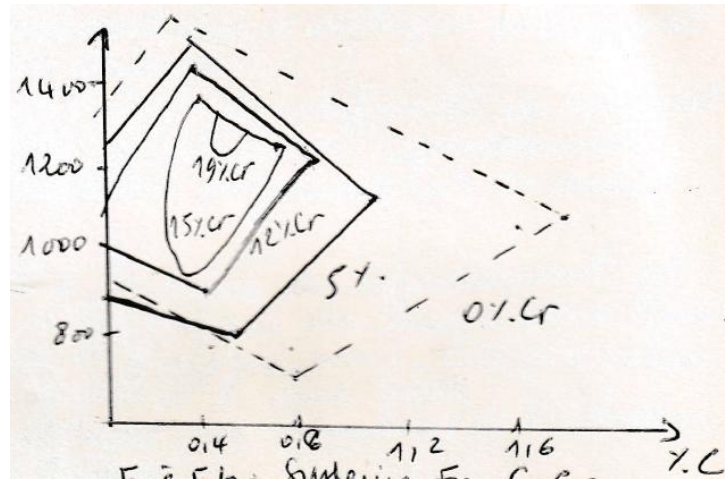


Figure 17: Système Fe-C-Cr

I.5.8 Composition chimique de l'austénite

Les éléments gammagène comme le Manganèse (Mn) étendent le domaine gamma (γ), en changeant la composition de l'eutectoïde et en abaissant sa température.

Les éléments alphagène comme le Chrome rétrécissent le domaine gamma(γ) en changeant la composition de l'eutectoïde et augmentant la température.

Le Titane est très carburigène, fait disparaître la solubilité du carbone dans l'austénite (γ) pour une teneur de 1%Ti.

L'élévation et l'abaissement par les éléments alphagène et les éléments gammagène respectivement, de la température eutectoïde est un facteur important pour la conduite des traitements thermiques.

La concentration en carbone de l'eutectoïde est abaissée par tous les éléments d'alliage et surtout par ceux qui sont fortement carburigène. (Voir les Figures 16 et 17).

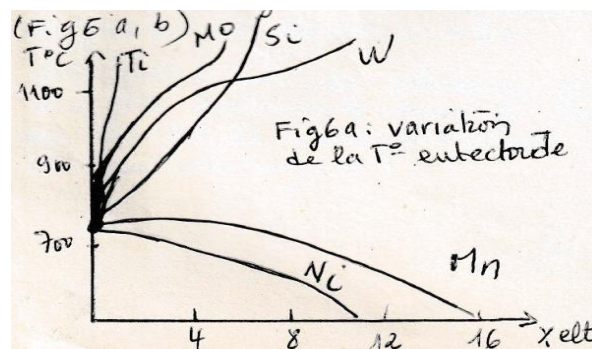


Figure 18: Variation de la température eutectoïde en fonction des éléments d'alliage. [5]

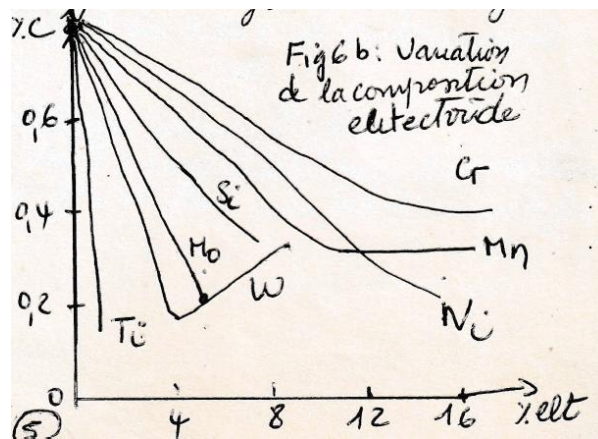


Figure 19: Variation de la composition eutectoïde en fonction des éléments d'alliage.[6]

I.5.9 Composition chimique de notre acier à la livraison selon la norme (Annexe 1)

Le Tableau 2, ci-dessous donne la composition chimique exigée par la Norme à laquelle, on doit comparer celle de notre acier S355J2+N pour vérifier sa conformité :

Tableau 2: La Composition Chimique exigée par la Norme de notre acier S355J+N.(Annexe 1) :

Désignation		Méthode de désoxydation ^b	C en % max. pour une épaisseur nominale de produit, en mm			Si % max.	Mn % max.	P % max. ^d	S % max. ^{d e}	N % max. ^f	Cu % max. ^g	Autres % max. ^h
Selon EN 10027-1 et CR 10260	Selon EN 10027-2		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ^c							
S235JR	1.0038	FN	0,19	0,19	0,23	–	1,50	0,045	0,045	0,014	0,60	–
S235J0	1.0114	FN	0,19	0,19	0,19	–	1,50	0,040	0,040	0,014	0,60	–
S235J2	1.0117	FF	0,19	0,19	0,19	–	1,50	0,035	0,035	–	0,60	–
S275JR	1.0044	FN	0,24	0,24	0,25	–	1,60	0,045	0,045	0,014	0,60	–
S275J0	1.0143	FN	0,21	0,21	0,21 ⁱ	–	1,60	0,040	0,040	0,014	0,60	–
S275J2	1.0145	FF	0,21	0,21	0,21 ⁱ	–	1,60	0,035	0,035	–	0,60	–
S355JR	1.0045	FN	0,27	0,27	0,27	0,60	1,70	0,045	0,045	0,014	0,60	–
S355J0	1.0553	FN	0,23 ^j	0,23 ^k	0,24	0,60	1,70	0,040	0,040	0,014	0,60	–
S355J2	1.0577	FF	0,23 ^j	0,23 ^k	0,24	0,60	1,70	0,035	0,035	–	0,60	–
S355K2	1.0586	FF	0,23 ^j	0,23 ^k	0,24	0,60	1,70	0,035	0,035	–	0,60	–
S450J0 ^l	1.0590	FF	0,23	0,23 ^j	0,24	0,60	1,80	0,040	0,040	0,027	0,60	m

I.5.10 Comportement mécanique de notre acier selon la Norme

Le Tableau 3 regroupe les Caractéristiques mécaniques, l'Énergie de rupture (KV) en flexion par choc, en long, sur les produits plats et longs

Tableau 3: Caractéristiques mécaniques, l'Énergie de rupture (KV) en flexion par choc, en long, sur les produits plats et longs (Annexe 2) :

Désignation		Température °C	Énergie minimale (J) Épaisseur nominale en mm		
Selon EN 10027-1 et CR 10260	Selon EN 10027-2		≤ 150 ^{a b}	> 150 ≤ 250 ^b	> 250 ≤ 400 ^c
S235JR	1.0038	20	27	27	–
S235J0	1.0114	0	27	27	–
S235J2	1.0117	– 20	27	27	27
S275JR	1.0044	20	27	27	–
S275J0	1.0143	0	27	27	–
S275J2	1.0145	– 20	27	27	27
S355JR	1.0045	20	27	27	–
S355J0	1.0553	0	27	27	–
S355J2	1.0577	– 20	27	27	27
S355K2	1.0596	– 20	40 ^d	33	33
S450J0 ^e	1.0590	0	27	–	–

Tableau 4:Caractéristiques mécaniques à la température ambiante des nuances et qualités d'acier pour les produits plats et longs avec valeurs d'énergie de rupture en flexion par choc (Annexe 3)

Désignation		Limite d'élasticité minimale R_{eH}^a										Résistance à la traction R_m^a							
		MPa ^b										MPa ^b							
		Épaisseur nominale mm										Épaisseur nominale mm							
Selon EN 10027-1 et CR 10260	Selon EN 10027-2	≤ 16	> 16	≤ 63	> 40	≤ 80	> 63	≤ 100	> 80	≤ 150	> 100	≤ 250	> 250	≤ 400 ^c	≤ 100	> 100	≤ 250	> 150	> 250
S235JR	1.0038	235	225	215	215	215	215	215	195	185	175	-	360 à 510	360 à 510	350 à 500	340 à 490	-	-	-
S235J0	1.0114	235	225	215	215	215	215	195	185	175	-	360 à 510	360 à 510	350 à 500	340 à 490	-	-	-	-
S235J2	1.0117	235	225	215	215	215	215	195	185	175	165	360 à 510	360 à 510	350 à 500	340 à 490	330 à 480	-	-	-
S275JR	1.0044	275	265	255	245	235	225	215	205	-	-	430 à 580	410 à 560	400 à 540	380 à 540	-	-	-	-
S275J0	1.0143	275	265	255	245	235	225	215	205	-	-	430 à 580	410 à 560	400 à 540	380 à 540	-	-	-	-
S275J2	1.0145	275	265	255	245	235	225	215	205	195	195	430 à 580	410 à 560	400 à 540	380 à 540	380 à 540	-	-	-
S355JR	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	-	-	510 à 680	470 à 630	450 à 600	450 à 600	450 à 600	-	-	-
S355J0	1.0553	355	345	335	325	315	295	285	275	-	-	510 à 680	470 à 630	450 à 600	450 à 600	450 à 600	-	-	-
S355J2	1.0577	355	345	335	325	315	295	285	275	265	265	510 à 680	470 à 630	450 à 600	450 à 600	450 à 600	450 à 600	450 à 600	450 à 600
S355K2	1.0596	355	345	335	325	315	295	285	275	265	265	510 à 680	470 à 630	450 à 600	450 à 600	450 à 600	450 à 600	450 à 600	450 à 600
S450J0 ^d	1.0590	450	430	410	390	380	380	-	-	-	-	550 à 720	530 à 700	-	-	-	-	-	-

Tableau 5: Les nuances existantes dans la base de données du spectromètre

1.0345	C 15
1.0401	C 22
1.0402	P255G1TH (St45.8)
1.0405	P265GH (H II)
1.0425	P285GH (H III)
1.0435	C 22.8
1.0460	P295GH (17Mn4)
1.0481	P310GH (19Mn5)
1.0482	C 35
1.0501	C 35 Pb
1.0502	C 45
1.0503	C 45Pb
1.0504	P355NL1; TStE 355
1.0566	S 355J2G3; St 52-3
1.0570	C 60
1.0601	15S10
1.0710	9SMn28; 11SMn30
1.0715	9SMnPb28; 11SMnPb30
1.0718	10S20
1.0721	10SPb20
1.0722	15S20; 15S22
1.0723	9SMn36; 11SMn37
1.0736	9SMnPb36; 11SMnPb37
1.0737	QStE 380 TM; S380MC
1.0978	20Mn5
1.1133	C35E; Ck35
1.1181	C45E; Ck 45
1.1191	X210Cr13
1.2080	45CrMoV7
1.2328	X38CrMoV5-1
1.2343	

I.5.11 Les principes de désignation des aciers selon la norme EN 10027-1-2 [7]

La désignation des aciers selon la norme européenne EN 10027 distingue cinq (05) principaux types d'aciers :

I.5.11.1 Les aciers non-alliés, ou acier au carbone :

- Les aciers non-alliés d'usage général (« aciers à ferrer les ânes »),
- Les aciers non-alliés spéciaux (pour traitement thermique, malléables, soudables, forgeables, ...);
- Les aciers faiblement alliés ;
- Les aciers fortement alliés (au moins un élément a une teneur supérieure ou égale à 5 %), essentiellement les aciers inoxydables ;
- Les aciers rapides, qui gardent la trempe à haute température, donc qui restent durs malgré un échauffement ; ils sont essentiellement utilisés comme aciers à outils (foret, fraises, anciens outils d'usinage).

I.5.11.2 Les aciers ont deux désignations :

- **Une désignation symbolique**, selon la catégorie à laquelle ils appartiennent, et qui rappelle leurs caractéristiques principales ;
- **Une référence numérique**, par exemple, les aciers de construction générale sont en 1.00xx, les aciers inoxydables sont en 1.4xxx, ...
Pour la désignation symbolique, la lettre G en début de désignation indique un acier moulé, p. ex. GS235, G35NiCrMo16, GX2CrNiMo18-10.

I.5.11.3 Aciers non-alliés d'usage général (groupe 1) :

Principes de désignation symbolique des aciers selon la norme EN 10027-1-2

I.5.11.4 Désignation symbolique :

Une première lettre indique leur usage (les plus courants sont S et E) :

- B : fers à béton ;
- D : produits plats pour formage à froid (autres que H) ;
- E : pour construction mécanique ;
- H : produits plats pour formage (tôles laminées à plier, à emboutir) ;
- M : aciers magnétiques ;
- P : pour appareil de pression ;
- R : sous forme de rails ;
- S : pour construction (structure) ;
- T : aciers pour emballage (fer blanc, fer noir, fer chromé) ;
- Y : pour béton précontraint.

Puis, suit la limite d'élasticité en méga Pascals ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2 = 0,1 \text{ daN/mm}^2$ [3]). Par exemple, le S235 est un acier non-allié pour construction de limite élastique 235 MPa

D'autres symboles peuvent compléter la désignation selon les particularités :

- J, K, L + lettre ou chiffre : énergie de rupture (résilience) garantie
- J : énergie de rupture de 27 J/cm^2 garantie :
- JR : énergie de rupture de 27 J/cm^2 garantie à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (*température ambiante*),
- JO : énergie de rupture de 27 J/cm^2 garantie à $0 \text{ }^\circ\text{C}$,
- J2 : énergie de rupture de 27 J/cm^2 garantie à $-20 \text{ }^\circ\text{C}$,
- ... J6 : énergie de rupture de 27 J/cm^2 garantie à $-60 \text{ }^\circ\text{C}$;
- K : énergie de rupture de 40 J/cm^2 garantie (KR, KO, K2, ..., K6) ;
- L : énergie de rupture de 60 J/cm^2 garantie (LR, LO, L2, ..., L6) ;

I.5.11.5 Premier groupe de symboles additionnels :

G : autres caractéristiques
G1 : non calmé,
G2 : calmé,
G3 : recuit de normalisation,
G4 : état de livraison libre,
GH : avec caractéristiques mécaniques spécifiées à température élevée (*heat*),
M : formage thermomécanique,
N : laminé ou laminage normalisant,
Q : trempé et revenu ;

I.5.11.6 Deuxième groupe de symboles additionnels :

C : formage à froid spécial,
D : galvanisé,
F : forgeage,
H : profil creux
L : pour application à basse température (*low temperature*),
M : formage thermomécanique,
N : laminé ou laminage normalisant,
O : pour applications en haute mer (*offshore*),
Q : trempé et revenu,
S : pour construction navale,
T : sous forme de tube ;
W : résistant à la corrosion Atmosphérique (*weather*).
Peuvent suivre des symboles précédés d'un signe + (plus) :

I.5.11.7 Symboles indiquant des exigences spéciales :

C : gros grains (*coarse grains*),
F : grains fins (*fine grains*),
H : trempabilité,
Z15, Z25, Z35 : propriétés garanties dans le sens de l'épaisseur, striction minimale de 15, 25 ou 35 % ;

I.5.11.8 Symboles indiquant un revêtement :

A : aluminium, par immersion à chaud,
CU : cuivre,
JC : revêtement inorganique,
OC : revêtement organique (*organic coating*),
Z : galvanisation (zinc),
ZE : revêtement électrolytique de zinc,
SN : revêtement de nickel et de zinc ;

Symboles indiquant une condition de traitement (aciers du groupe S uniquement)

A : recuit d'adoucissement (*annealing*),

C : écroui à froid (*cold hardening*),

CR : laminé à chaud (*rolling*), écroui à froid,

S : traitement pour cisailage à froid (*shear*).

Par exemple, le S235 JR a une énergie de rupture garantie de 27 J/cm² à 20 °C tandis que le S235JO a une énergie de rupture garantie de 27 J/cm² à 0 °C.

La désignation commence par un G s'il s'agit d'une pièce moulée. Par exemple, le GS235 JR est un acier S235 JR moulé.

➤ **Désignation numérique**

Aciers de base : la désignation est du type 1.00xx ou 1.90xx ;

Aciers de qualité : 1.01xx à 1.07xx et 1.91xx à 1.97xx ;

Aciers spéciaux : 1.10xx à 1.13xx,

Aciers à outil : 1.15xx à 1.18xx.

I.5.11.9 Aciers non-alliés spéciaux (groupe 2.1) :

La désignation commence par un C, puis suit le pourcentage massique de carbone multiplié par 100. Par exemple, le C35 est un acier non-allié avec $35/100 = 0,35$ % de carbone.

On peut ajouter une lettre donnant des précisions :

E : contient du soufre pour améliorer l'usinabilité ;

C : acier pour formage ;

S : acier pour ressort;

K : acier pour clavette.

Par exemple : C35 E.

I.5.11.10 Aciers faiblement alliés (groupe 2.2) :

Certains aciers de ce groupe sont considérés comme « non-alliés » :

— Aciers de décolletage ;

— Aciers avec une teneur de manganèse supérieure à 1 %.

➤ **Désignation symbolique**

On indique la teneur en carbone, puis la liste des éléments (selon les symboles chimiques standards), par ordre de teneur décroissante, puis les teneurs multipliées par un facteur (puisque ces teneurs sont faibles) ; le facteur dépend de l'élément.

Tableau 6: Facteur pour les aciers faiblement alliés

Élément d'addition	coefficient
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1 000

Par exemple : le 36NiCrMo16 (anciennement 35NCD16) contient $36/100 = 0,36$ %m de carbone, $16/4 = 4$ %m de nickel, ainsi que du chrome et du molybdène.

➤ **Désignation numérique**

— 1.50xx à 1.84xx

I.5.11.11 Aciers fortement alliés (groupe 2.3) :

Au moins un élément a une teneur supérieure à 5 %.

➤ **Désignation symbolique**

On commence par un X, suit la teneur en carbone, puis la liste des éléments et les teneurs des éléments principaux.

Par exemple, le X2CrNiMo18-10 est : acier fortement allié, contenant environ 0,02% de carbone, contenant environ 18 % de chrome, et 10 % de nickel, contenant également du molybdène.

➤ **Désignation numérique**

— Aciers inoxydables : 1.40xx, 1.41xx, 1.43xx à 1.46xx ;

— Aciers réfractaires : 1.47xx, 1.48xx ;

— Avec propriétés à températures élevées : 1.49xx.

I.5.11.12 Aciers rapides (groupe 2.4) :

➤ **Désignation symbolique**

On commence par HS (*high speed*), puis suit les teneurs en %m en tungstène, molybdène, vanadium et cobalt. Ils contiennent tous au moins 0,7 % de carbone ainsi que 4 % de chrome, ces teneurs ne sont donc pas indiquées.

Par exemple, le HS2-9-1-8 contient environ 2 %m de tungstène, 9 %m de molybdène, 1%_m de vanadium et 8 %m de cobalt (et 0,7 % de carbone, 4 % de chrome).

➤ **Désignation numérique**

- 1.32xx : avec Co ;
- 1.33xx : sans Co.

I.5.11.13 Aciers à outils (autres qu'aciers rapides) :

Les aciers à outils sont des aciers trempés, faiblement ou fortement alliés.

➤ **Désignation numérique**

- 1.20xx : au Cr ;
- 1.21xx : au Cr et au Si, Mn ou Mn-Si ;
- 1.22xx : au Cr et au V, V-Si ou V-Mn-Si ;
- 1.23xx : au Cr-Mo, Cr-Mo-V ou Mo-V ;
- 1.24xx : au W ou Cr-W ;
- 1.25xx : au W-V ou Cr-W-V ;
- 1.26xx : au W, en dehors des nuances dans les séries 1.24xx et 1.25xx ;
- 1.27xx : au Ni ;
- 1.28xx : autres.

Partie Pratique

II. Partie Pratique

II.1 Matières première :

L'acier S355J2+N est réceptionné sous forme de rond plein de diamètre $\Phi=105\text{mm}$ et de longueur $L=6$ mètres.

La désignation symbolique, est définie ci-dessous :

S : Acier de construction ;

355 : Limite élastique minimale ;

J : exigences sur la résilience ;

2 : exigences sur la résilience à température $T=-20^{\circ}\text{C}$ (à l'essai Charpy, on doit avoir une énergie minimale de rupture de 27J à $T=-20^{\circ}\text{C}$) ;

N : recuit finale de normalisation.

La Figure 24 suivante montre le type d'éprouvettes qu' on a sciée en trois fois(03) pour la réalisation des essais mécaniques ; Ces pièces sont extraites d'un rond plein pour éprouvettes de résilience.



Figure 20: Eprouvettes sciées en trois fois pour les essais mécaniques ; b. pièce extraite d'un rond plein pour éprouvettes de résilience.

II.2 Techniques utilisées

II.2.1 Appareillages :

Les différentes machines et appareillages utilisés pour la réalisation de notre travail :

II.2.1.1 Tour Automatique :

C'est une machine avec laquelle on réalise des pièces simple ou complexe soit avec enlèvement de matières ou pas, avec aussi des réglages des paramètres programmable adéquat.

On a réalisé nos éprouvettes pour l'essai de traction à partir d'un arbre de 105mm de diamètre sur le Tour présenté sur la Figure 21.



Figure 21: Vue générale du tour automatique

La Figure 22 : montre le moment de la réalisation d'une éprouvette pour l'essai de traction suivant la Norme.



Figure 22: Tour lors de la réalisation d'une éprouvette pour l'essai de Traction

II.2.1.2 Polisseuse :

Est un appareil qui nous permet de réaliser la préparation des surfaces des éprouvettes par enlèvement de matières avec lubrification en eau, en coulée continue, on utilise du papier à verre EMERI avec des grandeurs de grains par papier qui varie d'une manière décroissante de (P120 ; P240 ; P400 ; P800 ; P1000 ; P2000 ; P2500), feutre.

On a eu deux(02) machines polisseuse au Laboratoire Sciences Des Matériaux (SDM) de l'UMMTO, que nous avons utilisé pour préparer nos échantillons :

- La première : a deux (02) vitesses de rotation du plateau qui sont : 75(tr/s) et 150(tr/s)(voir la Figure 23)



Figure 23: Polisseuse à deux vitesses de rotation du plateau : 75(tr/s) et 150(tr/s)

- ✚ La deuxième Polisseuse a deux vitesses de rotation du plateau : 150(tr/s) et 300(tr/s) voir la Figure 24 . (Plus récente)



Figure 24: Polisseuse à deux vitesses de rotation du plateau : 150(tr/s) et 300(tr/s)

II.2.1.1 Attaque chimique

La Composition chimique du NITAL conseillée par la Norme pour l'attaque de la surface de nos échantillons pour la mise en évidence des différentes phases.(voir la Figure.29)



Figure 25: Produit d'attaque chimique « le Nital »

Notre matériau est un acier dont l'attaque chimique se fait avec le NITAL de composition chimique :

1 à 4% de HNO_3

Et, le Reste $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ a appliqué à froid pendant 45s.

Le réactif Nital est une solution alcoolique nitrique utilisée pour la réalisation de macrographie sur les aciers au carbone non alliés et faiblement alliés. La solution est constituée de **2 à 5 ml d'acide nitrique (concentration 60% à 70%) et de 95 à 98 ml d'éthanol pur** (Figure 25)

Le **Nital** est une solution d'acide nitrique et d'alcool couramment utilisée pour l'attaque chimique des métaux ferreux. Il est particulièrement adapté pour révéler la microstructure des aciers au carbone. L'alcool peut être du méthanol, de l'éthanol ou des spiritueux méthyloxy.

Les mélanges d'éthanol et d'acide nitrique sont potentiellement explosifs. Cela se produit généralement par dégagement de gaz, bien que du nitrate d'éthyle puisse également se former. Le méthanol n'est pas susceptible d'explosion mais est toxique.

Une solution d'éthanol et d'acide nitrique devient explosive si la concentration d'acide nitrique dépasse 10 % (en masse). Les solutions supérieures à 5 % ne doivent pas être stockées dans des conteneurs fermés car l'acide nitrique continue à agir comme un oxydant dans des conditions diluées et froides.

Tableau 8: Les réactifs de l'attaque chimique selon le matériau à observer.

Matériau à observer	Réactif approprié	Composition	emploi
Aciers et fontes	Nital	1 à 4 % de HNO ₃ Reste C ₂ H ₅ OH	à froid pendant 45s
	Picral	40 g d'acide picrique 1 litre de C ₂ H ₅ OH	à froid
Cuivre et alliages	Eau oxygénée ammoniacale	94 % de NH ₄ OH 3 % de H ₂ O ₂ 3 % de H ₂ O	à froid
Aluminium et alliages	Réactif de Keller	0.5 % de HF 1.5 % de HCL 2.5 % de HNO ₃ 100 cm ³ de H ₂ O	à froid
Zinc et alliages	Réactif de Palmerton	5 cm ³ d'acide chromique 95 cm ³ de H ₂ O	à froid

II.2.1.1 Microscope Optique :

C'est un dispositif d'observation microscopique des surfaces de matériaux voulus, après avoir réalisé une attaque chimique sur la surface polie miroir à visualiser.

Il possède des lentilles d'agrandissement qui varié de (GX40, GX100, GX200, et GX400,...etc.), qui nous permettent de voir la structure et les grains de l'acier (voir la Figure.26)



Figure 26: Microscope Optique utilisé.

II.2.1.2 Machine de Traction SHIMADZ:

La Machine de Traction SHIMADZ qu'on a utilisée pour préparer nos éprouvettes, est une machine hydraulique avec commande numérique programmable (Figure 27), avec deux(02) mores, un qui est mobile et l'autre fixe, ou, on fixe notre éprouvette normalisée sur ces mores.



Figure 27: Machine de Traction SHIMADZ utilisée.

II.2.1.2.1 Module d'élasticité longitudinale E (MPa)

Il caractérise la pente de la droite de proportionnalité précédente donc l'élasticité du matériau testé. Plus E est grand, plus le matériau est rigide et inversement

II.2.1.3 Loi de Hooke

Cette loi, ou équation de la droite OA, traduit la proportionnalité précédente σ (MPa), E (MPa) et ϵ sans unité.

II.2.1.3.1 Limite élastique R_e (MPa)

Elle marque la fin du domaine élastique (au point A). Pour les valeurs supérieures le matériau ne se déformé plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ces dimensions initiales après « déchargement », il subsiste un allongement permanent soit un phénomène de rémanence).

II.2.1.3.2 Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ (MPa)

On utilise cette détermination pour les courbes de traction où le palier de fin de limite élastique n'apparaît pas nettement. Pour la mesure de R_e , on tolère une légère déformation permanente de 0,2% ($A\%=0,2$).

II.2.1.3.3 Limite maximale R_m (MPa)

C'est la contrainte maximale que peut supporter le matériau avant d'atteindre la zone de striction. Utilise dans le calcul des organes de sécurité. Souvent appelée résistance à la rupture (voir la Figure 28).

