

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE
SPÉCIALITÉ : GÉNIE DES MATÉRIAUX

PAR :

BAHOUCHE HALIMA

Thème

**Caractérisation d'un acier S355 J2+N en construction métallique
poste traitement thermique**

Le jury composé de :

Mr.	D. Amari	Président
Mr.	Y. Khelfaoui	Rapporteur
Mr.	R. Younes	Examineur

Soutenu le 17/11/2021

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2020-2021

Remerciements

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements sont destinés à Mr Y. KHELFAOUI, notre promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Nous ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous.

Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Sans oublier l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia,

Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude.

Enfin, un merci particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce mémoire aux personnes qui me sont les plus chers :

À mon père, la plus belle marque de reconnaissance et d'encouragement qu'on puisse leur offrir est notre réussite.

À ma très chère mère l'être le plus noble qui a sacrifié les plus belles années de sa vie.

- *À mes sœurs.*
- *À mon frère.*
- *À tous les membres de ma famille.*
- *À mes meilleures amies.*
- *À tous les camarades de ma section.*

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	Four électrique	3
Figure I.2	Convertisseur.....	4
Figure I.3	La coulée	5
Figure I.4	Schéma représentatif du procédé de laminage	5
Figure I.5	Schéma explicatif des procédés de fabrication de l'aciers.....	6
Figure I.6	Diagramme d'équilibre Fer-Carbone (Fe-C).....	7
Figure I.7	Transformation allotropique de fer	8
Figure I.8	Structure cristalline de la ferrite (Réseau cubique centré).....	9
Figure I.9	Structure cristalline de l'austénite (réseau).....	10
Figure I.10	Courbe de traction	14
Figure I.11	Courbe de transition de la résilience.....	17
Figure I.12	Microscope optique	20
Figure I.13	Microscope électronique à balayage.....	20
Figure I.14	Schéma explicatif de la DRX.....	21
Figure I.15	Dispositif de la DRX.....	21
Figure I.16	Machine de traction.....	23
Figure I.17	Eprouvette de traction.....	23
Figure I.18	Courbe de traction.....	24
Figure I.19	Principe de la dureté brinell.....	25
Figure I.20	Principe de la dureté Vickers.....	25
Figure I.21	Eprouvette de résilience en U.....	27
Figure I.22	Eprouvette de résilience en V.....	27
Figure I.23	Principe de l'essai de Charpy.....	28
Figure I.24	Courbe de cycle thermique.....	30
Figure I.25	Cycle thermique du recuit.....	32
Figure I.26	Traitements thermiques des aciers.....	35

Chapitre II

Figure II.1	Eprouvette de traction normalisée	38
Figure II.2	Eprouvettes de résilience normalisée	38
Figure II.3	Scie mécanique	39
Figure II.4	La fraiseuse	39
Figure II.5	La fraiseuse à commande numérique	40
Figure II.6	La polisseuse	41
Figure II.7	La composition du Nital	42
Figure II.8	Microscope optique	42
Figure II.9