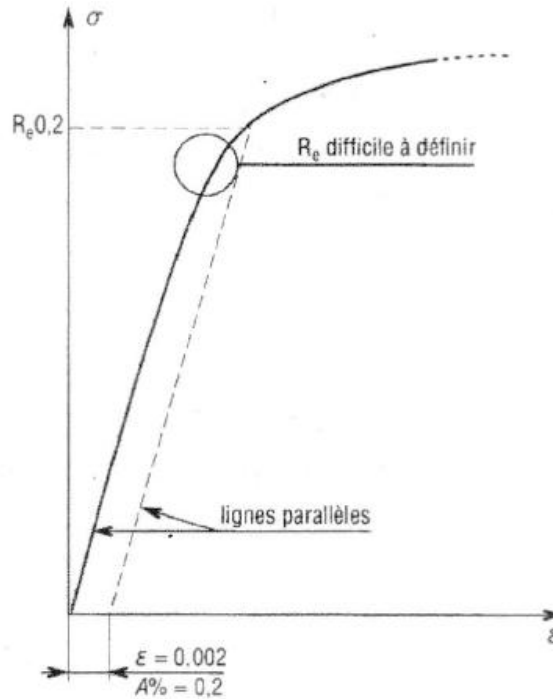


Figure 28: Détermination graphique de $R_{e0,2}$

II.2.1.4 Phénomène d'écrouissage

Surtout employé en compression, il permet d'augmenter la limite élastique d'augmenter la limite élastique R_e sans modifier la résistance à la rupture R_r . Dans un premier temps le matériau est déformé plastiquement avant point de striction, chemin OB. Au relâchement le « déchargement » se fait suivant la droite BO' parallèle à OA. Après remise en charge, la nouvelle courbe caractéristique du matériau est devenue O'BC avec R_{eb} comme nouvelle limite élastique.

II.2.1.5 Courbes de traction de divers matériaux

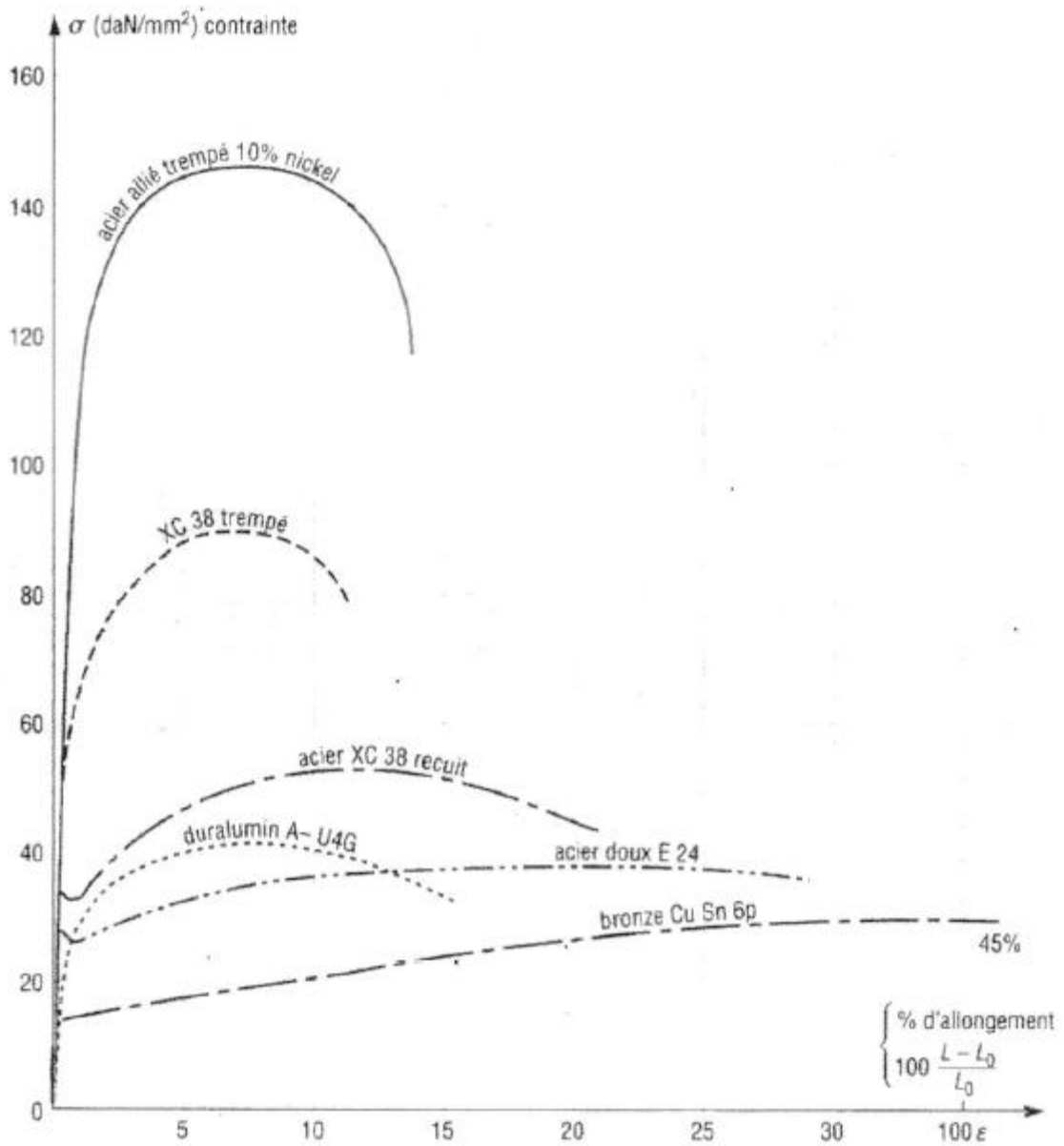


Figure 29: Courbes de traction de divers matériaux.

II.2.2 Essais de Traction

La Figure 30 ci-dessous montre les neufs (09) éprouvettes qu'on a utilisé pour l'essai de traction.

On a les trois zones d'étude cœur ; milieu ; surface tel présenter dans la Figure suivante :

II.2.2.1 Eprouvettes de l'essai

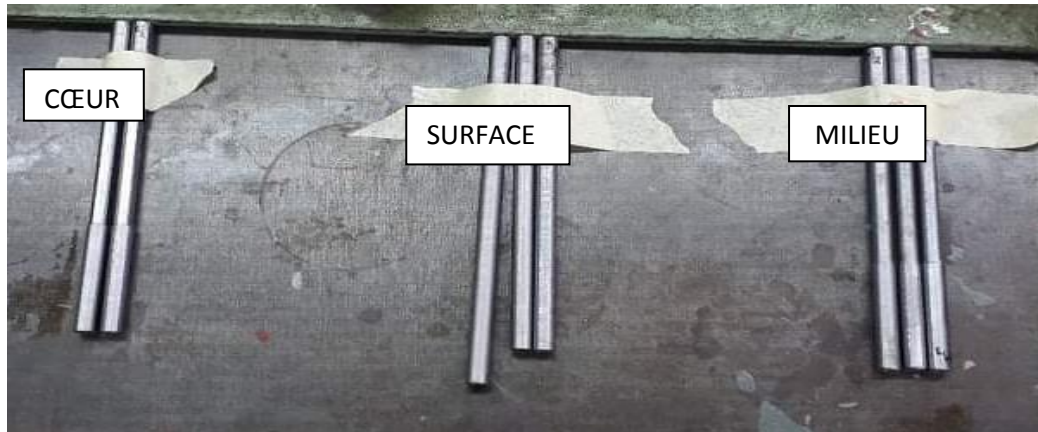


Figure 30: Les neufs (09) éprouvette de l'essai de Traction. (Annexe 10 et 13)

On a trois(03) zones d'étude le cœur ; le milieu et la surface telle présenter dans la Figure 31 suivante :

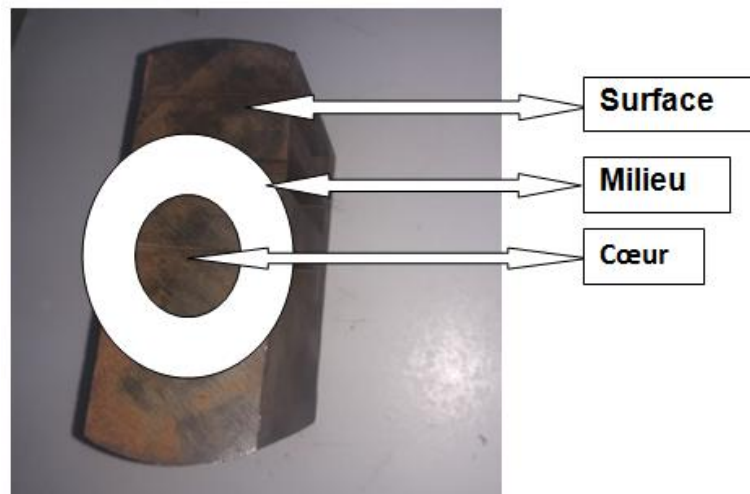


Figure 31: Localisation de zones étudiées surface, milieu et cœur.

II.2.3 Norme sur l'essai

Les Normes qui doivent être utilisées sont :

- la Norme **ISO 6892-1:2019**, *Matériaux métalliques — la méthode d'essai de traction des matériaux métalliques et définit les caractéristiques mécaniques qui peuvent être déterminées à température ambiante.*
- La Norme **ISO 7500-1**, *Matériaux métalliques — Étalonnage et vérification des machines pour essais statiques uni axiaux — Partie 1: Machines d'essai de traction/compression — Étalonnage et vérification du système de mesure de force*
- La Norme **ISO 9513**, *Matériaux métalliques — Étalonnage des chaînes extensométrique utilisées lors d'essais uni axiaux*

Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquées dans le matériau à tester), cylindrique ou parallélépipédique (plate), deux actions mécaniques et opposées qui vont la déformer progressivement, puis, la rompre.

II.2.4 Principe d'un essai de Traction [8]

Le principe d'un essai de Traction consiste à soumettre une ou plusieurs éprouvettes prélevées de l'arbre en acier à un effort de Traction que l'on fait croître progressivement à vitesse bien définie et calculer (spécifique à chaque géométrie de l'éprouvette)

Les variations des longueurs sont enregistrées en fonction de l'effort qui lui est appliqué jusqu'à sa rupture.

La machine de Traction est composée d'un système de mâchoires mobiles qui impose une déformation croissante à l'éprouvette et d'un système dynamométrique (inexistant dans notre cas) qui mesure la force nécessaire.

Un enregistreur relié à la machine permet de tracer la force appliquée en fonction de l'allongement de l'éprouvette.

II.2.5 Caractéristiques de Traction

La Figure 32 ci-dessous donne le Diagramme conventionnelle de Traction d'un matériau ductile (comportement élastoplastique) et la Figure 33 ci-dessous donne le déroulement de l'essai de Traction par l'évolution de l'allongement et la striction de l'éprouvette.

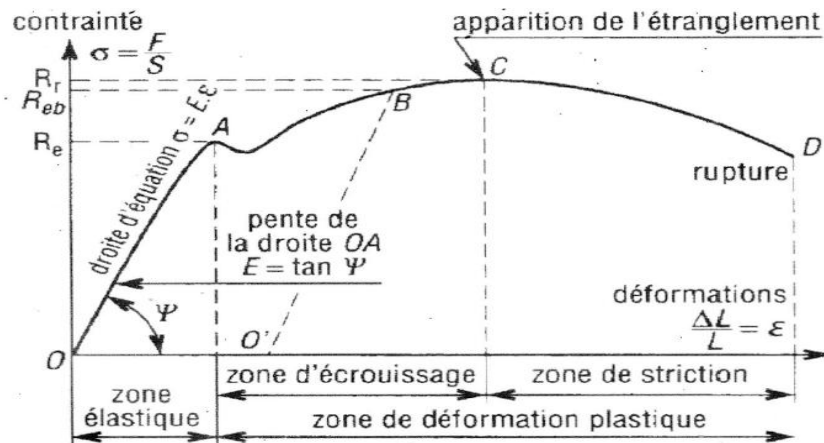


Figure 32: Diagramme conventionnelle de Traction.

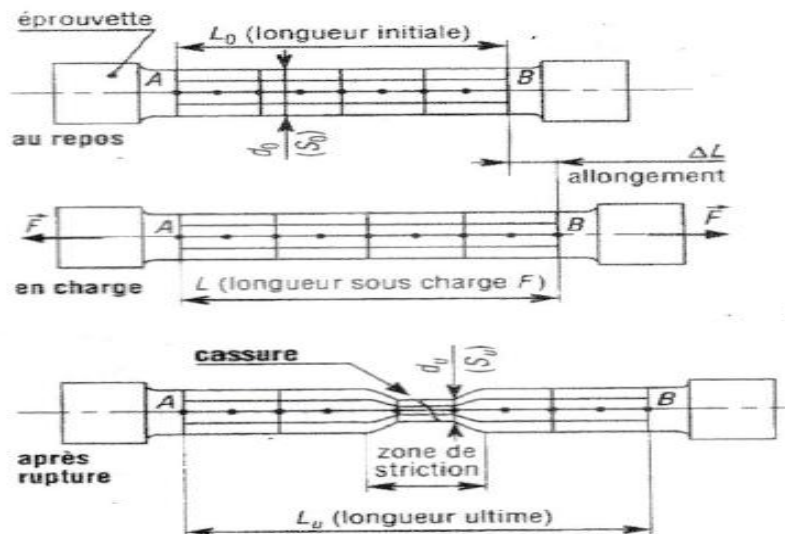


Figure 33: Evolution de l'allongement et la striction de l'éprouvette en Traction.

Dans la partie

OA : Linéarité entre la contrainte appliquée et le déplacement.

Dans la partie

AB : L'allure n'est plus linéaire, elle dépend de la nature du matériau.

BC : Zone de striction.

En B : Localisation de la striction au milieu de l'éprouvette.

Entre O et B : La déformation est homogène.

Entre BC : La déformation localisée.

A : Re : La limite élastique.

B : Rr : La résistance à la rupture.

C : Rc : Charge ultime.

Les équations utilisées pour le calcul des différents paramètres de l'essai de Traction :

$$Re = \frac{F}{S_0} \left(\frac{KgF}{mm^2} \right) \quad (8)$$

$$A\% = 100 X \frac{L-L_0}{L_0} \quad (9)$$

L_0 : Allongement initial de l'éprouvette entre repères ;

L_u : Longueur après rupture ;

En ordonné, charge unitaire

$$Re = \frac{F}{S_0} \quad (10)$$

Coefficient de striction :

$$\epsilon\% = 100 X \frac{S_a - S_u}{S_u} \quad (11)$$

S_u : Section après rupture

S_0 : Section initiale

II.2.5.1 Déformation élastique et module d'élasticité :

La première portion de la courbe correspondant au début de la déformation est linéaire, il y'a proportionnalité entre la charge et la déformation (loi de Hooke) et la pente de cette droite représente le module d'élasticité

$$E = \sigma / \epsilon \quad (12)$$

L'essai de traction n'est pas assez précis pour la mesure du module d'élasticité à cause des parasites et des écarts à la loi de proportionnalité. Les écarts sont attribués à des microdéformations plastiques pour les aciers doux, et à des contraintes résiduelles pour certains aciers traités qui conduisent à une plastification progressive de l'éprouvette.

II.2.5.2 Contraintes élastiques :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (13)$$

E : Module d'élasticité

G : Module de cisaillement

Pour les aciers $\nu = 0,3$ avec ν : coefficient de Poisson

II.2.5.3 Limite d'élasticité

La Figure 34, montre un Diagramme de mise en évidence de la difficulté du calcul du module de Young (E)



Figure 34: Diagramme de mise en évidence de la difficulté du calcul E

Dans la courbe 2 ; le passage entre les domaines élastique et plastique est souvent difficile à mettre en évidence. On est donc amené à définir une limite d'élasticité conventionnelle dite à 0,2 ou 0,02 noté ($Re_{0,2}$ ou $Re_{0,02}$) mesurée à l'intersection de la courbe $R = f(A)$ et dont l'abscisse à l'origine est 0,2% ou 0,02%.

Re et E : sont exprimés en MPa. Avec $1\text{MPa} = 1\text{N/mm}^2$

$$A\% = 100 \times \frac{L-L_0}{L_0} \quad (14)$$

$$\%A_t = \%A_r + \%A_z \quad (15)$$

A_r : Allongement repartit jusqu'au point de striction

A_z : Allongement localisé de striction

L'allongement dépend donc de la forme et des dimensions de l'éprouvette car A_r dépend de la longueur de l'éprouvette et A_t dépend de la section. Afin de pouvoir comparer des allongements à la rupture, il faut respecter les règles de similitude, à cet effet on utilise des éprouvettes dites proportionnelles. Les Normes définissent le rapport (Petites éprouvettes et cylindrique)

$$K = \frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 5,65 \quad (16)$$

Les têtes sont fixées dans les mâchoires, leurs sections sont supérieures de celle de l'éprouvette proprement dite de telle façon à ce qu'elles ne subissent pas de déformation plastique lors de la Traction.

II.2.5.4 Courbe de Traction Rationnelle

Les courbes $\sigma = f(A\%)$ qui ont été présentées ne tiennent pas compte de la diminution de la section de l'éprouvette au cours de la Traction.

La contrainte vraie $\sigma = \frac{F}{S}$ ou S est la section instantanée, il faut également changer l'expression de l'allongement.

Soit L : Longueur de l'éprouvette à un instant donné

Si, on allonge l'éprouvette d'une quantité ΔL , l'allongement relatif sera : $\frac{\Delta L}{L}$ et l'allongement total sera

$$\epsilon = \sum_{L_0}^L \frac{\Delta L}{L} \quad (17)$$

Ou, si on considère des allongements infiniment petits.

$$\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = L n \frac{S_0}{S} \quad (18)$$

Conservation de volume

$$L_0 S_0 = L S \quad (19)$$

$$\%A = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (20)$$

$$\epsilon = L n \left(1 + \frac{A}{100}\right) \quad (21)$$

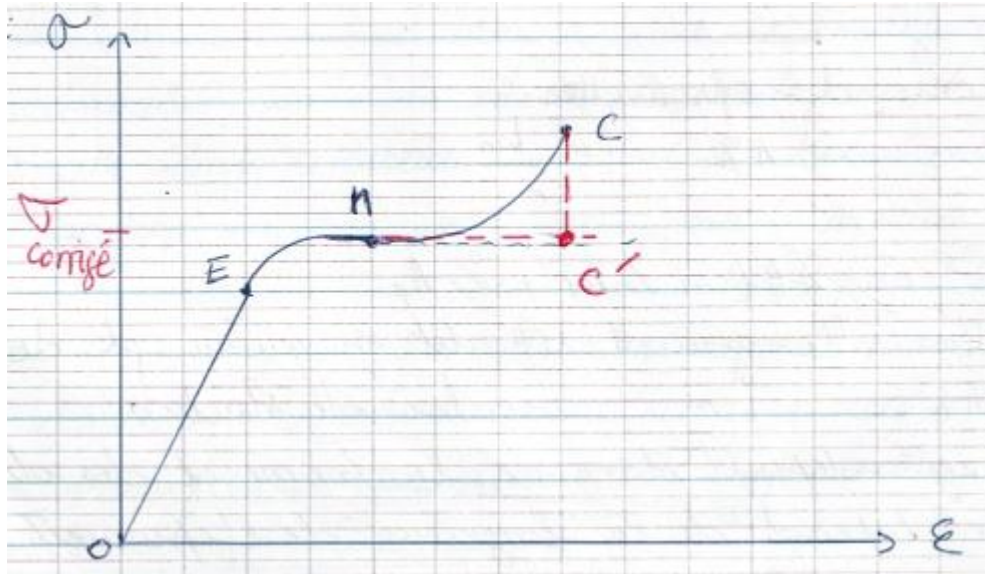


Figure 35: La courbe rationnelle.

OE est superposable à OA

M correspond au point de striction C

Pour la partie élastique, il n'y a de différence avec le tracé ordinaire car les déformations sont petites.

Entre E et M (M change maximale), la courbe a une forme parabolique.

Au-delà de M jusqu'en C : l'existence de la striction complique le calcul de la contrainte vraie car il faut tenir compte de l'effet de la concentration de contrainte.

La formule de BRIGDMON permet de faire la correction :

$$\sigma_{\text{corrigé}} = \sigma \left(1 + \frac{2R}{a} \right) \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \quad (22)$$

.a : rayon de la section minimale (au fur et à mesure qu'on déforme)

R : rayon de courbure de la zone de la striction après la correction (voir la coupe pour C', on a $a_{\text{corrigé}}$)

II.2.5.4.1 Equation de la courbe rationnelle, coefficient d'écroissage

La portion parabolique EM peut-être mise sous forme mathématique, l'expression la plus utilisée est la parabole généralisée de la forme :

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (23)$$

σ_0, K, n : constants

n : coefficient d'écroissage

Pour les aciers doux :

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (24)$$

On peut montrer facilement à la charge maximale

$$\sigma_m = Kn^n \quad (25)$$

$$R = K \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad (26)$$

e : Base des logarithmes et népériens

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (27)$$

II.2.5.4.2 Courbe de contraintes et déformation

Pour un grand nombre de matériaux, comme les alliages, les courbes obtenues présentent une zone, appelée domaine élastique ou le graphe est une droite (segment OA). Pour tous les points de cette droite, la déformation (ou l'allongement) est proportionnelle à la contrainte et le matériau se déforme élastiquement. La Figure 36 ci-dessous donne les dimensions des éprouvettes de Tractions normalisées.

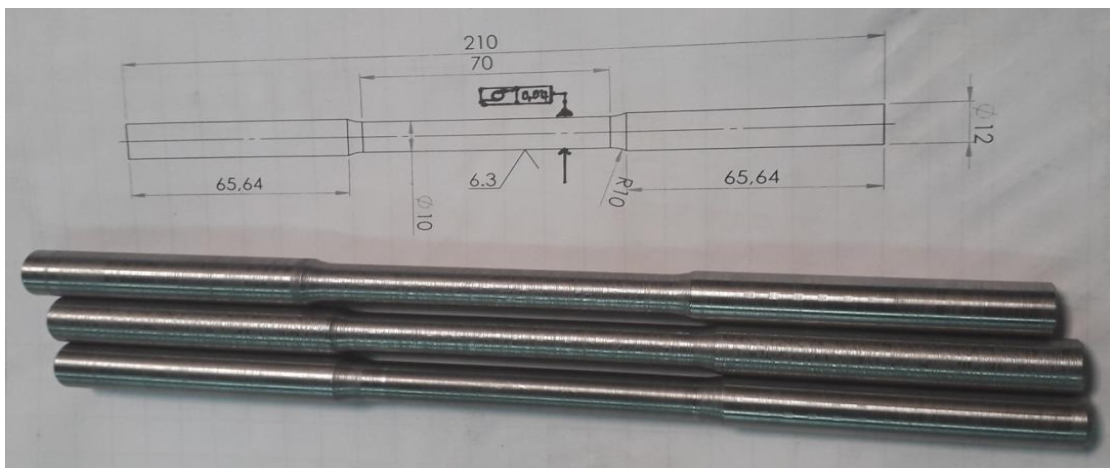


Figure 36: Dimensions des éprouvettes de Tractions normalisées.

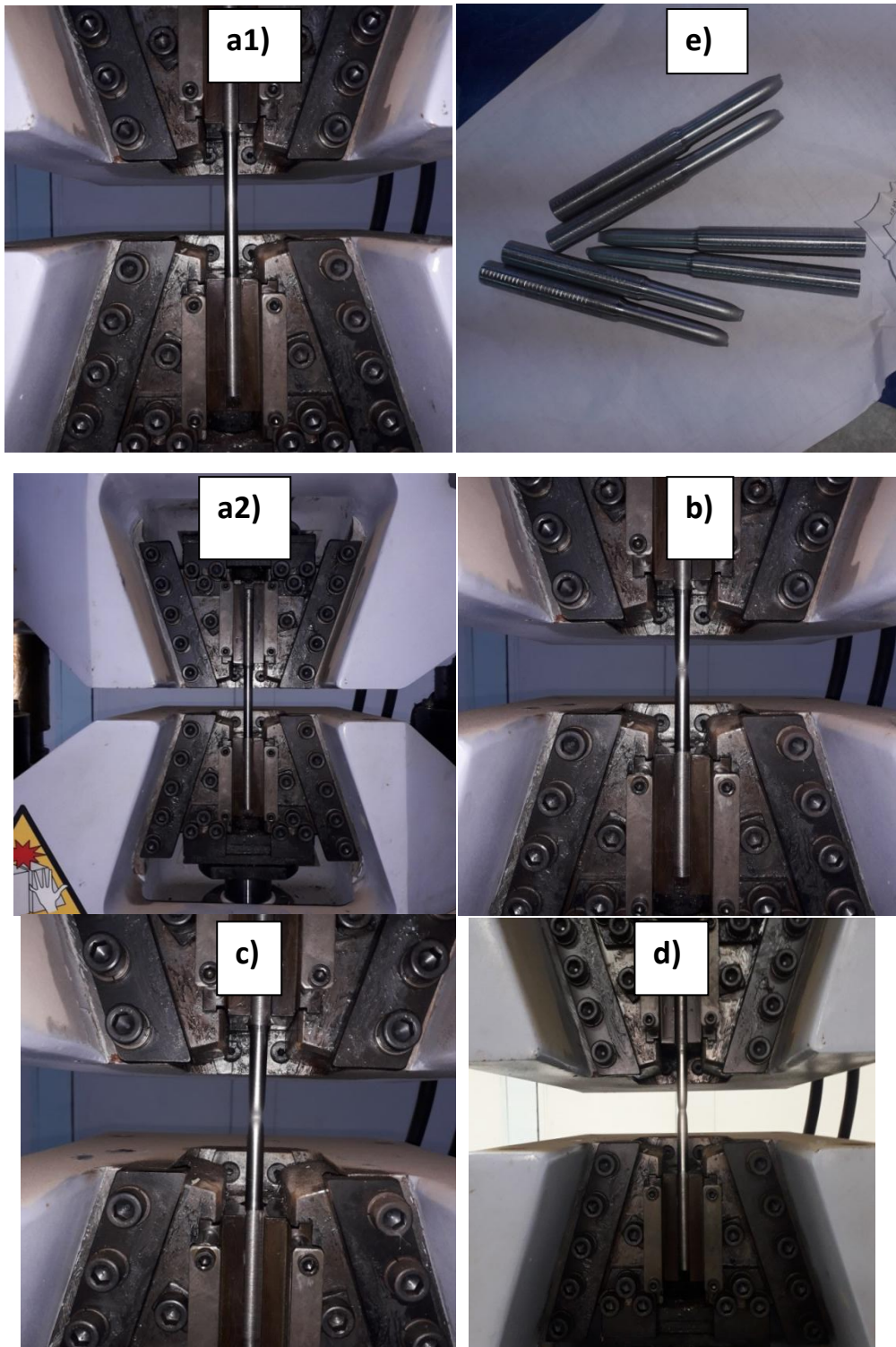


Figure 37: a1, a2) début de l'essai de traction ; b) début d'écroutissage ; c) la section de striction diminue ; d) Rupture ; e) éprouvettes après rupture

II.2.5.5 Calcul interprétation et résultats

On a

❖ **Contrainte conventionnelle**

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (28)$$

❖ **Déformation conventionnelle**

$$A = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (29)$$

II.2.5.6 Machine la ROBOFIL 200 CHARMILLES Technologie

Est une machine à commande numérique de coupe avec une grande précision (voir la Figure.38) qui est de 1/100mm, la coupe de ces pièces sont réalisées avec un fil en cuivre revêtu par du Tantale (connu pour sa résistance à l'usure, sa ténacité et sa résistance thermique) ; Le bain est rempli avec de l'eau distillée pour que le contact entre le fil qui est chargé positivement et la pièce à couper est chargée négativement.

On a préparé nos éprouvettes pour l'essai de résilience à l'aide de cette machine ROBOFIL200CHARMILLES Technologie



Figure 38: Machine ROBOFIL 200 CHARMILLES Technologie.

II.2.5.7 Le Mouton-Pendule (Mouton Charpy ZWICK 5101):

Est une machine à essai destructif avec laquelle, on réalise l'essai de résilience, qui nous permet de voir la ductilité ou la fragilité de notre matériau (acier dans notre cas) (voir la Figure.39).



Figure 39: Le Mouton Charpy ZWICK 5101

On a préparé les éprouvettes selon la Norme de cet essai et les conditions de déroulement ; dans notre cas, on a réalisé une coupe sur l'axe du rotor, puis, on a extrait trois(03) éprouvettes dans chaque zone, on utilisant la ROBOFIL (Figure.38 ci-dessus) pour donner la forme finale de la pièce (Figure.46).

Notre condition ultime dans cette essai c'est que nos éprouvettes doivent être à une température de -20°C lors de l'application de la charge ; d'où on a utilisé un congélateur de degrés inférieur à 0°C (Figure.49) et un thermocouple de mesure de température (Figure.50)

Avec le moutons-pendule Zwick 5101 :

- Sur des éprouvettes d'acier selon la Norme DIN 50115, ainsi que ISO R 83 et ISO R 148;

Le Tableau 9 donne les Données Techniques de la Machine ZWICK 5101 de résilience qu'on a utilisé pour réaliser nos essais de résilience.

Tableau 9: Données Techniques de la Machine ZWICK 5101 de résilience

Données techniques	
Numéro du modèle	Zwick 5101
Capacité de travail Valeurs unitaires	0...500/250/150/75 kpcm
Capacité de travail Valeurs unitaires	2/1/0,5 kpcm ou 0...50/25/15/7,5 Joule
Lecture	Cadran segmenté 160° avec aiguille et aiguille entraînée, diamètre du cadran 300 mm
Longueur du pendule Vitesse d'impact portée libre	390 mm 3,85 m/s 84 mm
Dimension de l'éprouvette Charpy	15X10, 6X4, 10X10, 6X6mm ² Distance entre butées 22/70mm 1/2" X 1/2" Distance entre butées 4"
Laquage	Vernis à battitures vert
Dimensions (Lxlxh)	440 X320 X900 mm ³
Poids	Brut environ : 150 Kg
Dispositif de climatisation pour les essais Charpy	Domaine de travail : - 50°C...+100°C Capacité maxi 30 éprouvettes. (petite barre standard 6x4x50mm) Thermostat à liquide Branchement : 220V, 50Hz, 2 kVA

La résilience de symbole général K, caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre. Ce risque est amplifié aux basses températures. Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (éprouvette sur deux appuis) ou Izod (éprouvette encastrée).

L'essai qui est un essai comparatif entre matériaux, mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester.

L'énergie absorbée par l'éprouvette (W) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre

Le début :

$$W_0 = P.h_0 \quad (30)$$

et, l'arrivée :

$$W_1 = P.h_1 \quad (31)$$

$$W = P.h_0 - P.h_1 = P.(h_1 - h_0) \quad (32)$$

La résilience est égale au rapport de W sur l'aire de la section au droit de l'entaille.

Deux cas :

$$K_{cu} \text{ ou } K_{cv} = \frac{W_0 - W_1}{S_0} \quad (33)$$

II.2.6 Les étapes de préparation de l'essai Charpy : [2]

- Étalonnage de l'appareil ;
- mettre la charge du pendule à 50 (J) (dans notre cas);
- les éprouvettes ont été au préalable à -20°C dans un congélateur a température négative dans un bain d'alcool pendant 24 heures ;
- une fois sortie du congélateur, l'éprouvette est placée sur le porte-échantillon
- on lâche le pendule sur l'éprouvettes normalisée ;
- puis on fait une lecture de la valeur de l'énergie de rupture de l'éprouvette sur le cadran de la machine (voir figure ci-dessous ;
- on calcule Kcv ou Kcu (voir Tableau.);
- Et on refait les mêmes étapes pour chaque éprouvette.

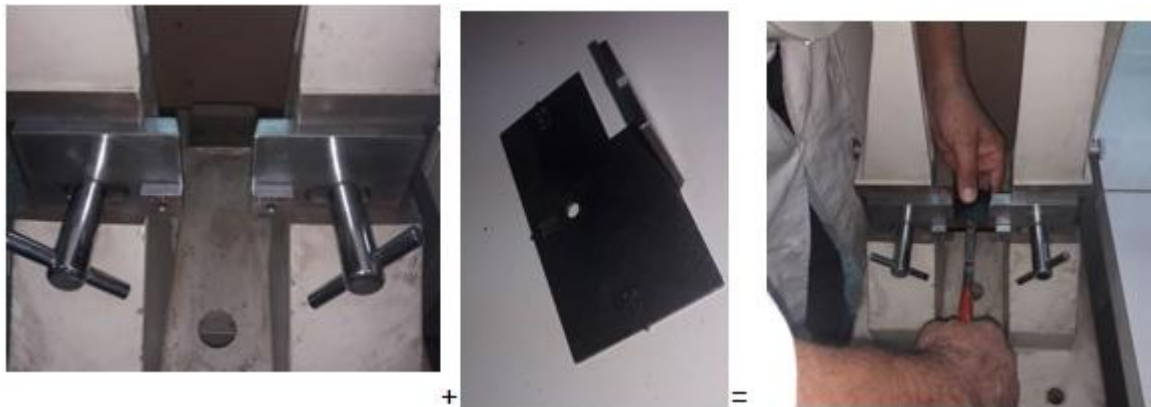


Figure 40: Le calibrage de l'éprouvette sur le porte échantillon pour que l'impact



Figure 41: Les étapes de l'essai : étalonnage de l'appareil, et placer le pendule charger à 50 (J) puis placer les éprouvettes qui sont à -20°C sortie du congélateur sur les portes échantillons.

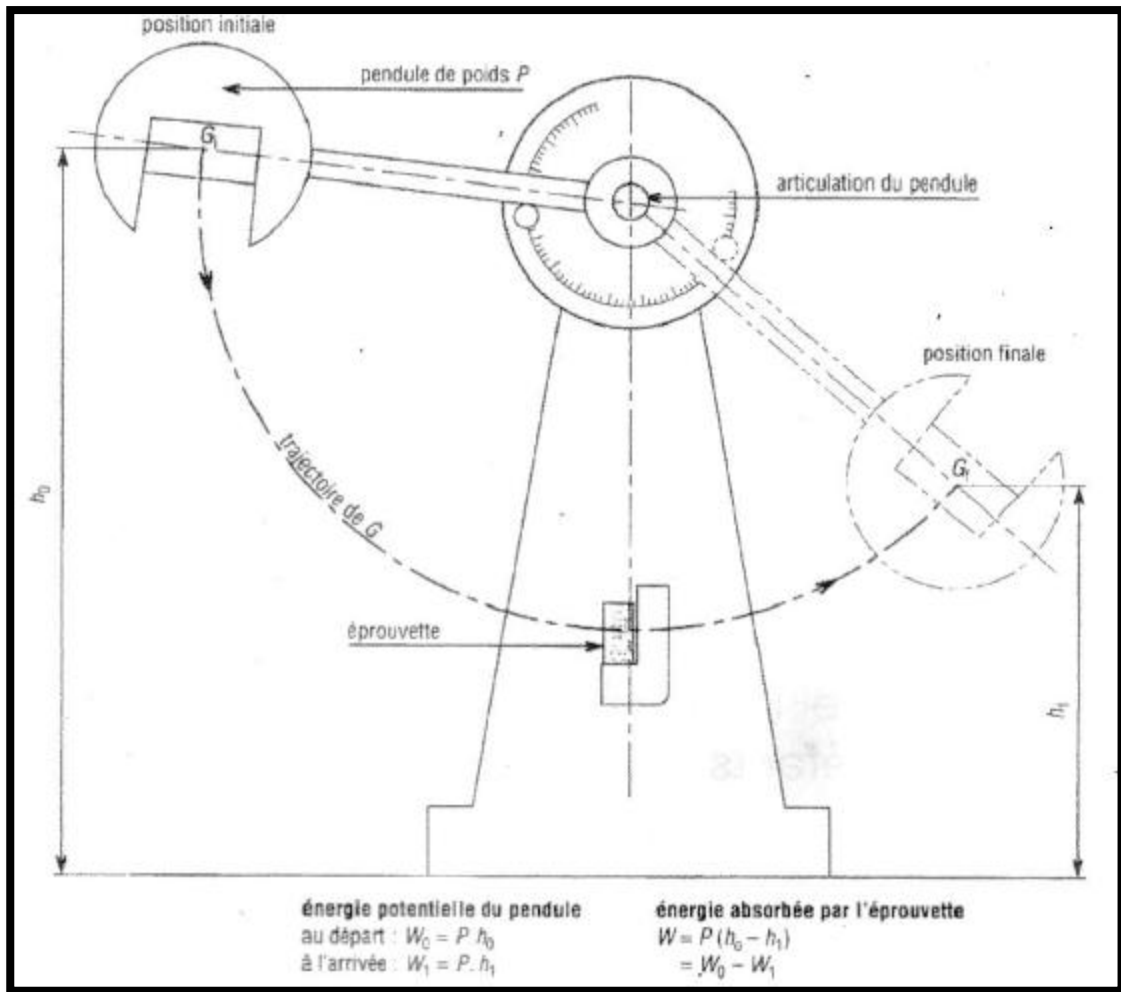


Figure 42: Le mouton de Charpy (Mouton-Pendule)

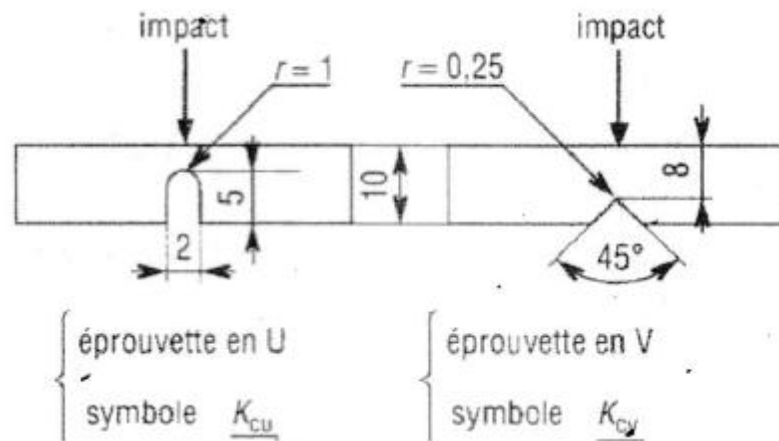


Figure 43: Norme de l'éprouvette soit en U ou Kcu ou en V pour le Kcv. [6]

Dans notre cas en utilise l'éprouvette en V pour calculer l'énergie Kcv

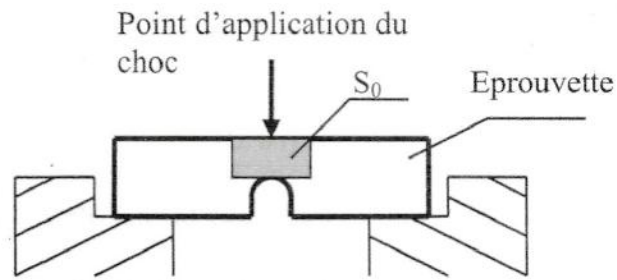


Figure 44: Le point d'application du choc sur l'éprouvette en la réglant avec l'outil de la figure ci-dessus

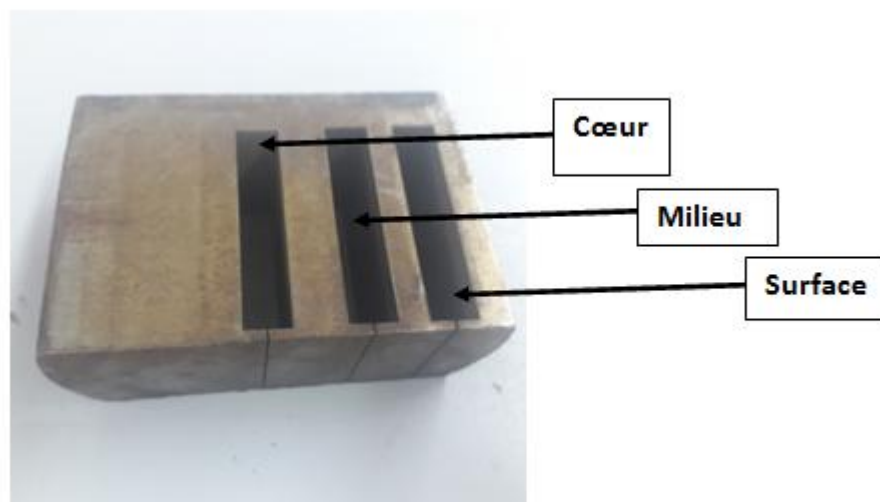


Figure 45: Bloc de l'arbre à partir du quel on a prélevé les éprouvettes de résilience (cœur, milieu, surface).

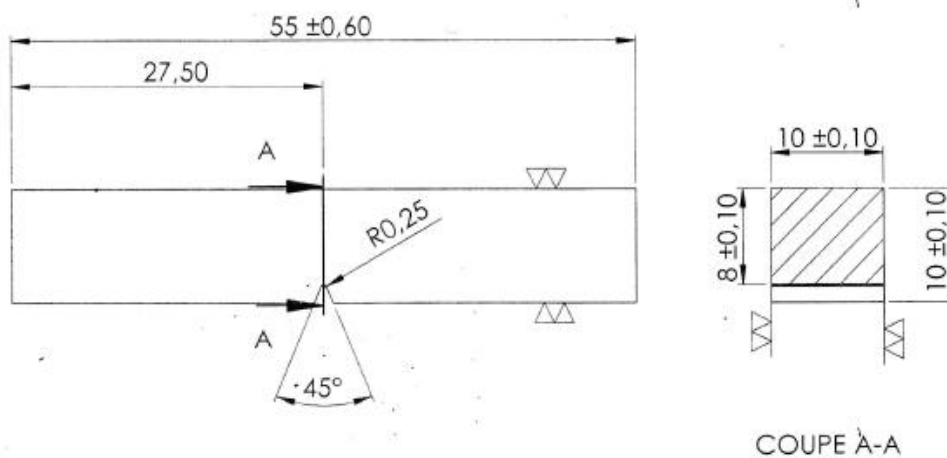


Figure 46: Les dimensions normalisées des éprouvettes de résilience

De la coupe A-A de la figure ci-dessus, on calcule la surface à rompre ; la surface est calculée comme suite :

$$S=L \times l \rightarrow S= 10 \times 8 \rightarrow S= 80 \text{ (mm}^2\text{)}$$

II.2.6.1 Le congélateur à température négative :

C'est un appareil industriel qui nous permet de stocker des échantillons et/ou des éprouvettes à des températures qui peuvent atteindre -50°C (dans notre cas, nos éprouvettes pour l'essai de résilience selon la Norme EF10025-2 :2004, ont été refroidie à -20°C pendant 24 heures) (voir la Figure.47)



Figure 47: Congélateur Aux Températures Négatives utilisé.

II.2.6.2 Thermocouple :

C'est un appareil qui nous permet de mesurer instantanément la température des liquides, gaz, et solides. (Figure.48)




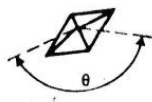
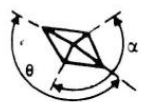


Figure 48: Le Thermocouple a température négatives et positives

II.2.7 Principe de l'essai de la dureté Vickers

Cet essai utilise un pénétrateur en diamant de forme pyramidale. La pyramide est droite à base carrée dont l'angle au sommet est de 136° (figure 6)

Tableau 10: Principe de l'essai de dureté Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop.

Pénétrateur	Brinell	Rockwell		Vickers	Knoop
Nature	Acier trempé ou carbure de tungstène	Diamant	Acier trempé	Diamant	Diamant
Forme	Sphère	Cône	Sphère	Pyramide à base carrée	Pyramide à base losange
Dimensions	 $D = 10 \text{ mm}; 5 \text{ mm}; 2,5 \text{ mm}; 1 \text{ mm}$	 $\theta = 120^\circ$	 $D = 1/16'' (1,587 \text{ mm})$ $D = 1/8'' (3,175 \text{ mm})$	 $\theta = 136^\circ$	 $\alpha = 130^\circ$ $\theta = 172^\circ 30'$

II.2.8 Calcul de la dureté Vickers : [2]

La valeur de la dureté de Vickers se définit comme étant le rapport de la charge appliquée à la surface de l'empreinte « S ». Elle se calcule selon la relation suivante :

$$HV = F/S \quad (F \text{ en Kg}) \quad (34)$$

II.2.9 Mesure de la diagonale « d » de l'empreinte

La surface est calculée en fonction des diagonales de l'empreinte mesurées grâce au microscope optique. On mesure la première diagonale « d1 », puis la seconde diagonale « d2 » et on calcule la valeur moyenne « d » en utilisant la relation suivante :

$$d = \frac{d1+d2}{2} \quad (\text{mm}) \quad (35)$$

La valeur de la surface de forme pyramidale est donnée par la relation suivante :

La figure 51 montre le schéma du duromètre qui permet de mesurer les trois types de duretés : Brinell, Vickers et Rockwell.



Figure 49: Schéma du duromètre

Le duromètre est un appareil qui permet de mesurer la dureté des métaux et alliages. Malgré la diversité des appareils, le principe de l'essai reste toutefois le même. En effet, la mesure consiste à s'enfoncer dans le métal à étudier. La dureté est déterminée par la mesure de la dimension de l'empreinte ou de sa profondeur, selon le type de l'essai.

II.2.10 Mode opératoire

II.2.10.1 Choisir le pénétrateur :

- Pyramide en diamant pour l'essai Vickers (HV)
- Placer le pénétrateur choisi dans le porte outil du duromètre.

II.2.10.2 Choix de la charge :

Le choix de l'essai de dureté est effectué en fonction du type du matériau et de son niveau de dureté. Pour justifier le type de dureté, nous utilisons 4 matériaux différents classés par ordre croissant de la dureté. Ce sont :

- Alliage d'aluminium
- Acier sans traitement
- Acier trempé
- Carbure métallique.

Lorsque le matériau est inconnu, il est conseillé de commencer par les essais destinés aux matériaux durs tels que HV et HRC ou HRA utilisons des pénétrateurs de diamant. Si la valeur de la dureté est erronée en raison d'un enfoncement profond du pénétrateur, on préconise alors de modifier la charge (cas de HV) ou d'adopter l'essai Brinell utilisant une bille d'acier trempé.

II.2.11 Partie pratique essai Vickers

On a réalisé un nombre de trois 3 essais de dureté de cinq 5 zones sur notre échantillon comme présenté sur la figure ci-dessous :

✚ **Mesure :**

$$d = \frac{d_1+d_2}{2} \text{ (mm)} \quad (36)$$

$$\text{Moyenne } d = \sum_1^3 d \text{ (mm)} \quad (37)$$

La valeur de la surface de forme pyramidale est donnée par la relation suivante :

$$S = \frac{d^2}{2 \sin \gamma/2} = \frac{d^2}{1,8544} \quad (38)$$

Avec γ est l'angle de la pyramide à 136°.

Le rapport de la charge à la surface devient :

$$\text{HV} = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (39)$$

Avec $F=30\text{Kgf}$

II.3 Essais de dureté sous charge réduite « Micro-dureté » [2]

II.3.1 Principes

Du point de vue scientifique, on peut séparer les essais de dureté précédemment décrits des essais de microdureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelquefois très important de grains de métal, alors que les seconds sont destinés en Méthode de Knoop

On utilise un pénétrateur en diamant, taillé suivant une pyramide à base losange, dont les diagonales sont sensiblement dans le rapport de 7 à 1. L'angle au sommet dans le sens de la grande diagonale est de $172^{\circ} 30'$ et l'angle transversal de $130^{\circ} 0'$ (cf. tableau 2).

L'avantage du pénétrateur Knoop est de donner une empreinte suffisamment grande pour une très faible charge, en sollicitant donc un volume très réduit de matière.

Les charges appliquées peuvent être réduites : à partir de 35,3 N jusqu'à 0,245 N et même maintenant 0,049 N avec contrôle de la vitesse de mise en charge, du temps de maintien et de la vitesse de décharge.

La dureté Knoop HK s'exprime par le rapport de la charge appliquée F à la surface projetée A de l'empreinte :

$$HK = \frac{F}{A} = \frac{0,102 F}{0,07028 d^2} = 14,23 X \frac{0,102 F}{d^2} \quad (40)$$

$F(N)$: Charge,

$A (mm^2)$: Surface,

$d (mm)$: Longueur de la grande diagonale imprimée.

Les mesures de d sont faites au micromètre près, sous un grossissement dépassant 650, la longueur à déterminer variant de 20 à 1 000 μm environ, suivant la loi représentée par les chiffres du tableau 4 qui permettent une interpolation.

Tableau 11: Dureté Knoop

$$S = \frac{d^2}{2 \sin \gamma/2} = \frac{d^2}{1,8544} \quad (41)$$

Avec γ est l'angle de la pyramide égal à 136° .

Le rapport de la charge à la surface devient :

$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (42)$$

II.3.2 Choix de la force

La charge de l'essai Vickers s'étant dans la gamme de 10 à 120 Kg. Celle-ci sera choisie en fonction du niveau de dureté du matériau à essayer. Plus le matériau est dur, plus la charge sera élevée pour que l'empreinte soit visible et facile à mesurer. La force couramment utilisée est 294N (pour Al, Cu et alliages ainsi les aciers).

II.3.3 Conditions d'essai Vickers

L'essai est normalement est conduit a température ambiante :

La charge est appliquée progressivement, sans chocs ni vibrations et maintenue a sa valeur finale pendant 10 a 15s.

On prépare la surface pour éviter toute altération (oxydation...)

Epaisseur de la pièce $\geq 15X$

Pour les essais successifs, on choisira :

$a \geq 2,5d$; $b \geq 2,5d$ (figure7)

$a \geq 3d$; $b \geq 6d$ (Al, Cu et alliages)

La pièce doit être posée sur un support rigide.

II.3.3.1 But de travail :

- Etude du principe du duromètre
- Etudier l'influence de la charge

II.3.4 Principe du duromètre FRANK modèle 38500

La charge est choisie selon le type d'essai à effectuer et le métal à tester. Les tableaux 1 et 2 donnent les charges normalisées. Pour obtenir la charge de l'essai, des contre poids (04) normalisés sont superposés sur un plateau à l'arrière de l'appareil.

- 1) L'échantillon est ensuite déposé sur la table (01) du duromètre après avoir bien nettoyé la surface à essayer.
- 2) Tourner le volant (2) vers la droite pour ramener l'échantillon en contact avec le pénétrateur (8). Ce contact est signalé par un mouvement des aiguilles du comparateur (7) de l'appareil. Le comparateur est montré à la figure 2.
- 3) Continuer a tourné le volant jusqu'à ce que la petite aiguillé vienne en face du point rouge. Dans cet état, une charge de 98N est appliquée à la pièce.

- 4) Pour appliquer la charge, tirer la manette (6) vers l'avant de l'appareil. Celle-ci effectue une rotation et s'arrête une fois que la poignée est en position horizontale ou la charge de l'essai est appliquée.
- 5) Au bout d'un temps prévu par la norme de l'essai, remonter la manette. Dans cet état la charge de l'essai est supprimée.
- 6) S'il s'agit de l'essai Rockwell, la dureté est lue directement sur le comparateur de l'appareil.
- 7) En revanche, pour les essais Brinell et Vickers on tourne le volant vers la gauche pour dégager l'échantillon. La mesure du diamètre de l'empreinte (essai Brinell) ou de la diagonale de l'empreinte pyramidale (essai Vickers) permet de calculer les duretés HB et HV en utilisant les expressions appropriées citées plus haut.
- 8) La mesure de la dimension de l'empreinte utilise un appareil optique auxiliaire qui permet d'agrandir et mesurer la dimension avec précision.

Pour l'essai Vickers, utilisé pour la plus part des matériaux, la charge peut s'étendre de 20 a 20Kgf. Pour des charges allant de 5 à 1000 grammes sont utilisés dans la mesure de la microdureté des phases en évidence par un microscope appelé « micro-duromètre ».

II.3.5 Travail expérimental :

Principe à définir les propriétés à l'intérieur des grains soit de la matrice, soit de ses divers constituants.

On peut distinguer, en pratique, deux domaines qui correspondent en général à des types d'appareils différents :

- la *dureté sous charge réduite* allant de 1,96 à 98 N, le domaine le plus caractéristique comprenant les charges de 1,96 à 19,6 N ;
- la *microdureté*, depuis 1,96 N jusqu'à des charges descendant au centième de newton, le domaine le plus courant comportant des charges comprises entre 0,049 et 0,49 N.

Ces domaines correspondent à des techniques expérimentales entièrement différentes. La pénétration des plus petites micro empreintes est de l'ordre de 0,5 μm , c'est-à-dire de l'ordre de grandeur des rugosités d'une pièce ayant subi une rectification, alors que les charges réduites provoquent des empreintes de 7 à 40 μm .

Les mesures de microdureté, pour donner des résultats satisfaisants, doivent être faites en précisant tous les paramètres : charge appliquée, vitesse de mise en charge, préparation de l'échantillon (mode de polissage), structure micrographique ; elles

nécessitent des précautions multiples, comme l'élimination des vibrations au cours des mesures, et des qualités particulières pour les appareils (forme du diamant, caractéristiques optiques, précision mécanique).

Dans ces conditions, la microdureté permet d'obtenir des résultats extrêmement intéressants en ce qui concerne en particulier :

- les petits échantillons (aiguilles, fils, rubans minces) ;
- les couches superficielles (couches cémentées, nitrurées, dépôts électrolytiques) ;
- les matières dures et fragiles (carbures, verres, émaux) susceptibles de se fissurer, sauf sous très faible charge ;
- les divers constituants des alliages ; on peut apprécier la variation de dureté dans les grains d'une solution solide non homogène, en fonction de la diffusion des éléments, ou de celle des différentes phases précipitées.

De nombreux Micro-Duromètre ont été mis au point, comportant un dispositif assurant le maintien sans aucun déplacement de la pièce, un appareillage pour appliquer la charge à vitesse contrôlée, un microscope de puissance élevée. Nous en décrirons trois ci-après.

II.3.6 Normes d'essai de microdureté

Ce tableau 12 nous montre les Normes NF A 03-502, 03-503 et 03-504 respectivement pour les machines d'essais Brinell, Rockwell et Vickers

Tableau 12 : Normes NF A 03-502, 03-503 et 03-504 respectivement pour les machines d'essais Brinell, Rockwell et Vickers

Longueur de la diagonale (mm)	Dureté pour une charge de 9,8 N	Longueur de la diagonale (mm)	Dureté pour une charge de 9,8 N
0,010	142 290	0,090	1 757
0,020	35 572	0,100	1 423
0,030	15 810	0,150	632,4
0,040	8 893	0,200	355,7
0,050	5 692	0,300	158,1
0,060	3 952	0,400	88,93
0,070	2 904	0,500	56,92
0,080	2 223	0,600	39,52

(1) Pour déterminer la dureté pour une charge différente, il suffit de multiplier la dureté qui, d'après cette table, correspond à la charge de 9,8 N par le rapport de la charge réellement appliquée à 9,8.

II.3.7 Microduromètre Hanemann

Cet appareil groupe le pénétrateur et l'objectif, et se monte sur un microscope métallographique Zeiss. Le pénétrateur est une pyramide Vickers de diamant, enchâssée

dans la lentille frontale de l'objectif utilisé pour l'examen de l'échantillon et le repérage du point de mesure. Le domaine des charges s'étend de 0,009 8 à 1,372 N ; Elles sont obtenues au moyen de deux ressorts annulaires plans.

II.3.8 Microscéléromètre Girschig

Cet appareil est disposé de telle sorte qu'il puisse s'adapter à un microscope métallographique en se substituant à l'objectif. Le pénétrateur est un diamant Vickers (ou une bille) qui se trouve libéré de tout contact mécanique lorsqu'il travaille, ce qui lui permet de transmettre intégralement la charge appliquée à son extrémité par un ressort taré. Une lame correspond à un effort donné ; un jeu de lames permet d'obtenir les charges de 0,098 ; 0,294 ; 0,98 ; 2,94 et 9,8 N.

II.3.9 Signification de la microdureté

Ce tableau 13 nous montre les Normes d'étalonnages utilisé pour les machines d'essais Brinell, Rockwell et Vickers

Tableau 13: Normes d'étalonnages utilisé pour les machines d'essais Brinell, Rockwell et Vickers

	Brinell	Rockwell	Vickers
Méthode de mesure	A 03-152	A 03-153	A 03-154
Cas des produits minces		A 03-170	
Vérification des machines	A 03-502	A 03-503	A 03-504
Tarage des blocs-étalons	A 03-505	A 03-506	A 03-507

II.3.9.1 Micro-Duromètre SHIMADZ:

Est un appareil à double usage qui a un microscope optique et un dispositif de mesure (règle) intégrée sur le micro-duromètre, pour mesurer les diagonales de l'empreinte réalisée sur les phases de l'échantillon (voir la Figure.50).



Figure 50: Microduromètre SHIMADZ utilisé.

II.3.9.2 Spectromètre d'émission par étincelage SPECTROMAX:

C'est un appareil qui nous permet la réalisation de l'analyse chimique d'un échantillon suffisamment grand pour empêcher le gaz d'Argon à s'échapper lors de l'application de l'étincelage par Arc (lier le pole positif au pole négatif sous une atmosphère d'Argon). (voir la Figure.51).



Figure 51: Spectromètre d'émission par étincelage (SPECTROMAX)

RESULTATS

ET

INTERPRETATIONS

II.3.10 Résultats de l'analyse chimique de notre Acier S355J2+N

Le Tableau 14 ci-dessous regroupe les résultats de l'analyse chimique de notre acier S355J2+N (S355J2G3) :

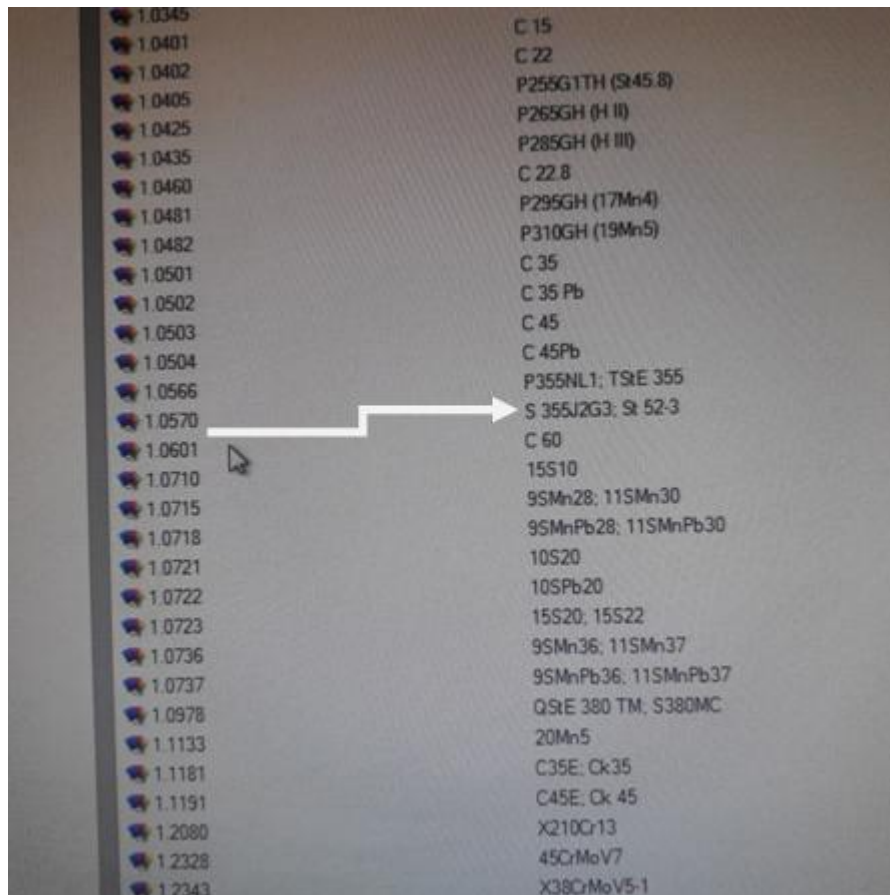
Tableau 14: Le résultat de notre analyse chimique de l'acier S355J2+N :

	C Conc. %	Si Conc. %	Mn Conc. %	P Conc. %	S Conc. %	Mo Conc. %	Ni Conc. %	Al Conc. %	Co Conc. %
Notre échantillon	0,151	0,386	1,37	0,0127	0,0148	0,0149	0,0712	0,0234	0,0092
Norme	0,200	0,550	1,60	0,0350	0,0350	0,0500	0,300	0,0500	0,0100
	Cu Conc. %	Nb Conc. %	Ti Conc. %	V Conc. %	W Conc. %	Pb Conc. %	Sn Conc. %	Mg Conc. %	Au Conc. %
Notre échantillon	0,172	<0,0040	0,0098	0,0053	<0,0070	0,0020	0,0119	0,0025	0,0063
Norme	0,400	0,0300	0,0250	0,0300	0,100	0,0500			
	Zr Conc. %	Bi Conc. %	Ca Conc. %	Ce Conc. %	Sb Conc. %	Se Conc. %	Te Conc. %	Ta Conc. %	B Conc. %
Notre échantillon	0,0033	0,0095	0,0038	<0,0015	0,0028	0,0079	<0,0100	0,0500	0,00020
Norme									
	Zn Conc. %	La Conc. %	Fe Conc. %						
Notre échantillon	0,0107	<0,00050	97,5						
Norme									

Après l'obtention des résultats de l'analyse chimique ci-dessus, le spectromètre nous a révélé la nuance de notre acier, qui est : **ID1.0570** voir le **Tableau. 15** suivant.

La composition chimique qu'on a effectué sont conforment à celle exigée par la Norme.

Tableau 15: Base de données des références des matériaux existant dans la machines :



1.0345	C 15
1.0401	C 22
1.0402	P255G1TH (St45.8)
1.0405	P265GH (H II)
1.0425	P285GH (H III)
1.0435	C 22.8
1.0460	P295GH (17Mn4)
1.0481	P310GH (19Mn5)
1.0482	C 35
1.0501	C 35 Pb
1.0502	C 45
1.0503	C 45Pb
1.0504	P355NL1; TStE 355
1.0566	S 355J2G3; St 52-3
1.0570	C 60
1.0601	15S10
1.0710	9SMn28; 11SMn30
1.0715	9SMnPb28; 11SMnPb30
1.0718	10S20
1.0721	10SPb20
1.0722	15S20; 15S22
1.0723	9SMn36; 11SMn37
1.0736	9SMnPb36; 11SMnPb37
1.0737	QStE 380 TM; S380MC
1.0978	20Mn5
1.1133	C35E; Ck35
1.1181	C45E; Ck 45
1.1191	X210Cr13
1.2080	45CrMoV7
1.2328	X38CrMoV5-1
1.2343	

II.4 Résultats des observations Microstructurales

II.4.1 Observation au microscope optique (MO)

Avec quatre(04) réglages de grossissement (GX40 ; GX100 ; GX200; GX400).

Observation de deux (02) échantillons ; échantillon I et échantillon II.

Voir l'annexe 6, pour la norme essai métallographique.

Les observations effectuées sur notre acier :

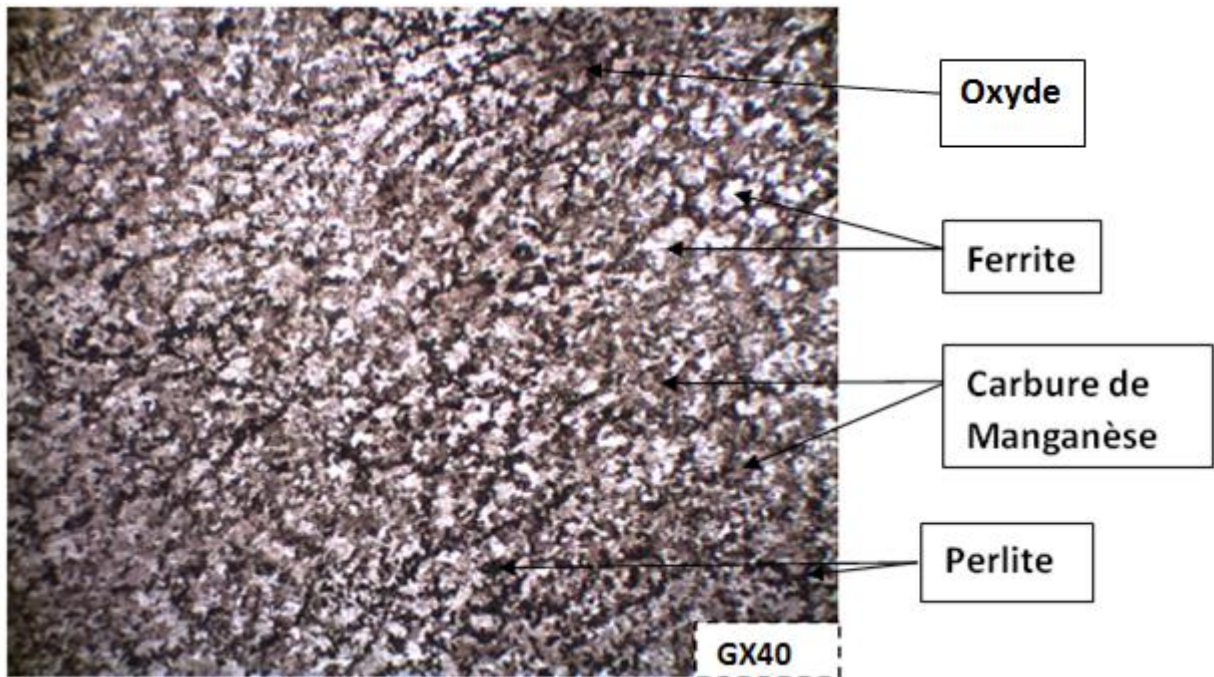


Figure 52: Micrographie optique du cœur de l'arbre de l'acier S355J2+N

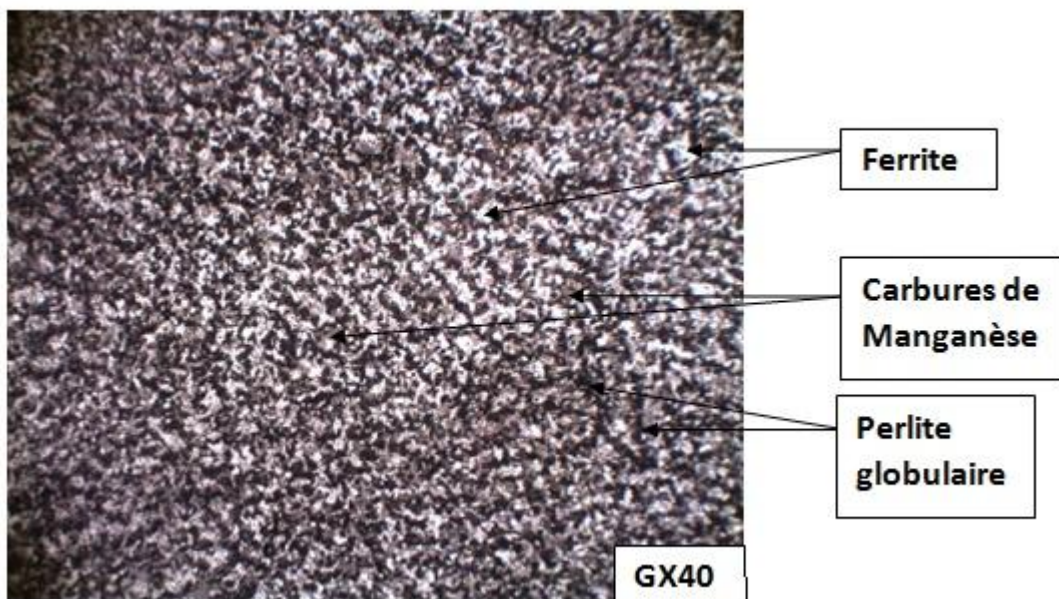


Figure 53: Micrographie optique du milieu de l'arbre de l'acier S355J2+N

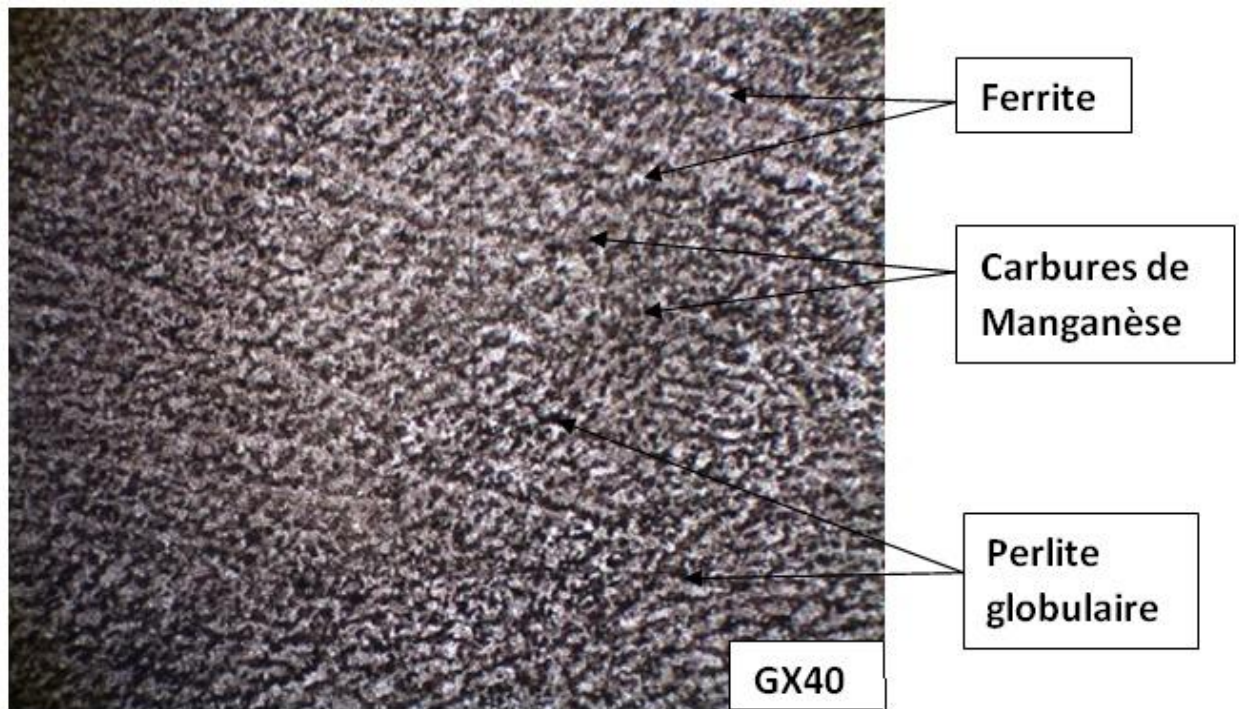


Figure 54: Micrographie optique de la surface de l'arbre de l'acier S355J2+N

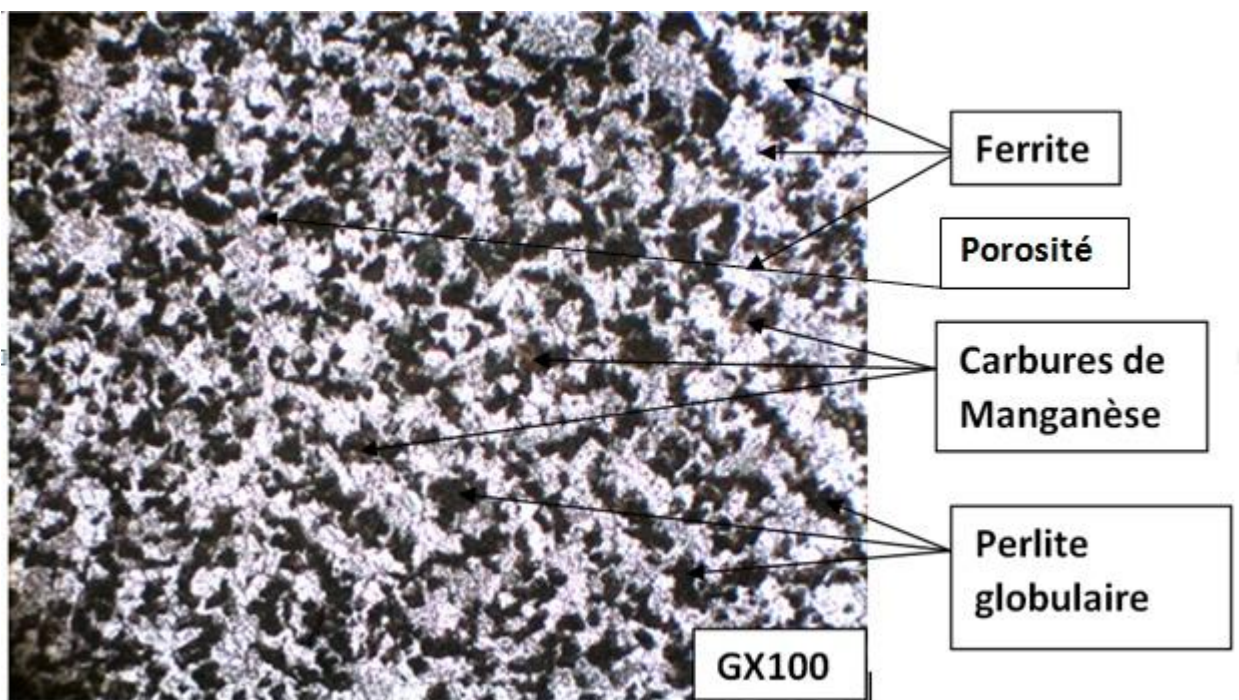


Figure 55: Micrographie optique du milieu de l'arbre de l'acier S355J2+N

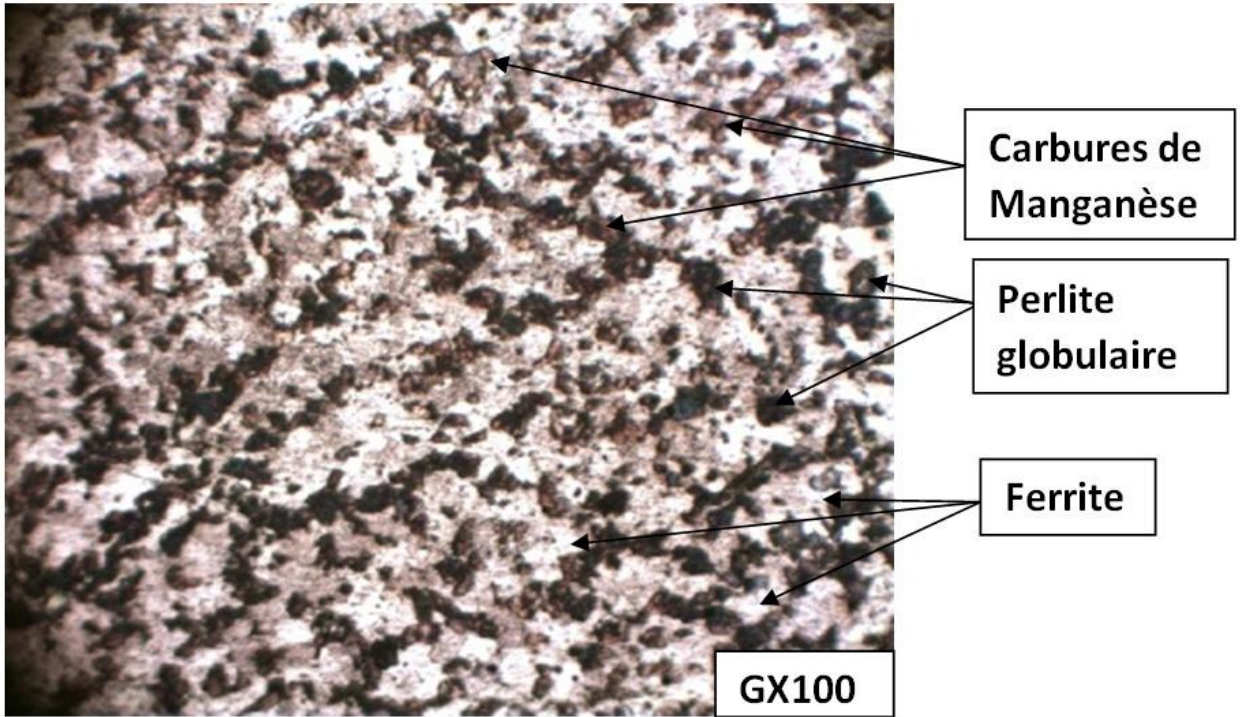


Figure 56: Micrographie optique du cœur de l'arbre de l'acier S355J2+N

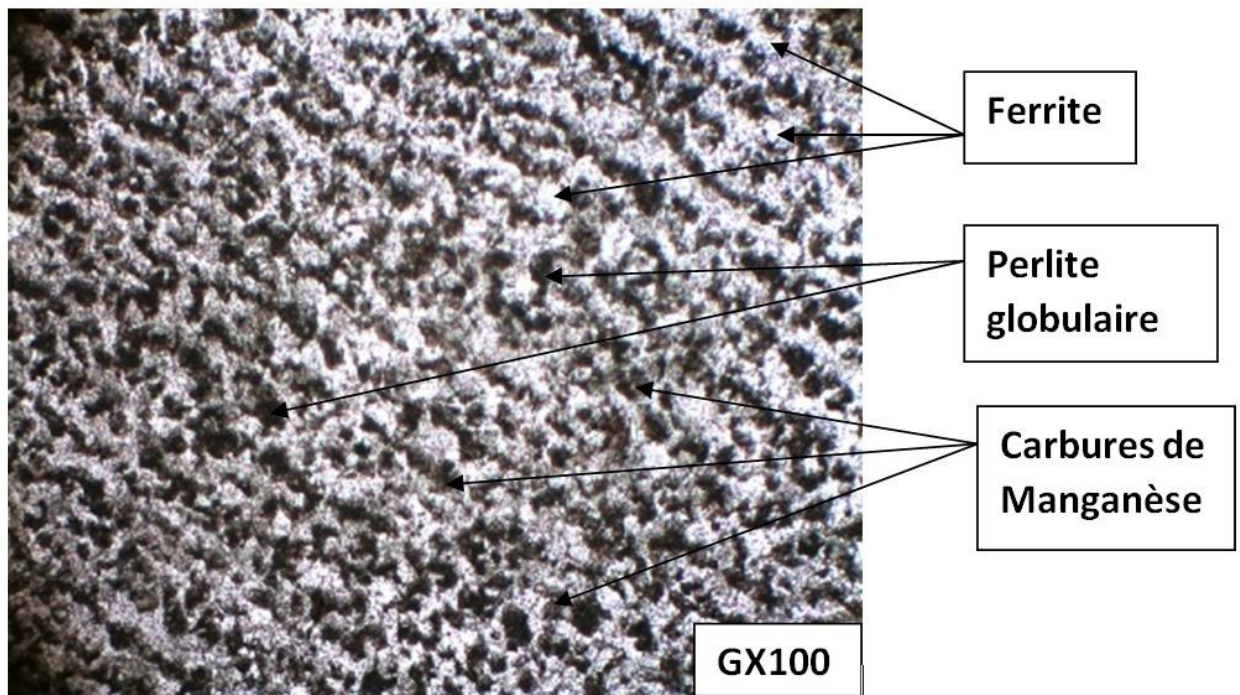


Figure 57: Micrographie optique de la surface de l'arbre de l'acier S355J2+N

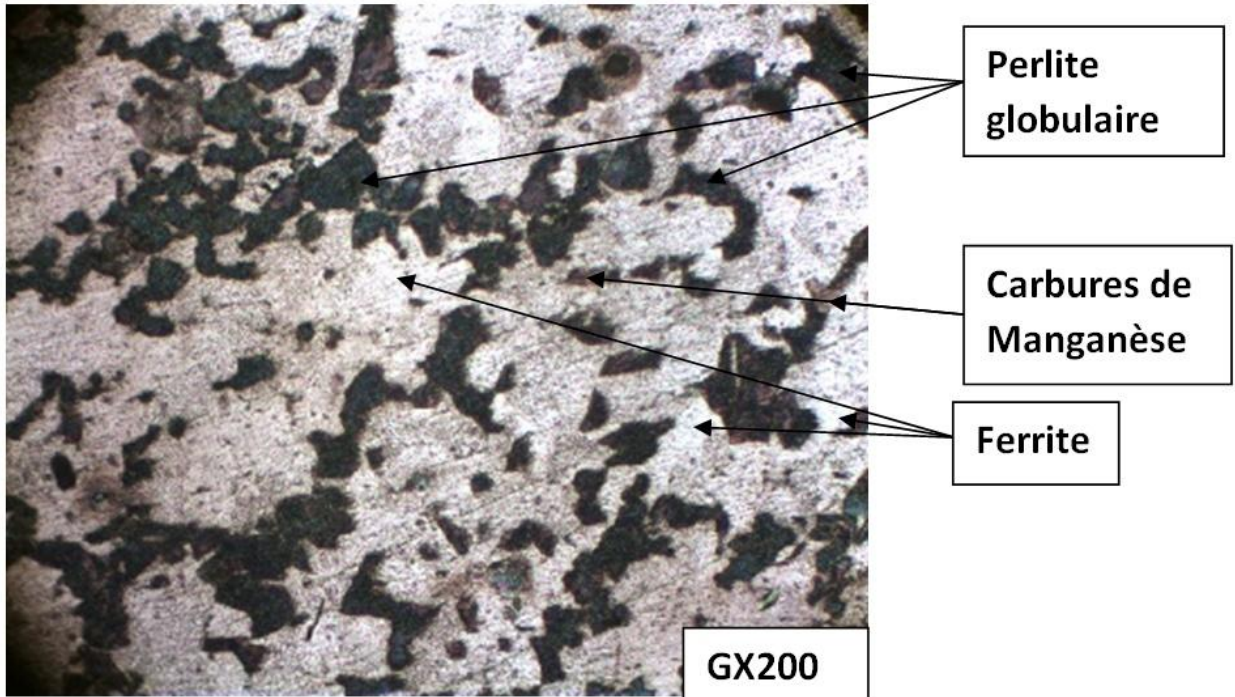


Figure 58: Micrographie optique du cœur de l'arbre de l'acier S355J2+N

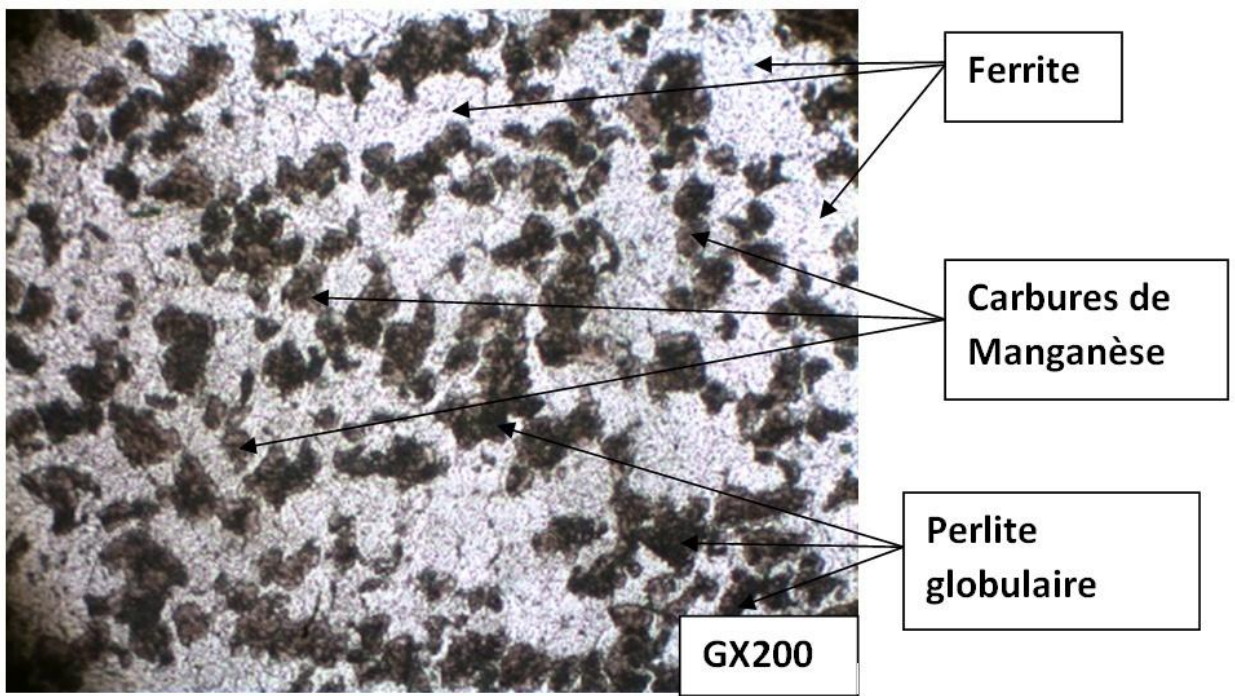


Figure 59: Micrographie optique du milieu de l'arbre de l'acier S355J2+N

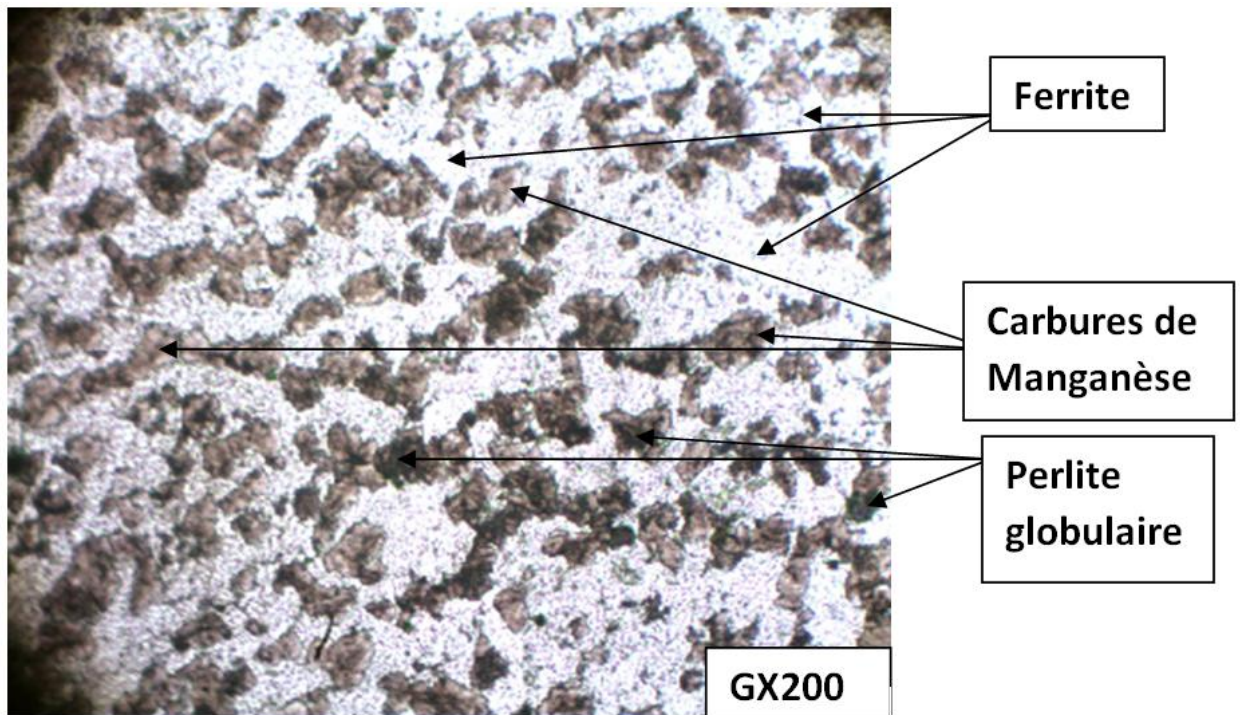


Figure 60: Micrographie optique de la surface de l'arbre de l'acier S355J2+N

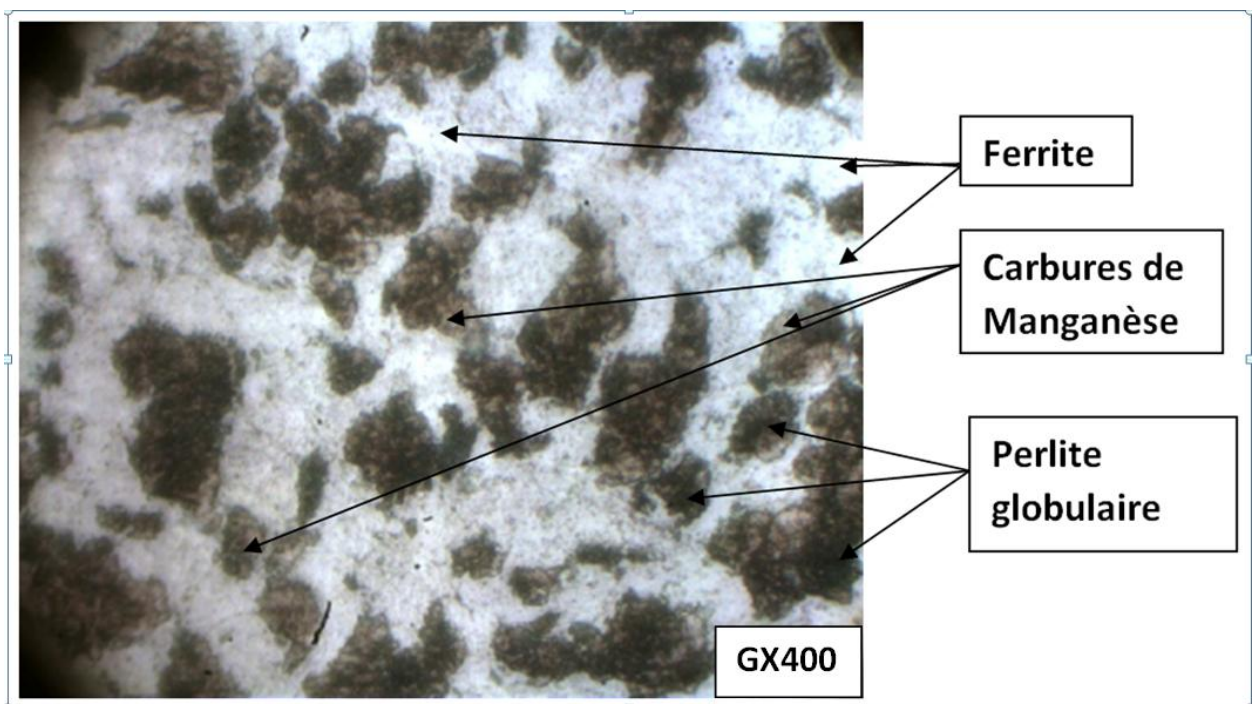


Figure 61: Micrographie optique du milieu de l'arbre de l'acier S355J2+N

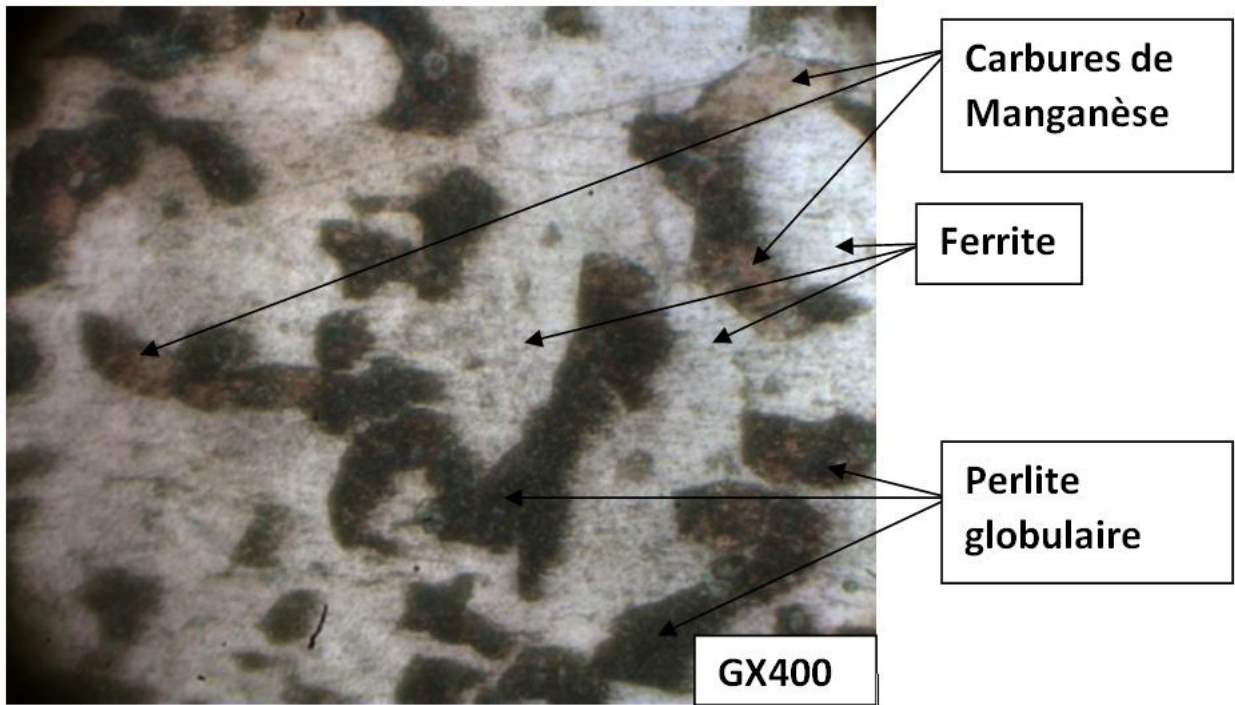


Figure 62: Micrographie optique du cœur de l'arbre de l'acier S355J2+N

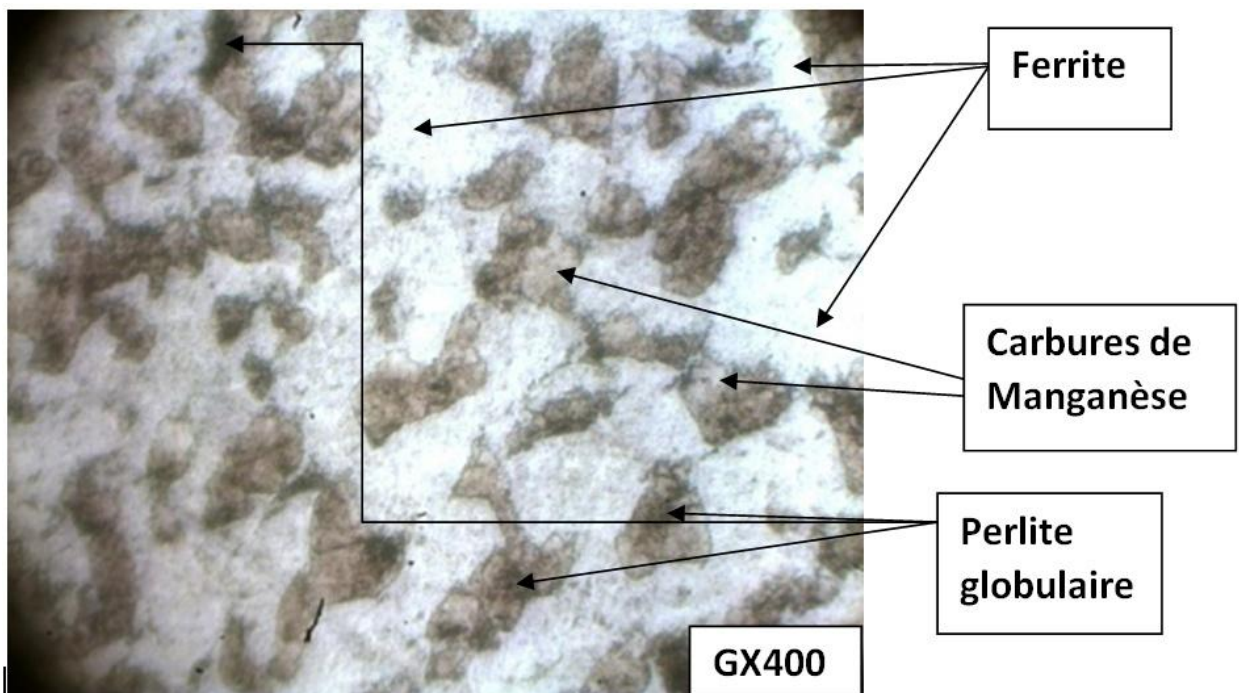


Figure 63: Micrographie optique de la surface de l'arbre de l'acier S355J2+N

II.4.1.1 Interprétations des microstructures

Les microstructures obtenues par microscopie optique (M.O) sur les Figures ci-dessus montrent une structure fine homogène recristallisée due à de la Temperature du laminage normalisant à chaud subi par notre acier qui est comprise entre 800 °C et 1200°C (le même effet qu'un traitement thermique de recuit de normalisation). [7]

Elle ressemble à une structure dendritique sur tous l' échantillon à (GX40) .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 que notre acier est faiblement allié au Manganèse (1,37%Mn).

Le grossissement de la structure à (GX100), la Figure montre 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. [7]

Mais la Figure. II.3.4 (GX100), montre l'effet de laminage, donc on a une structure alternée entre les lamelles de perlite et de ferrite, d'où cela montre que le recuit de normalisation (laminage normalisant à chaud) n'a pas éliminé cet effet au milieu de l'arbre.

L'agrandissement des Figures. II.3.7, 8 et 9 à (GX200), et les Figures. II.3.10 à 12 à (GX400) ; Montrent de la perlite globulaire (dû au traitement thermique de recuit de normalisation) et de la ferrite, ainsi que la présence des carbures de Mn et Si, de la porosité et des oxydes aussi. Ces carbures se sont précipités sur les joints de grains en les entourant (il y'a des angles de 30, 60, 90 et 120° former par les joints de grains) et dans les grains.

II.4.1.2 Courbes conventionnelles de l'acier S355J2+N d'essai de Traction

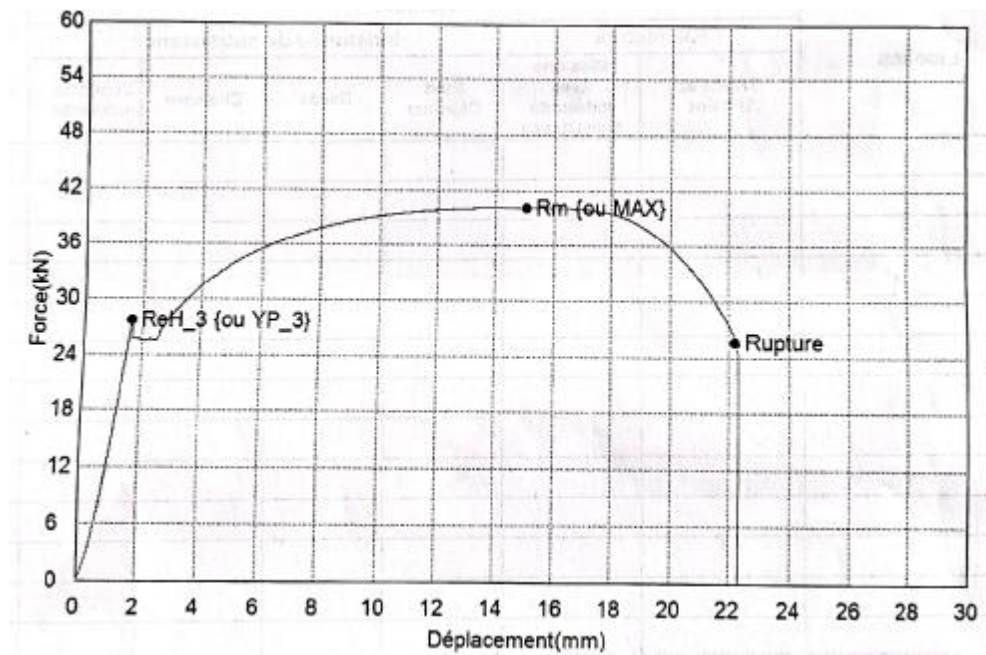


Figure 64: Courbe conventionnelle du milieu M3

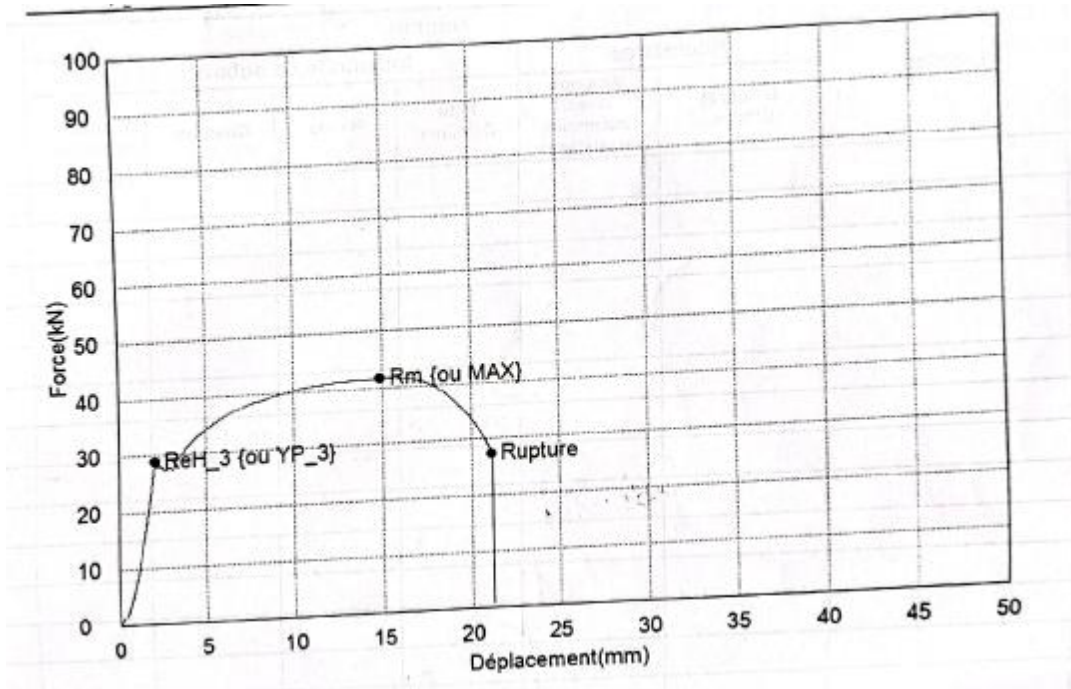


Figure 65: Courbe conventionnelle du milieu M2

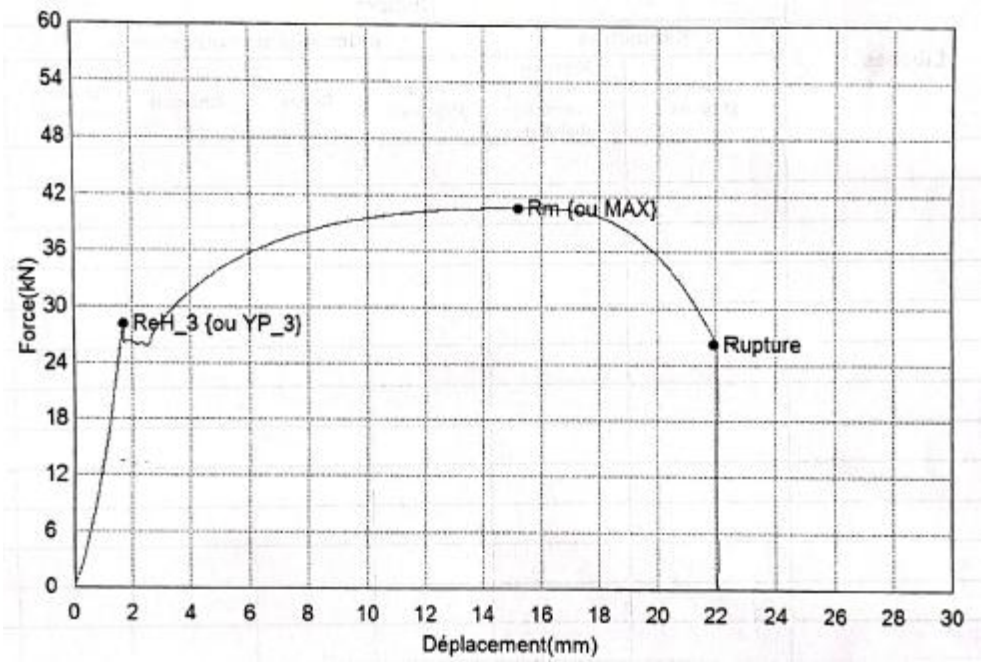


Figure 66: Courbe conventionnelle du milieu M1

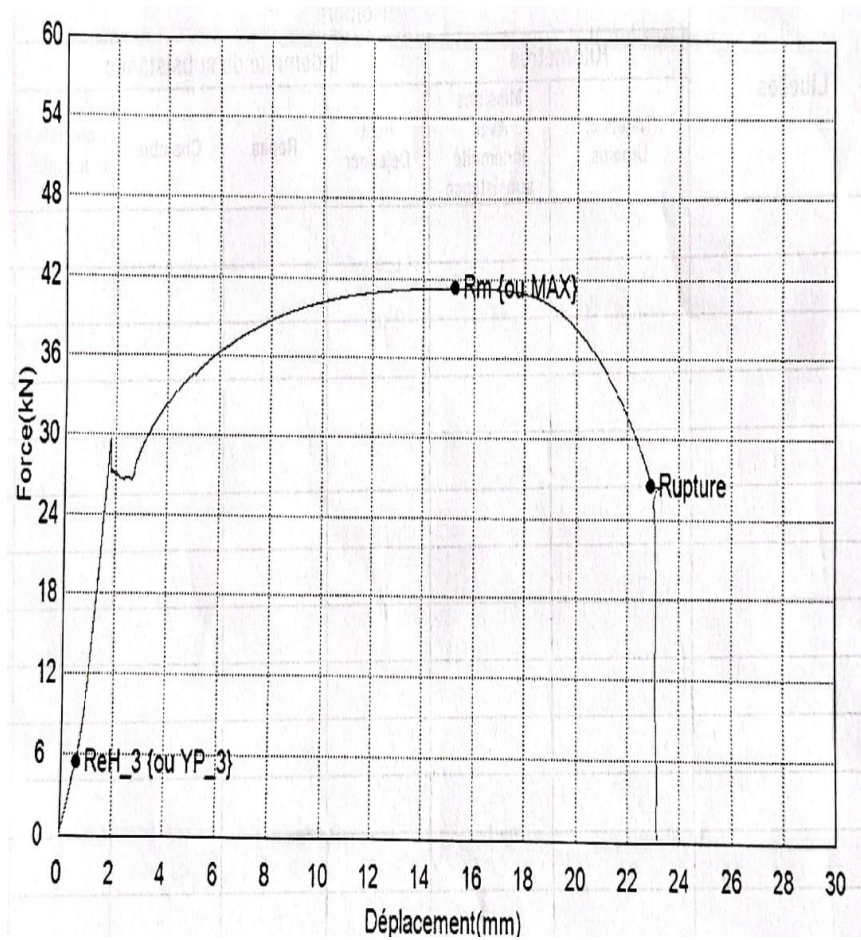


Figure 67: Courbe conventionnelle du milieu C3

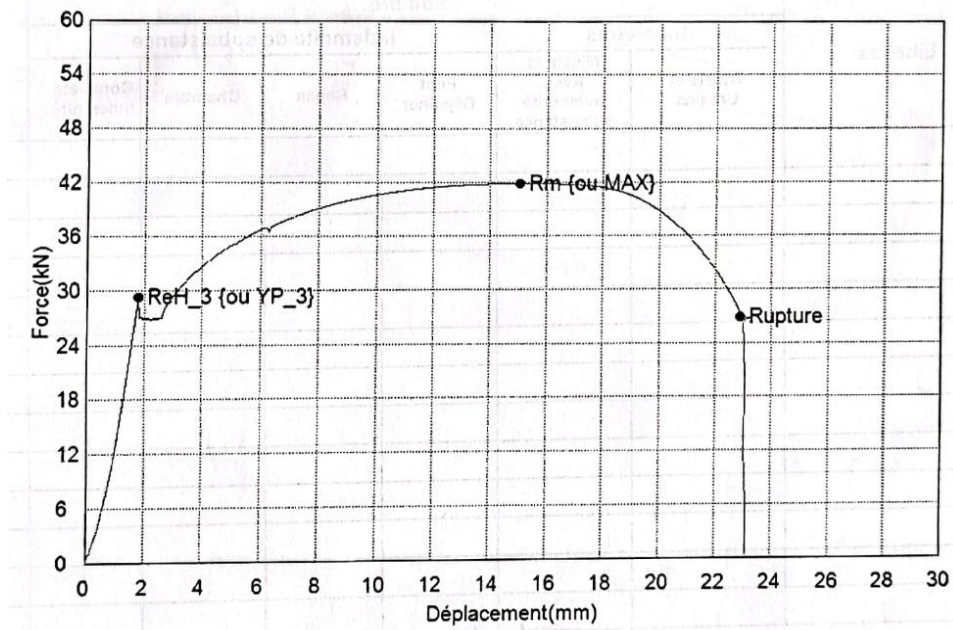
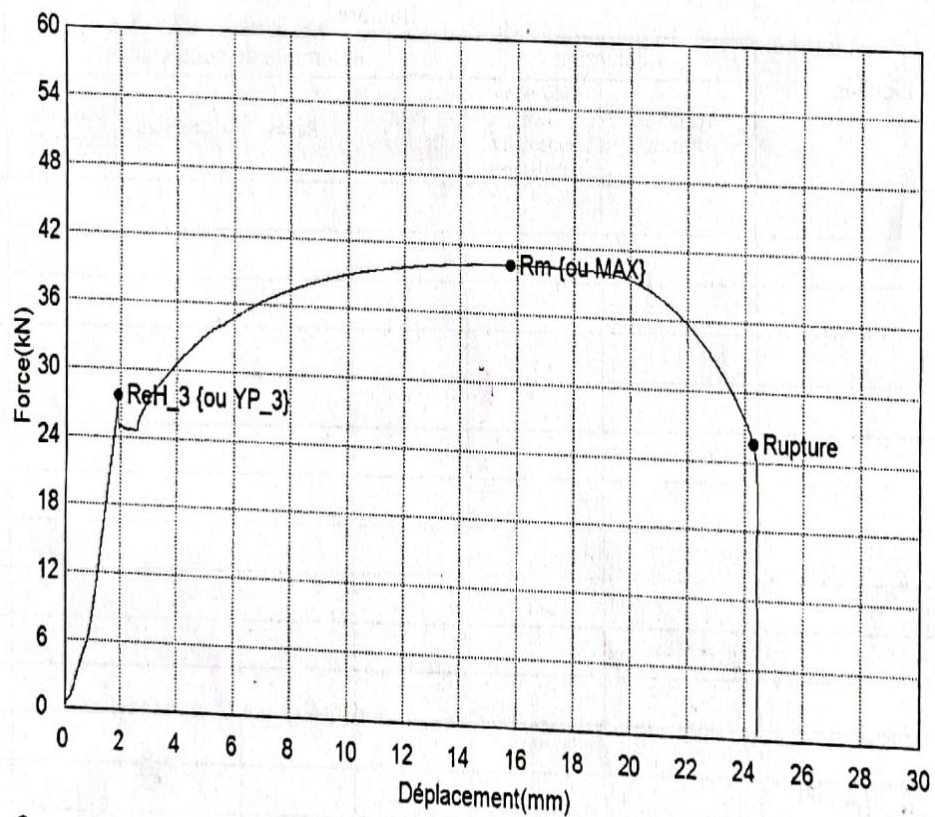


Figure 68: Courbe conventionnelle du milieu C2



Commentaire

Figure 69: Courbe conventionnelle du milieu C1

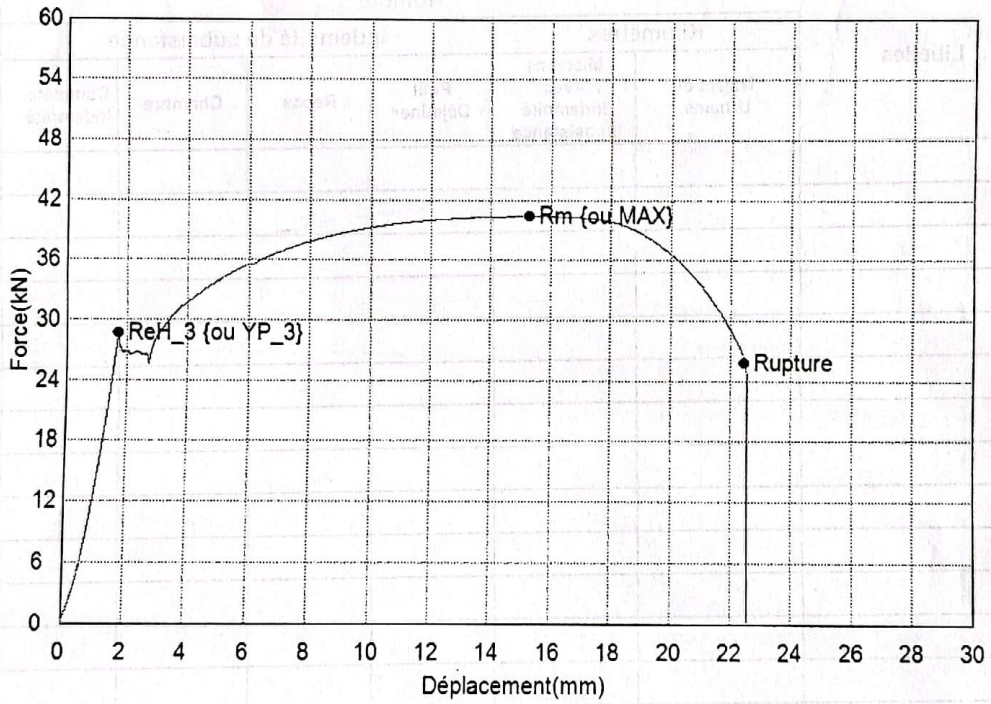


Figure 70: Courbe conventionnelle du milieu S3

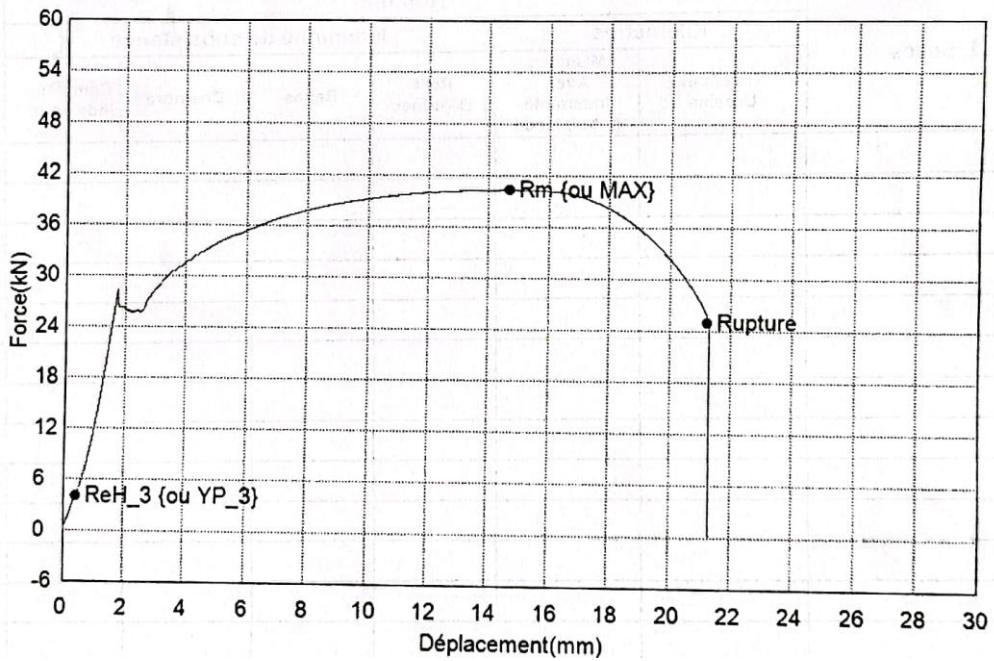


Figure 71: Courbe conventionnelle du milieu S2

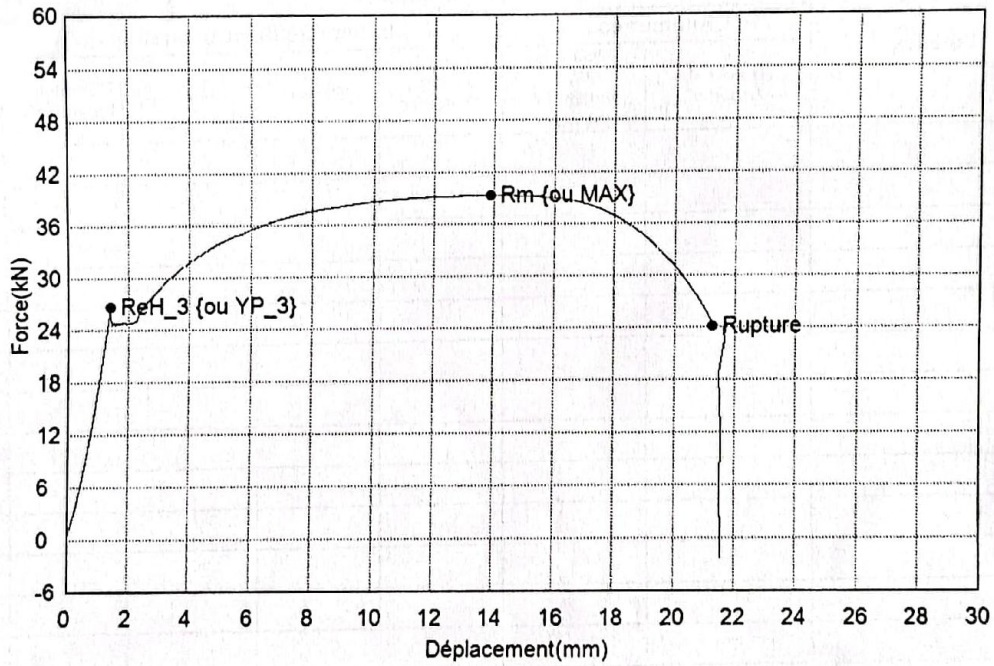


Figure 72: Courbe conventionnelle du milieu S1

4.9.1 Courbe $R = f(A)$: voir les courbe dans l'annexe

a) calcul de σ et ε :

$$A = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \Rightarrow \frac{l}{l_0} = A + 1 \quad (43)$$

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \Rightarrow \varepsilon = \text{Ln} \frac{l}{l_0} = \text{Ln} (A + 1) \Rightarrow \varepsilon = \text{Ln} (A + 1) \quad (44)$$

$$\begin{cases} R = \frac{F}{S_0} \\ \sigma = \frac{F}{S} \end{cases} \Rightarrow \frac{\sigma}{R} = \frac{F/S}{F/S_0} = \frac{S_0}{S} \Rightarrow \sigma = R \cdot \frac{S_0}{S} \quad (45)$$

Conservation de volume pour une déformation plastique :

$$V = V_0 \Rightarrow S \cdot l = S_0 \cdot l_0 \Rightarrow \frac{l}{l_0} = \frac{S_0}{S} = A + 1 \quad (46)$$

D'où

$$\sigma = R (A + 1) \quad (47)$$

b) Calculons les caractéristiques conventionnelles (E, R_e, R_m, A, Z)

***) calculons E :**

$$E = \tan \frac{R_2 - R_1}{A_2 - A_1} = \frac{27 - 0,33}{2 - 0} = 13,335 \text{ daN} \quad (48)$$

***) calculons R_e :**

Pour déterminer R_e , on trace la parallèle à OA qui est une déformation à 0,2% ($A=0,002$) pour des calculs industriels, on aura :

$$\left. \begin{array}{l} 42,66 \text{ daN} \rightarrow 15,33 \text{ cm} \\ R_e \rightarrow 2,78 \text{ cm} \end{array} \right\} \Rightarrow R_e = \frac{42,66 \times 2,78}{15,33} \Rightarrow R_e = 7,74 \text{ daN/mm}^2 \quad (49)$$

***) calculons R_m :**

$$R_m = 42,66 \text{ daN/mm}^2 \quad (50)$$

R_m : contrainte maximale lue directement du graphe

***) calculons A :**

A : Allongement relatif conventionnel au point de striction M

$$\left. \begin{array}{l} 27 \Rightarrow 23 \times 10^{-2} \\ A \Rightarrow 15,5 \end{array} \right\} \Rightarrow A = \frac{15,5 \times 27}{23 \times 10^{-2}} \quad (51)$$

$$A = 18,19\%$$

Ce qui confirme selon l'état de livraison de l'acier S355J2+N d'épaisseur nominale 105 mm donne la limite d'élasticité minimale de $R_{eH} = 295 \text{ MPa}$ et la résistance à la traction $R_m = 450 \rightarrow 600 \text{ MPa}$ et d'allongement $A(\%) = 18\%$. (Annexe 14)

Ces conditions de livraison sont atteintes, selon le cahier des charges et nos calculs le confirment. (Voir les annexes 11, 12 et 14).

***) Calculons Z :**

Z sera calculé pour A allongement relatif après striction S

$$Z = \frac{S - S_0}{S_0} = 1 - \frac{S}{S_0} = 1 - \frac{l}{l_0} = 1 - \frac{1}{A' + 1} = \frac{A' + 1 - 1}{A' + 1} \quad (52)$$

$$Z = \frac{A'}{A' + 1} \quad (53)$$

1°) Réalisant un Tableau de la courbe rationnelle de $\sigma = f(\epsilon)$

— Contrainte rationnelle

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (54)$$

— Déformation rationnelle

$$\epsilon = \text{Ln} \frac{l}{l_0} = \text{Ln} (A + 1) \quad (55)$$

*) Tracé des courbes $\sigma = f(\epsilon)$

2°) Détermination du point de striction

Le point de striction est celui après lequel la valeur de σ diminue

Donc on lit $\sigma_{\max} \Rightarrow \epsilon$

3°) Calculons A et n :

$$\sigma = A \epsilon^n \quad (56)$$

$$\text{Ln} \sigma = \text{Ln} A + n \text{Ln} \epsilon \quad (57)$$

n : Pente de la tangente à la courbe donnée par :

$$n = \frac{d \text{Ln} \sigma}{d \text{Ln} \epsilon} \quad (58)$$

Au point de striction : F est max donc

$$dF = 0 \text{ et } dR = 0 \quad (59)$$

$$F = \sigma \cdot S \Rightarrow dF = S \cdot d\sigma + \sigma \cdot dS = 0$$

$$\Rightarrow \sigma \cdot dS = -S \cdot d\sigma \Rightarrow \frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dS}{S} \quad (60)$$

On a conservation du volume pour la déformation plastique :

$$\Delta V = 0 \Rightarrow V = V_0 \Rightarrow S_0 \cdot l_0 = S \cdot l \Rightarrow l \cdot dS + S \cdot dl = 0 \Rightarrow \frac{dS}{S} = -\frac{dl}{l}$$
$$\Rightarrow \left(\frac{d\sigma}{\sigma}\right)_S = -\left(\frac{dS}{S}\right)_S = \left(\frac{dl}{l}\right)_S = d\epsilon)_S \Rightarrow \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)_S = \sigma \quad (61)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)_S = A n \epsilon^{n-1} = A \epsilon^n \Rightarrow n = \epsilon_S \quad (62)$$

$n = \epsilon_s$ Allongement maximal homogène au point de striction (coefficient de consolidation).

A : constante caractéristique des métaux.

RESULTATS :

Les résultats des représentations des graphes rationnels de traction et Calculs des paramètres mécaniques de l'essai de traction suivant les équations ci-dessus :

Comparer la limite d'élasticité de l'acier de construction laminé à chaud a l'Annexe 7 et 8

Avec : $\nu=0,3$

ν : Coefficient de Poisson des aciers

 **Présentation des tableaux et figures des éprouvettes prélevées du Cœur (C1, C2 et C3)**

Tableau 16: represente les ci-dessus C3

$E=TAN((A4-A3)/B4-B3)$	0,942663123
ν	0,3
$G=(E/2(1+\nu))$	0,61273103

Tableau 17: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinnel de l'essai de traction de l'éprouvette C3:

C3	
$\sigma(N/mm^2)$	ϵ
357	0
2766	1,66
2700	2
2600	2,78
2900	1,78
3200	4
3400	5
3533	6
3875	12
4000	12
4266	15,33
4000	16
4000	18
3600	20
2600	22,33

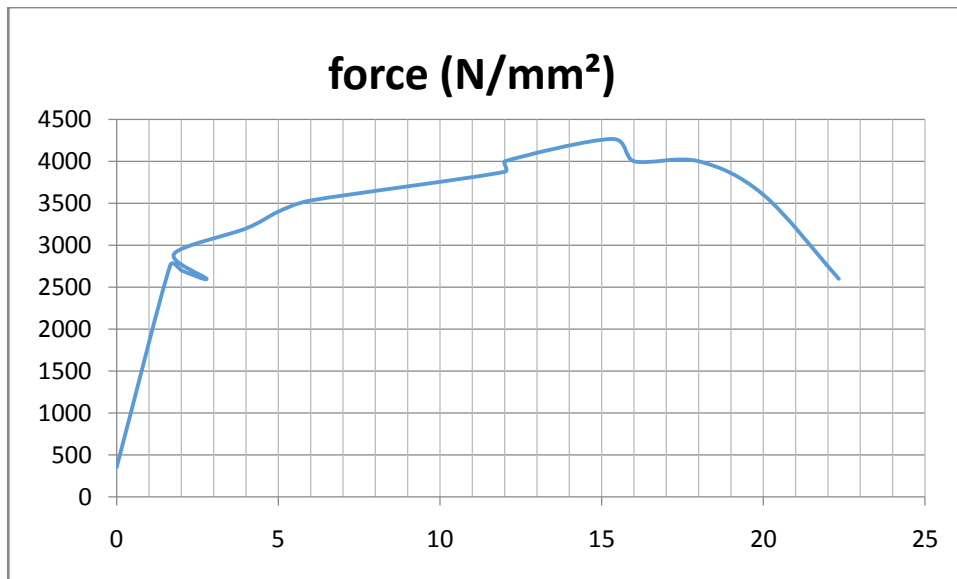


Figure 73: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C3

Tableau 18: represente les ci-dessus C2

$E = \tan((D4 - D3) / (E4 - E3))$	0,044813949
ϑ	0,3
$G = (E / 2(1 + \vartheta))$	0,029129067

Tableau 19: Représente les valeurs des contraintes et déformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C2

C2	
σ (N/mm ²)	ϵ
372,83	0
2900	1,82
2900	3,11
3200	4
3647	6
3867	8
4000	10
4100	12
4133	14
4133	16
4067	18
3867	20
3200	22
2667	23,73

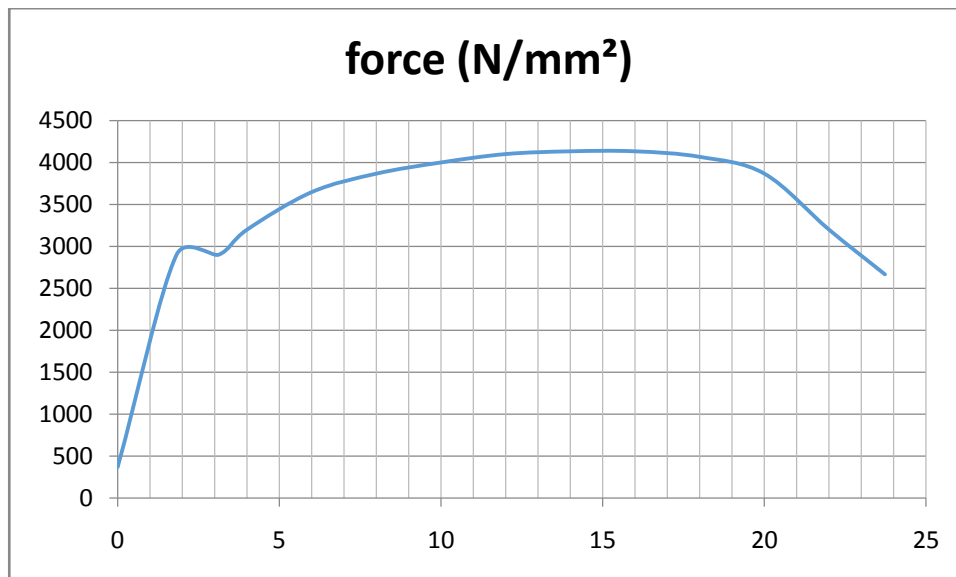


Figure 74: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C2

Tableau 20: represente les ci-dessus C1

$E=TAN((G4-G3)/H4-H3)$	2,64343618
ϑ	0,3
$G=(E/2(1+\vartheta))$	1,718233517

Tableau 21: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C1

C1	
$\sigma(N/mm^2)$	ϵ
357	0
2766	1,66
2700	2
2600	2,78
2900	1,78
3200	4
3400	5
3533	6
3875	12
4000	12
4266	15,33
4000	16
4000	18
3600	20
2600	22,33

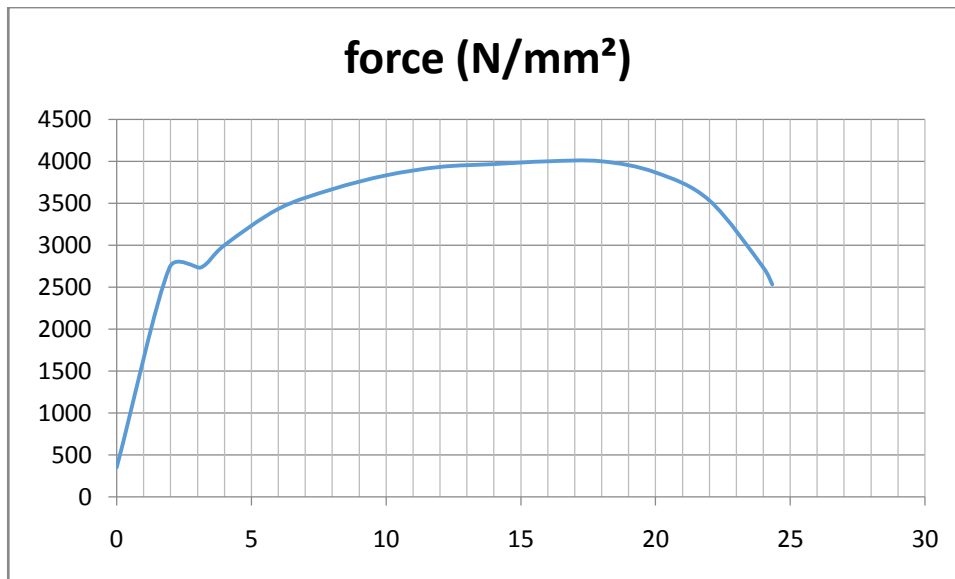


Figure 75: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette C1

✚ **Présentation des tableaux et figures des éprouvettes prélevées du Milieu (M1, M2 et M3)**

Tableau 22: Représente les valeurs des contraintes et de déformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M3

M3						
σ (N/mm ²)	ϵ	R=F/S0	S0	$\epsilon=\Delta L/L$	σ	ϵ
357,96	0	0	10	0,100	0,000	0,005
2800	1,78	2,762	10	0,100	2,656	0,025
2800	3,11	2,762	10	0,100	2,171	0,041
3133	4	3,066	10	0,100	1,742	0,057
3533	6	3,567	10	0,100	1,185	0,086
3733	8	3,78	10	0,100	0,839	0,114
3933	10	3,92	10	0,100	0,580	0,143
4000	12	4	10	0,100	0,377	0,171
4000	14	4,017	10	0,100	0,219	0,200
4000	16	4,026	10	0,100	0,148	0,214
3933	18	3,933	10	0,100	-0,011	0,257
3533	20	3,6	10	0,100	-0,028	0,286
357,96	0	2,547	10	0,100	0,188	0,325

Tableau 23: represente les ci-dessus M3

$E=TAN((A4-A3)/B4-B3)$	0,201377722
ϑ	0,3
$G=(E/2(1+\vartheta))$	0,130895519

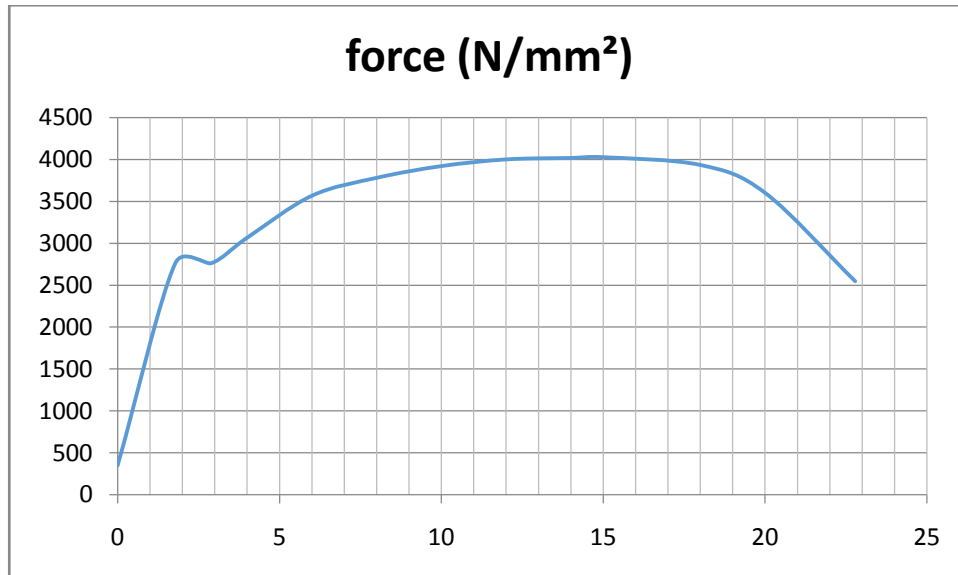


Figure 76: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M3

Tableau 24: represente les ci-dessus M2

$E=TAN((I4-I3)/J4-J3)$	-1,43771767
ϑ	0,3
$G=(E/2(1+\vartheta))$	-0,934516485

Tableau 25: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M2

M2	
σ (N/mm ²)	ϵ
368,32	0
2890	1,96
2890	3,21
3333	5
4000	10
4111	15
3333	20
2722	20,9

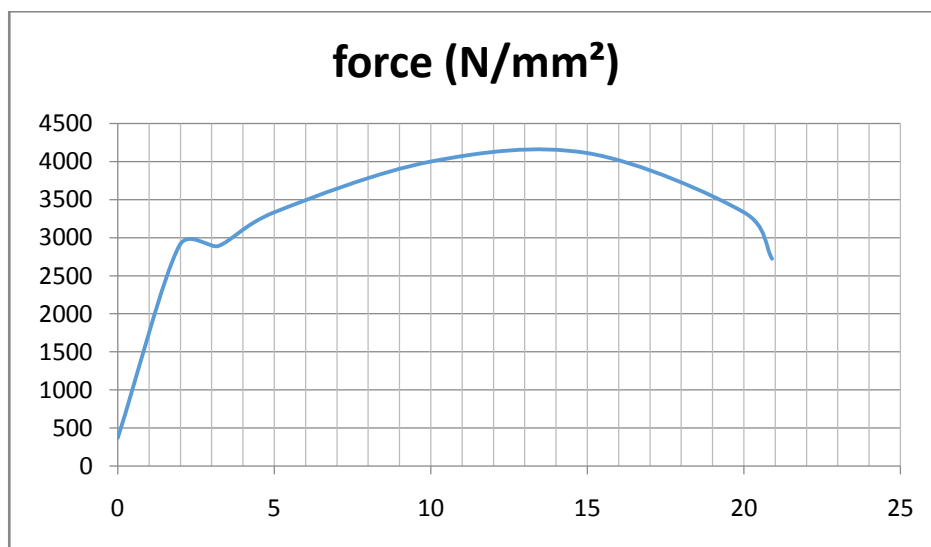


Figure 77: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M2

Tableau 26: represente les ci-dessus M1

$E=TAN((L4-L3)/M4-M3)$	-0,164479065
ϑ	0,3
$G=(E/2(1+\vartheta))$	-0,106911392

Tableau 27: Représente les valeurs des contraintes et déformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M1

M1	
σ (N/mm ²)	ϵ
352,62	0
2762	1,78
2762	2,89
3066	4
3567	6
3780	8
3920	10
4000	12
4017	14
4026	15
3933	18
3600	20

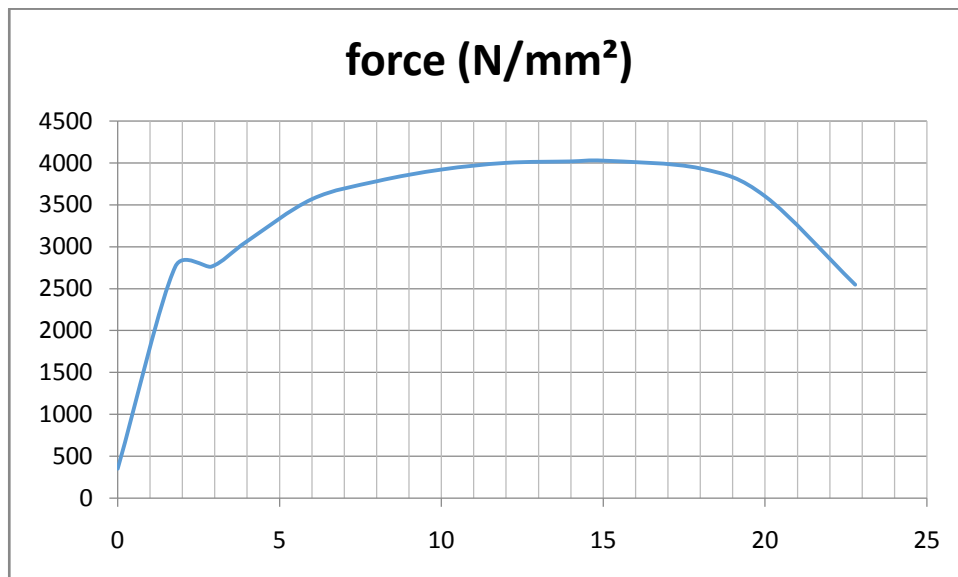


Figure 78: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette M1

 **Présentation des tableaux et figures des éprouvettes prélevées de la surface (S1, S2 et S3)**

Tableau 28: represente les ci-dessus S3

$E=TAN((A4-A3)/B4-B3)$	0,027999101
ϑ	0,3
$G=(E/2(1+\vartheta))$	0,018199416

Tableau 29: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S3

S3	
$\sigma(N/mm^2)$	ϵ
365,1	0
2867	1,78
2867	3
3200	4
3533	6
3800	8
3933	10
4000	12
4033	14
4066	15,33
4050	16
4000	18
3667	20
2933	22
2400	21,33

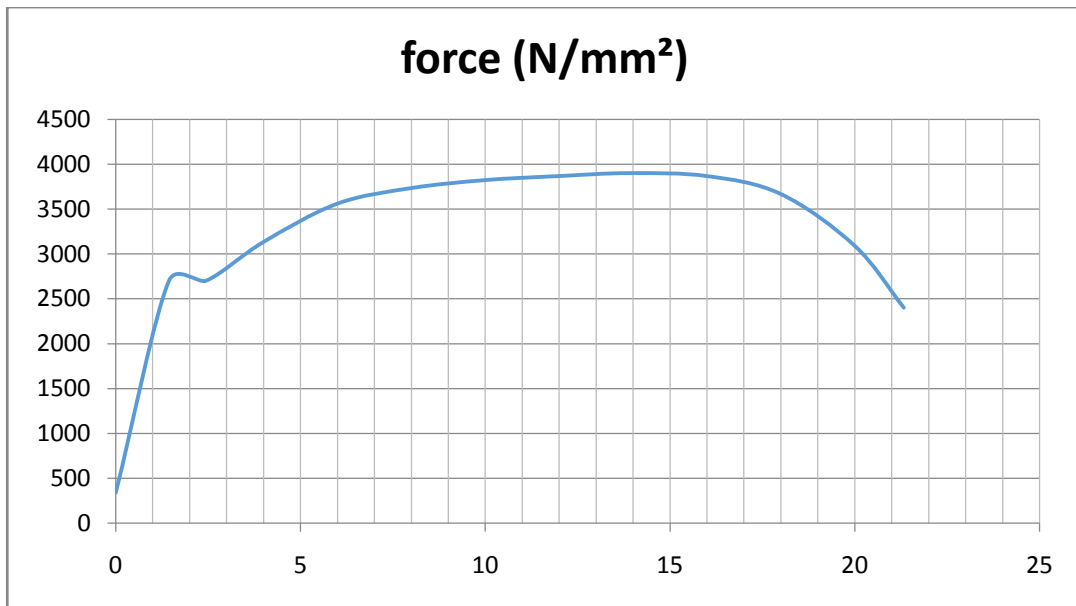


Figure 79: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S3

Tableau 30: represente les ci-dessus S2

$E=TAN((D4-D3)/E4-E3)$	-0,282557829
ϑ	0,3
$G=(E/2(1+\vartheta))$	-0,183662589

Tableau 31: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S2

S2	
σ (N/mm ²)	ϵ
355	0
2780	1,78
2780	3
3133	4
3567	6
3733	8
3867	10
4027	12
4050	14
4050	14,67
4050	16
3800	18
3200	20
2433	21,22

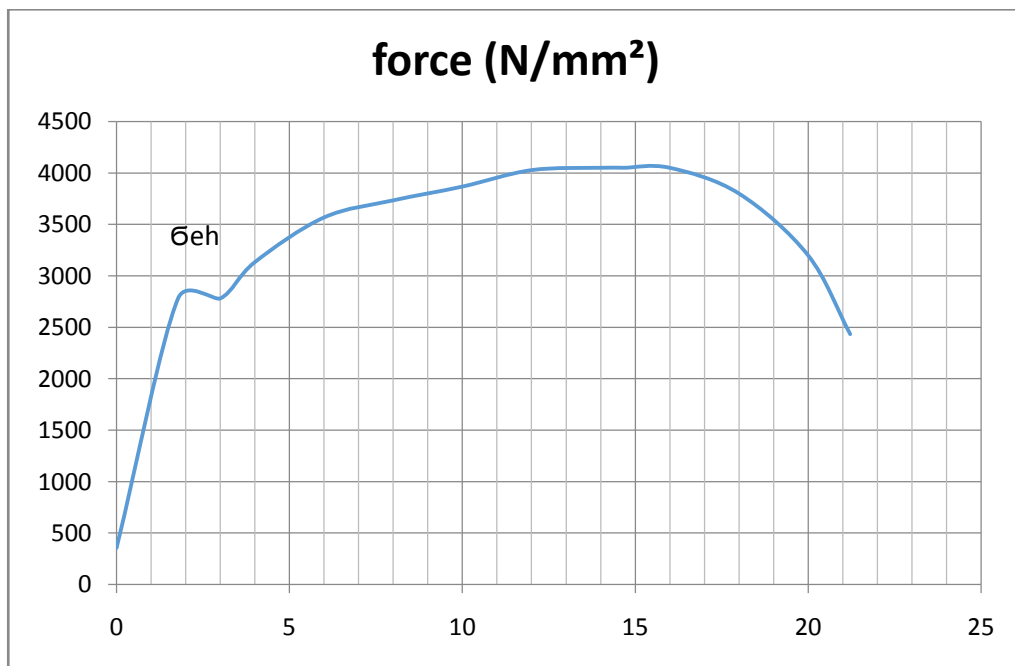


Figure 80: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S2

Tableau 32: represente les ci-dessus S1

$E=TAN((G4-G3)/H4-H3)$	-0,341098209
ϑ	0,3
$G=(E/2(1+\vartheta))$	-0,221713836

Tableau 33: Represente les valeurs des contraintes et deformation de la Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S1

S1	
$\sigma(N/mm^2)$	ϵ
339,1	0
2700	1,44
2700	2,44
3133	4
3560	6
3733	8
3822	10
3867	12
3900	13,91
3867	16
3667	18
3090	20
2400	21,33

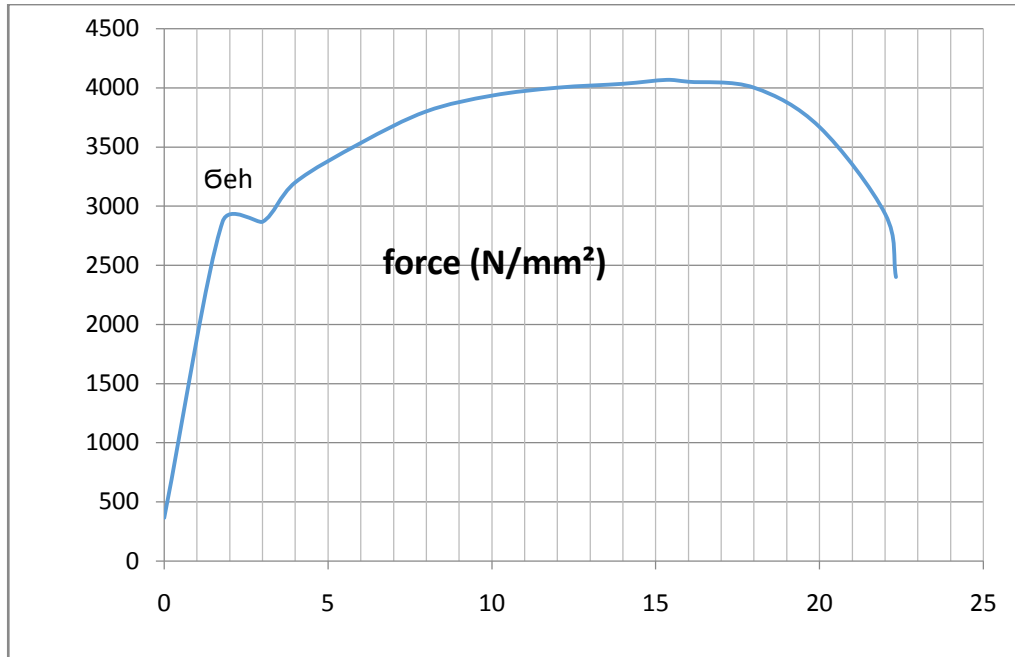


Figure 81: Courbe Ratinel de l'essai de traction de l'éprouvette S1

Le Tableau 34 :regroupe les résultats des Calculs des paramètres mécaniques de l'essai de traction suivant les équations ci-dessus :

Tableau 34: Calcul des paramètres mécaniques de l'essai de traction suivant les équations ci-dessus

Echant	Lu	L0	A%	A= $\Delta L/L$	$\epsilon = \ln(A+1)$	Z=(1-(L/L0))	Z=(A/(A+1))	Su=(S0L0/Lu)	$\bar{\sigma} = A(\epsilon) * n$
M1	96,5	70	37,86	0,379	3,210E-01	-3,786E-01	2,00E+00	7,254E+00	2,629E-01
M2	92	70	31,43	0,314	2,733E-01	-3,143E-01	2,00E+00	7,609E+00	2,205E-01
M3	91,5	70	30,71	0,307	2,678E-01	-3,071E-01	2,00E+00	7,650E+00	2,158E-01
C1	93	70	32,86	0,329	2,841E-01	-3,286E-01	2,00E+00	7,527E+00	2,298E-01
C2	92,5	70	32,14	0,321	2,787E-01	-3,214E-01	2,00E+00	7,568E+00	2,251E-01
C3	91	70	30,00	0,300	2,624E-01	-3,000E-01	2,00E+00	7,692E+00	2,112E-01
S1	90	70	28,57	0,286	2,513E-01	-2,857E-01	2,00E+00	7,778E+00	2,019E-01
S2	89	70	27,14	0,271	2,401E-01	-2,714E-01	2,00E+00	7,865E+00	1,927E-01
S3	91	70	30,00	0,300	2,624E-01	-3,000E-01	2,00E+00	7,692E+00	2,112E-01

D'après les Calculs des paramètres mécaniques de l'essai de Traction regroupés dans le Tableau ci-dessus ,on a un acier faiblement allié au Mn, il a un comportement d un acier doux, suite au laminage à chaud et le traitement thermique de recuit de normalisation.

II.4.2 Interprétation des résultats comparatifs de l'essai de résilience

Les valeurs des énergies de la rupture E (J), leurs moyennes $\sum E(J)$ et le K_{CV} sont calculées dans le Tableau ci-dessous : (Annexe 9)

Tableau 35: Résultats de l'essai de résilience des éprouvettes de la surface, le milieu et le cœur

	E (J)	K_{CV} (J/cm ²)	$\sum E$ (J)
Surface S	28,4	35,50	27,93
	31,00	38,75	
	24,40	30,50	
Milieu M	31,00	38,75	30,67
	31,00	38,75	
	30,00	37,50	
Cœur C	30,00	37,50	29,13
	30,40	38,00	
	27,00	33,75	

Tableau 36: La Norme exigée des valeurs des énergies minimale (J) en fonction de la température (°C) et de l'épaisseur nominale (mm) des éprouvettes de résilience.

Désignation		Température °C	Énergie minimale (J) Épaisseur nominale en mm		
Selon EN 10027-1 et CR 10260	Selon EN 10027-2		≤ 150 ^{a b}	> 150 ≤ 250 ^b	> 250 ≤ 400 ^c
S235JR	1.0038	20	27	27	–
S235J0	1.0114	0	27	27	–
S235J2	1.0117	– 20	27	27	27
S275JR	1.0044	20	27	27	–
S275J0	1.0143	0	27	27	–
S275J2	1.0145	– 20	27	27	27
S355JR	1.0045	20	27	27	–
S355J0	1.0553	0	27	27	–
S355J2	1.0577	– 20	27	27	27
S355K2	1.0596	– 20	40 ^d	33	33
S450J0 ^e	1.0590	0	27	–	–

CONCLUSION :

En suivant la Norme de l'essai de résilience de l'acier S355J2+N ou nos échantillons étaient refroidi à -20°C ; On a trouvé que les valeurs des énergies (J), de tous les échantillons de la surface, milieu et cœur sont pratiquement supérieure à la valeur de l'énergie minimale (J).

Donc les résultats obtenus sont conformes à la Norme.

II.4.6 Interprétation des résultats comparatifs de l'essai de dureté Vickers

Voir l'Annexe 16 qui détermine les correspondances des duretés Brinell, Vickers et Rockwell suivant la norme dite dans l'Annexe 12.


Tableau 37: Mesure des Empreintes et la moyenne de la dureté Vickers

d1 (mm)	d2 (mm)	d (mm)	Moyenne d (mm)
0.60	0.58	0.59	0.593
0.60	0.60	0.60	
0.58	0.60	0.59	
0.58	0.58	0.58	0.577
0.56	0.58	0.57	
0.58	0.58	0.58	
0.58	0.58	0.58	0.570
0.56	0.58	0.57	
0.56	0.56	0.56	
0.54	0.52	0.53	0.533
0.56	0.54	0.55	
0.52	0.52	0.52	
0.52	0.52	0.52	0.523
0.54	0.52	0.53	
0.50	0.54	0.52	

II.4.7 Interprétation des résultats comparatifs de l'essai de la dureté Vickers

Le Tableau 19 regroupe le Calcul de la surface de la forme pyramidale de l'empreinte

Tableau 38: Calcul de la surface de la forme pyramidale de l'empreinte :

d (mm)	d ² (mm ²)	S (mm ²)	HV	surface
0.593	0.352	0.190	157.9	
0.577	0.333	0.180	166.67	
0.570	0.325	0.175	171.43	
0.533	0.284	0.153	196.08	
0.523	0.274	0.148	202.70	
				coeur

Interprétation :

La dureté HV de Vickers appliquée sur notre échantillon de la surface vers le cœur ; nos montre que la dureté augmente en allant vers le cœur donc le recuit de normalisation a fait un effet adoucissement de l'acier à la surface. Ce qui est confirmé par la présence de la ferrite non négligeable dans la structure, en équilibrant la quantité de la perlite (Mn : gammagène ; Si : alphasgène).

Selon la Norme les valeurs de HV trouvées dans notre essai de dureté Vickers sont inférieures à 240HB. Selon la Norme EN 10060.

Donc notre essai est vérifié.

II.4.3 Les résultats et interprétations de la Micro-dureté

On a utilisé une contrainte HV 0,05 (car les empreintes des plus grandes contraintes englobent les autres phases).

Donc on a appliqué des contraintes sur les phases décrites dans le tableau ci-dessous :

Tableau 39: Tableau des contraintes appliquées sur les phases cristallographie de notre acier

Phases	Ferrite	Perlite	Carbure
Cœur	1023	1200	3825
milieu	860	-	-
surface	1803	-	-

Quand l'attaque chimique n'est pas suffisante pour identifier les phases qui forment la structure de notre matériau (acier) comme le Nital colore la Ferrite libre et la cémentite libre en blanc alors la microdureté, nous permet de mieux les départager.

Conclusion Générale

III. Conclusion Générale

L'objectif de ce travail est la caractérisation physico-chimique et mécanique de l'acier rond laminé à chaud (S355J2+N) 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 exigé 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 observé sur les échantillons avant et après attaque par le Nital montre la répartition des phases existantes dans cette 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 élastoplastique car les courbes ont tous les domaines correspondant.

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

Perspectives

Perspectives

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

A ce jour, mes échantillons sont au laboratoire pour voir la surface de rupture

Références

REFERENCES :

- [1] : G.MURRY : Transformation dans les aciers ; Technique de l'ingénieur, [M1115].
- [2] : P.FABREGUE : Métallurgie du laminage à chaud, [M860].
- [3] : J.BENARD et Co : Métallurgie générale, éd Masson, année d éd 1984.
- [4] : G.HILLY : Cours de Métallurgie, éd Dunod 1982.
- [5] : Catalogue des structures, 1986
- [6] : G.BAGUENANE : COURS de Métallurgie ; ENP. 1986
- [7] : G.BAGUENANE : COURS des Matériaux ; UMMTO ; 2006.
- [8] : «[https://fr.wikibooks.org/w/index.php?title=Technologie/Matériaux/Généralités/Désignation_normalisée_des_aciers&oldid=670331](https://fr.wikibooks.org/w/index.php?title=Technologie/Mat%C3%A9riaux/G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s/D%C3%A9signation_normalis%C3%A9e_des_aciers&oldid=670331)» D.FRANÇOIS :
- [9] : I. ADOUANI : analyses pharmaceutiques ; Université Ferhat Abbas Sétif-1, Laboratoire de chimie analytique
- [10] : I.LAKHTINE : Métallographie et Traitements Thermiques des Métaux. 4ème éd Mir Moscou, Année d éd 1986.
- [11] : J-PIERRE EBERHART. Analyse structurale et chimique des matériaux ; 1989
- [12] : J.LIGNON, R.MAILLEBUAU ; technologie des fabrications mécaniques ; 1983
- [13] : Essais mécaniques des métaux ; Essais de dureté ; Techniques de l'ingénieur, [M123].

Annexes

Annexe 1 :

Tableau 1: Composition chimique à l'analyse sur produit (EN 10025-2 :2004)

Désignation		Méthode de désoxydation ^b	C en % max. pour une épaisseur nominale de produit, en mm			Si	Mn	P	S	N	Cu	Autres
Selon EN 10027-1 et CR 10266	Selon EN 10027-2		< 16	> 16 < 40	> 40 ^c	% max.	% max.	% max. ^d	% max. ^e	% max. ^f	% max. ^g	% max. ^h
S235JR	1.0038	FN	0,19	0,19	0,23	—	1,50	0,045	0,045	0,014	0,60	—
S235J0	1.0114	FN	0,19	0,19	0,19	—	1,50	0,040	0,040	0,014	0,60	—
S235J2	1.0117	FF	0,19	0,19	0,19	—	1,50	0,035	0,035	—	0,60	—
S275JR	1.0044	FN	0,24	0,24	0,25	—	1,60	0,045	0,045	0,014	0,60	—
S275J0	1.0143	FN	0,21	0,21	0,21 ⁱ	—	1,60	0,040	0,040	0,014	0,60	—
S275J2	1.0145	FF	0,21	0,21	0,21 ⁱ	—	1,60	0,035	0,035	—	0,60	—
S355JR	1.0045	FN	0,27	0,27	0,27	0,60	1,70	0,045	0,045	0,014	0,60	—
S355J0	1.0553	FN	0,23 ^j	0,23 ^k	0,24	0,60	1,70	0,040	0,040	0,014	0,60	—
S355J2	1.0577	FF	0,23 ^j	0,23 ^k	0,24	0,60	1,70	0,035	0,035	—	0,60	—
S355K2	1.0596	FF	0,23 ^j	0,23 ^k	0,24	0,60	1,70	0,035	0,035	—	0,60	—
S450J0 ^l	1.0590	FF	0,23	0,23 ^l	0,24	0,60	1,80	0,040	0,040	0,027	0,60	m

^a Voir 7.2.

^b FN = acier effervescent non admis ; FF = acier complètement calmé (voir 6.2.2).

^c Pour les profils d'épaisseur nominale > 100 mm, teneur en C selon accord.

Voir option 26.

^d Pour les produits longs les teneurs en P et S peuvent être 0,005 % plus élevées.

^e Pour les produits longs, la teneur maximale en S peut être augmentée de 0,015 % pour améliorer l'aptitude à l'usinage par accord, à condition que l'acier soit traité afin de modifier la morphologie des sulfures et que la composition chimique présente une teneur minimale de Ca de 0,0020 %.

Voir option 27.

^f La valeur maximale exigée pour l'azote ne s'applique pas lorsque la composition chimique présente une teneur minimale en Al total de 0,015 % ou bien 0,013 % Al min soluble acide ou lorsque d'autres éléments fixant l'azote sont présents en quantités suffisantes. Dans ce cas, les éléments fixant l'azote doivent être mentionnés dans le document de contrôle.

^g Une teneur en Cu supérieure à 0,45 % peut entraîner une fragilité à chaud lors du formage à chaud.

^h Si d'autres éléments sont ajoutés, ils doivent être mentionnés dans le document de contrôle.

ⁱ Pour les épaisseurs nominales > 150 mm : teneur en C = 0,22 % max.

^j Pour les nuances aptes au profilage à froid sur galets (voir 7.4.2.2.3) : teneur en C = 0,24 % max.

^k Pour les épaisseurs nominales > 30 mm : teneur en C = 0,24 % max.

^l S'applique aux produits longs seulement.

^m L'acier peut présenter une teneur max. en Nb de 0,06 %, une teneur max. en V de 0,15 % et une teneur max en Ti de 0,06 %.

Annexe 2 :

Tableau 2: caractéristique mécanique, énergie de rupture KV en flexion par choc, longs , sur produits plats et longs a

Désignation		Température °C	Énergie minimale (J) Épaisseur nominale en mm		
Selon EN 10027-1 et CR 10260	Selon EN 10027-2		≤ 150 ^{a b}	> 150 ≤ 250 ^b	> 250 ≤ 400 ^c
S235JR	1.0038	20	27	27	–
S235J0	1.0114	0	27	27	–
S235J2	1.0117	– 20	27	27	27
S275JR	1.0044	20	27	27	–
S275J0	1.0143	0	27	27	–
S275J2	1.0145	– 20	27	27	27
S355JR	1.0045	20	27	27	–
S355J0	1.0553	0	27	27	–
S355J2	1.0577	– 20	27	27	27
S355K2	1.0596	– 20	40 ^d	33	33
S450J0 ^e	1.0590	0	27	–	–

^a Pour les épaisseurs nominales ≤ 12 mm, voir 7.3.2.1 de EN 10025-1:2004.
^b Pour les profils d'épaisseur nominale > 100 mm, les valeurs doivent être convenues par accord.
 Voir option 28.
^c Ces valeurs s'appliquent aux produits plats.
^d Cette valeur correspond à 27J à – 30 °C (voir Eurocode 3).
^e S'applique seulement aux produits longs.

Annexe 3 :

Tableau 3: Caractéristique mécanique a la température ambiante des nuances et qualité d'acier pour les produits plats et longs avec valeurs d'énergie de rupture en flexion par choc

Désignation		Limite d'élasticité minimale R_{eH} *										Résistance à la traction R_m *				
		MPa ^b										MPa ^d				
		Épaisseur nominale										Épaisseur nominale				
Selon EN 10027-1 et CR 10260	Selon EN 10027-2	mm										mm				
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 60	> 60 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	> 250 ≤ 400 ^e	< 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	> 250 ≤ 400 ^e	
S235JR	1.0038	235	225	215	215	215	195	185	175	–	360 à 510	360 à 510	350 à 500	340 à 490	–	
S235J0	1.0114	235	225	215	215	215	195	185	175	–	360 à 510	360 à 510	350 à 500	340 à 490	–	
S235J2	1.0117	235	225	215	215	215	195	185	175	165	360 à 510	360 à 510	350 à 500	340 à 490	330 à 480	
S275JR	1.0044	275	265	255	245	235	225	215	205	–	430 à 580	410 à 560	400 à 540	380 à 540	–	
S275J0	1.0143	275	265	255	245	235	225	215	205	–	430 à 580	410 à 560	400 à 540	380 à 540	–	
S275J2	1.0145	275	265	255	245	235	225	215	205	195	430 à 580	410 à 560	400 à 540	380 à 540	380 à 540	
S355JR	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	–	510 à 680	470 à 630	450 à 600	450 à 600	–	
S355J0	1.0553	355	345	335	325	315	295	285	275	–	510 à 680	470 à 630	450 à 600	450 à 600	–	
S355J2	1.0577	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510 à 680	470 à 630	450 à 600	450 à 600	450 à 600	
S355K2	1.0598	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510 à 680	470 à 630	450 à 600	450 à 600	450 à 600	
S450J0 ^f	1.0590	450	430	410	390	380	380	–	–	–	–	550 à 720	530 à 700	–	–	

* Pour les tôles, bandes et larges-plats de largeur > 600 mm, le sens transversal (I) à la direction du laminage est applicable. Pour tous les autres produits, les valeurs s'appliquent dans le sens parallèle (I) à la direction du laminage.

^b 1 MPa = 1 N/mm².

^c Les valeurs s'appliquent aux produits plats.

^d S'applique seulement pour les produits longs.

Annexe 4 : Tableau 4: MATERIAUX : MATERIAUX METALLIQUES : ESSAIS MECANIQUES

MATERIAUX / MATERIAUX METALLIQUES / Essais mécaniques (29-1)				
Objet	Nature d'essai ou d'analyse	Caractéristique mesurée ou recherchée	Référence de la méthode	Remarques / Limitations
Matériaux métalliques	Essai de traction à l'ambiante	ReH, Rm, Rp0,2, A, Z	NF EN ISO 6892-1 Méthode B NF EN ISO 6892-1 Méthode B – 2009 (norme annulée)* NF EN ISO 6892-1 Méthode B – 2016 (norme annulée)* NF EN 10002-1 – 1990 (norme annulée)* NF EN 10002-1 – 2001 (norme annulée)*	/
Matériaux métalliques	Essai de flexion par choc	KU, KV (J)	NF EN ISO 148-1 NF EN ISO 148-1 – 2001 (norme annulée)* NF EN 10045-1 – 1990 (norme annulée)*	Température d'essai : De - 60°C à l'ambiante
Matériaux métalliques	Essai de pliage	Angle de pliage α	NF EN ISO 7438 NF EN ISO 7438 – 2016 (norme annulée)*	/
Matériaux métalliques	Essai de dureté Rockwell	Dureté HRB et HRC	NF EN ISO 6508-1	/
Matériaux métalliques	Essai de dureté Brinell	Dureté HB	NF EN ISO 6506-1	HBW 2,5/187,5
Matériaux métalliques	Essai de dureté Vickers	Dureté HV	NF EN ISO 6507-1	HV5, HV10 et HV30

Annexe 5: Tableau 5: MATERIAUX / MATERIAUX METALLIQUES/ ESSAIS METALLOGRAPHIQUES

MATERIAUX / MATERIAUX METALLIQUES / Essais métallographiques (29-4)				
Objet	Nature d'essai ou d'analyse	Caractéristique mesurée ou recherchée	Référence de la méthode	Remarques / Limitations
Matériaux métalliques	Détermination de la grosseur du grain ferritique ou austénitique des aciers	Critères géométriques, morphologiques et de répartition	NF EN ISO 643 NF EN ISO 643 – 2003 (norme annulée)* NF EN ISO 643 – 2013 (norme annulée)* NF A 04-102 – 1980 (norme annulée)*	/
Matériaux métalliques	Examen macroscopique et macrographique par attaque aux acides forts	Critères géométriques, morphologiques et de répartition	ISO 4969	/

Annexe 6 :

Tableau 6: MATERIAUX / MATERIAUX METALLIQUES/ ESSAIS METALLOGRAPHIQUES

MATERIAUX / MATERIAUX METALLIQUES SOUDES/BRASES / Essais métallographiques (29-5)				
Objet	Nature d'essai ou d'analyse	Caractéristique mesurée ou recherchée	Référence de la méthode	Remarques / Limitations
Matériaux métalliques : Assemblages soudés	Examen macroscopique et microscopique, macrographique et micrographique	Critères géométriques, morphologiques et de répartition	NF EN ISO 17639 NF EN 1321 –1996 (norme annulée) *	/

Annexe 7 :

Tableau 7: Les normes ACIERS DE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE Laminés à chaud

LIMITE D'ÉLASTICITÉ * MPa	Désignation selon EN 10025-2 : 2004		Désignation selon EN 10025 : 1990 +A1 : 1993		France	Allemagne
	Symbolique	Numérique	Symbolique	Numérique		
	NF EN 10025 NF EN 10027-1	NF EN 10025 NF EN 10027-2	NF EN 10025 NF EN 10027-1	NF EN 10025 NF EN 10027-2	NF A 35-501	DIN 17100
185	S185	1.0035	S185	1.0035	A33	St33
235	-	-	S235JR	1.0037	E24-2	St37-2
	-	-	S235JRG1	1.0036	-	USt37-2
	S235JR	1.0038	S235JRG2	1.0038	-	RSt37-2
	S235J0	1.0114	S235J0	1.0114	E24-3	St37-3U
	S235J2+N	1.0117+N	S235J2G3	1.0116	E24-4	St37-3N
	S235J2	1.0117	S235J2G4	1.0117	-	-
275	S275JR	1.0044	S275JR	1.0044	E28-2	St44-2
	S275J0	1.0143	S275J0	1.0143	E28-3	St44-3U
	S275J2+N	1.0145+N	S275J2G3	1.0144	E28-4	St44-3N
	S275J2	1.0145	S275J2G4	1.0145	-	-
355	S355JR	1.0045	S355JR	1.0045	E36-2	-
	S355J0	1.0553	S355J0	1.0553	E36-3	St52-3U
	S355J2+N	1.0577+N	S355J2G3	1.0570	-	St52-3N
	S355J2	1.0577	S355J2G4	1.0577	-	-
	S355K2+N	1.0596+N	S355K2G3	1.0595	E36-4	-
	S355K2	1.0596	S355K2G4	1.0596	-	-
295	E295	1.0050	E295	1.0050	A50-2	St50-2
335	E335	1.0060	E335	1.0060	A60-2	St60-2
360	E360	1.0070	E360	1.0070	A70-2	St70-2

Annexe 8 :

Tableau 8: Les normes ACIERS DE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE Patinables laminées a chaud

LIMITE D'ÉLASTICITÉ * MPa	Désignation Européenne Actuelle		Correspondances			
	Selon EN 10025-5 : 2004		Selon EN 10155 : 1993		NF A 35-502	DIN SEW 087
	NF EN 10027-1	NF EN 10027-2	NF EN 10027-1	NF EN 10027-2		
235	S235J0W	1.8958	S235J0W	1.8958	E24W3	WTST37-2
	S235J2W	1.8961	S235J2W	1.8961	E24W4	WTST37-3
355	S355J0WP	1.8945	S355J0WP	1.8945	E36WA3	WTST36-3
	S355J2WP	1.8946	S355J2WP	1.8946	E36WA4	WTST36-3
	S355J0W	1.8959	S355J0W	1.8959	E36WB3	-
	S355J2W+N	1.8965+N	S355J2G1W	1.8963	-	WTST52-3
	S355J2W	1.8965	S355J2G2W	1.8965	E36WB4	-
	S355K2W+N	1.8967+N	S355K2G1W	1.8966	-	-
	S355K2W	1.8967	S355K2G2W	1.8967	-	-

Annexe 9 :

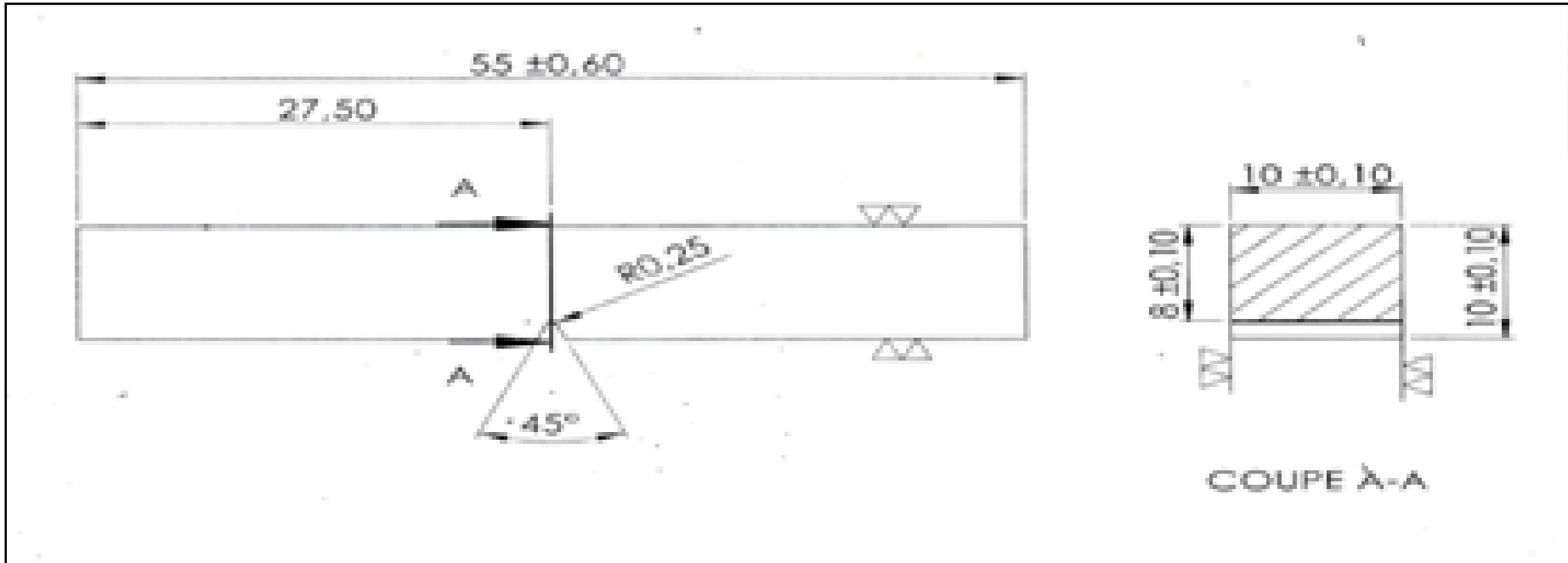


Figure 1: Dimensions technique des éprouvettes destinées à l'essai de resilience

Annexe 10 :

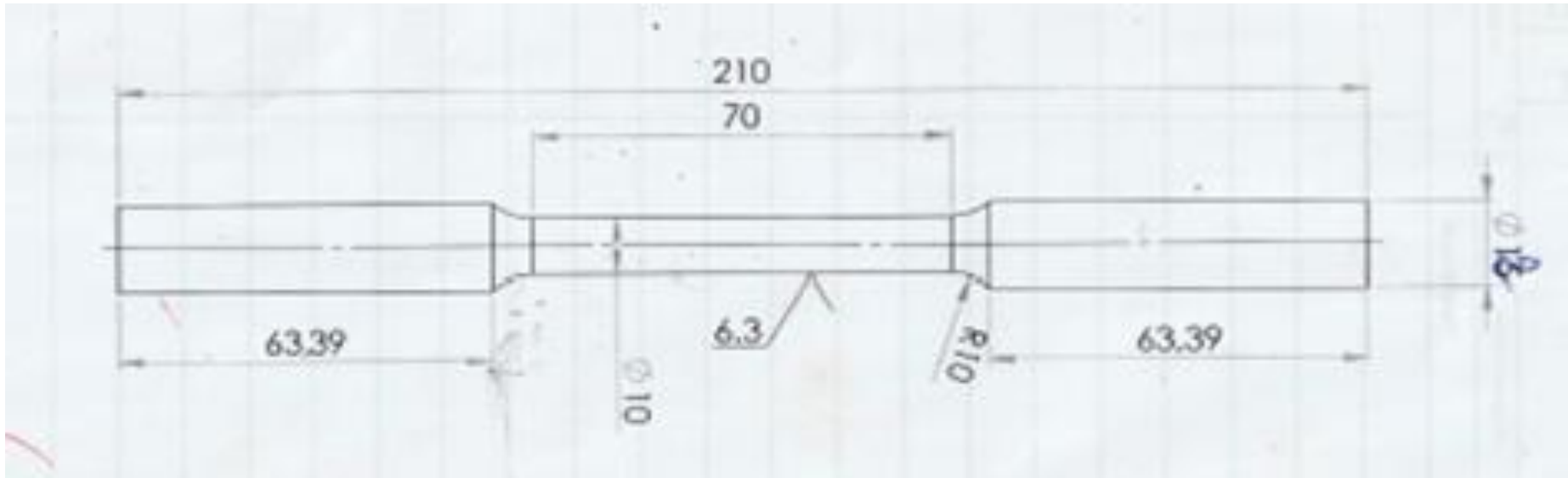



Figure 2: Dimensions technique des éprouvettes destinées à l'essai de traction

Annexe 11 :

 ELECTRO - INDUSTRIES <small>SINCE INFÉRIEUR À PRESTATIONS</small> <small>BP 17 424014 TIZI-OUZOU ALGERIE</small>	DOCUMENT SYSTÈME QUALITÉ	Édition du : 12.01.2015
	FICHE TECHNIQUE	Référence : FT 057
	ACIER ROND LAMINE A CHAUD	Page : 1/3

Détail de la norme : EN 10025-2 - Edition Janvier 2005.

Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 2 : conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés.

Dessin :

Désignation normalisée : Acier - EN 10025-2 - S355J2 + N (ou + AR).
 Acier - EN 10025-2 - 1.0577 + N (ou + AR).
 (Avec N ou AR indique l'état de livraison au choix du producteur).



Désignation pour la commande : Acier rond laminé à chaud - Diamètre d - EN 10025-2 - S355J2 .

Exemple : Acier rond laminé à chaud 20,5 EN 10025 - 2 - S355J2.

Utilisation : Les ronds d'acier sont utilisés pour des arbres dans des machines électriques tournantes.

COMPOSITION CHIMIQUE :

Analyse chimique	N	C	Mn	Si	P	S [*]	Cu	Al	Ca [*]	Nb	V	Ti
Sur produit	Mini	-	-	-	-	-	-	0,013	0,0020	-	-	-
(Nuance S355J2)	Maxi	0,23	1,7	0,60	0,035	0,035	0,060	0,015	-	0,06	0,15	0,06

*** REMARQUES :** Pour améliorer l'aptitude à l'usinage, la teneur maximale en S peut être augmentée de 0,015 %, à condition que l'acier soit traité afin de modifier la morphologie des sulfures et que la composition chimique présente une teneur minimale de Ca de 0,0020 %.

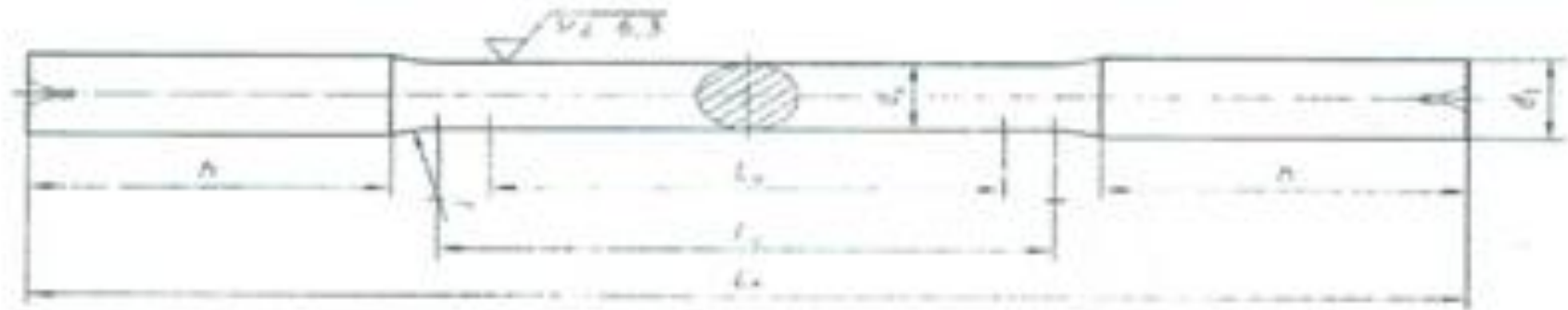
- La teneur en C des ronds de diamètres d > 30 mm est égale à 0,24 % max.
- Les teneurs en P et S peuvent être 0,005 % plus élevées (pour les produits longs).

Le présent fait technique est soumis à révision.
 Les modifications sont indiquées par des chiffres dans le tableau de composition chimique et dans d'autres cas par des chiffres dans le titre des documents concernés.

Annexe 12 :

 ELECTRO - INDUSTRIES ENTRE MOTEURS & POMPES BP 17 ALGERIA TEL: 021 500 00 00 ALGERIE	DOCUMENT SYSTÈME QUALITÉ		Édition du : 12/01/2015
	FICHE TECHNIQUE		Référence : FT 057
	ACIER ROND LAMINE A CHAUD		
CONDITIONS DE LIVRAISON :			
Nuance de l'acier :			
La nuance des ronds d'acier doit être conforme à la norme EN 10020.			
Dimensions et tolérances :			
Les dimensions et les tolérances sur la forme et les dimensions des ronds doivent être conformes à la norme EN 10060.			
Dureté : La dureté de peau des ronds doit être inférieure ou égale à 240 HB.			
Résistance à la traction : Rm à cœur doit être inférieure ou égale à 700 N/mm ² .			
Induction rémanente : L'induction rémanente Br du matériau, souhaité à la livraison, doit être inférieure ou égale 0,002 T (20 gauss).			
État de livraison : Les ronds devront être livrés après avoir subi un recuit de normalisation (+N) ou un traitement thermique équivalent (+AR) durant et après le formage à chaud.			
Réception : Chaque livraison devra être accompagnée d'un certificat de conformité usine en langue française répondant à la norme EN 10204-2.2 et comportant les indications suivantes : - Fabricant - Désignation succincte du matériau et l'état de livraison - Méthode de fusion - Le N° de la fusion et la composition chimique (analyse de la fusion).			
Reperage d'identification : La désignation succincte ou le numéro du matériau et le numéro de la fusion devront être marqués au poinçon sur le côté frontal de chaque rond, étant entendu qu'une relation claire et nette devra être garantie entre le reperage d'identification et le certificat.			
Mode de livraison : Les ronds devront être livrés en longueur 5500 à 6000 mm.			
Chef de Service Etudes et Développement Elaboré par : Belaïd IGUER	Visa : 	vérifié par : 	Visa : 
<small>La présente Fiche technique est annexée à l'achat. Toute modification de son contenu est soumise à la validation de son chef d'atelier avec celle figurant dans le lot des documents en vigueur.</small>			

Annexe 13 :



Key

d_0	test piece diameter	l_0	original gauge length ($l_0 = 5 d_0$)
d_1	diameter of gripped ends ($\geq 1.2 d_0$)	l_c	parallel length ($l_c = l_0 + d_0$)
h	length of gripped ends	l_t	total length of test piece


Figure 3: Type A test piece, of circular cross-section, with smooth cylindrical ends of clamping in wide grips

Désignation de l'éprouvette de l'essai de type A avec un diamètre $d_0=10$ mm et original gauge longueur $L_0= 70$ mm

Tensile test piece DIN 56125 – A 10X70

Annexe 14 :

Tableau 9: Caractéristiques mécaniques (état de livraison) : Laminé

 ELECTRO - INDUSTRIES UNITE MOTRICE & PRESTATIONS BP 17 AZARLA TIZ-GOURU ALGERIE	DOCUMENT SYSTEME QUALITE	Édition du : 12.01.2015
	FICHE TECHNIQUE	Référence : FT 057
	ACIER ROND LAMINE A CHAUD	Page : 2/3

CARACTERISTIQUES MECANQUES (ETAT DE LIVRAISON) : LAMINE								
Identification	Diamètre		Limite élastique minimale ReH (N/mm ²)	Résistance à la traction Rm (N/mm ²)	Allongement à la rupture minimale %	Energie minimale de rupture (J) (en flexion par choc, en longueur à -20 °C)	Section (= 0,785. d ²) (cm ²)	Poids (= 7,85 kg/dm ³) (kg/m)
	d (mm)	Tolérance						
050-100-002	20,5	± 0,5	345	470 à 630	22	27	3,29	2,58
050-100-004	25,5						5,10	4
→ 050-100-005	31	± 0,6	335	21	20	27	7,55	5,92
050-100-006	39						11,9	9,38
050-100-007	50	± 1,0	325	20	27	27	19,6	15,4
050-100-008	55						28,3	22,2
050-100-009	70	± 1,3	315	18	27	27	38,5	30,5
050-100-010	80						50,3	39,5
050-100-011	90	± 1,5	295	18	27	27	63,6	48,9
050-100-012	95						70,9	55,6
050-100-013	105	± 2,0	295	18	27	27	86,5	68
050-100-014	115						103,8	81,5
050-100-015	120	± 1,0	325	20	27	27	113	88,8
050-100-016	130						133	104
050-100-017	135	± 1,3	315	20	27	27	143	112
050-100-018	75						44,2	34,7
050-100-019	85	± 2,0	295	18	27	27	56,7	44,5
050-100-020	150						177	139
050-100-021	160		285	17	27	27	201	158

La présente fiche technique est pensée à évoluer.
 Veuillez nous aviser que cet exemplaire est bien l'ultima et signer, par email ou par fax, au date d'émission avec votre signature dans la date des éléments en vigueur.

Annexe 15 : Tableau 10: Anciennes désignations équivalentes

Désignation selon EN 10025-2:2004		Anciennes désignations équivalentes en													
		Selon EN 10025:1990 + A1:1993		Selon EN 10025:1990	Allemagne selon DIN 17 1000	France selon NF A35-501	Royaume-Uni selon BS 4360	Espagne selon UNE 38-080	Italie selon UN 7070	Belgique selon NBN A 21-101	Suède selon SS 14 suivi du numéro de la nuance d'acier	Portugal selon NP 1729	Autriche selon M 3116	Norvège selon numéro de la nuance d'acier	
S185	1.0035	S185	1.0035	Fe 310-0	St 33	A 33		A 310-0	Fe 320	A 320	13 00-00	Fe 310-0	St 320		
S235JR S235J0 a S235J2	1.0038 1.0114 a 1.0117	S235JR	1.0037	Fe 360 B	St 37-2	E 24-2		AE 235 B-FU	Fe 360 B	AE 235-B	13 11-00	Fe 360-B	USt 360 B	NS 12 120	
		S235JRG1	1.0036	Fe 360 BFU	USI 37-2			AE 235 B-FN			13 12-00		RSt 360 B	NS 12 122	
		S235JRG2	1.0038	Fe 360 BFN	RSt 37-2		40 B		AE 235 C	Fe 360 C	AE 235-C		Fe 360-C	St 360 C	NS 12 123
		S235J0	1.0114	Fe 360 C	St 37-3 U	E 24-3	40 C						St 360 CE	NS 12 124	
		S235JRG3	1.0116	Fe 360 D1	St 37-3 N	E 24-4	40 D	AE 235 D	Fe 360 D	AE 235-D		Fe 360-D	St 360 D	NS 12 124	
S235J2G4	1.0117	Fe 360 D2	--												
S275JR	1.0044	S275JR	1.0044	Fe 430 B	St 44-2	E 28-2	43 B	AE 275 B	Fe 430 B	AE 255-B	14 12-00	Fe 430-B	St 430 B	NS 12 142	
S275J0	1.0143	S275J0	1.0143	Fe 430 C	St 44-3 U	E28-3	43 C	AE 275 C	Fe 430 C	AE 255-C		Fe 430-C	St 430 C	NS 12 143	
a	a	S275J2G3	1.0144	Fe 430 D1	St 44-3 N	E 28-4	43 D	AE 275 D	Fe 430 D	AE 255-D	14 14-00	Fe 430-D	St 430 CE	NS 12 143	
S275J2	1.0145	S275J2G4	1.0145	Fe 430 D2	--						14 14-01		St 430 D		
S355JR	1.0045	S355JR	1.0045	Fe 510 B	--	E 36-2	50 B	AE 355 B	Fe 510 B	AE 355-B		Fe 510-B	St 510 B		
S355J0	1.0553	S355J0	1.0553	Fe 510 C	St 52-3 U	E 36-3	50 C	AE 355 C	Fe 510 C	AE 355-C		Fe 510-C	St 510 C	NS 12 153	
a	a	S355J2G3	1.0570	Fe 510 D1	St 52-3 N		50 D	AE 355 D	Fe 510 D	AE 355-D		Fe 510-D	St 510 D	NS 12 153	
S355J2	1.0577	S355J2G4	1.0577	Fe 510 D2	--										
a	a	S355K2G3	1.0595	Fe 510 DD1	--	E 36-4	50 DD			AE 355-DD		Fe 510-DD			
S355K2	1.0596	S355K2G4	1.0596	Fe 510 DD2	--										
S450J0	1.0590						55 C								
E295	1.0050	E295	1.0050	Fe 490-2	St 50-2	A 50-2		A 490	Fe 490	A 490-2	15 50-00 15 50-01	Fe 490-2	St 490		
E335	1.0060	E335	1.0060	Fe 590-2	St 60-2	A 60-2		A 590	Fe 590	A 590-2	16 50-00 16 50-01	Fe 590-2	St 590		
E360	1.0070	E360	1.0070	Fe 690-2	St 70-2	A 70-2		A 690	Fe 690	A 690-2	16 55-00 16 55-01	Fe 690-2	St 690		

^a Lorsqu'un produit est livré à l'état N, l'indication +N doit être ajoutée à la désignation (voir 4.2.2).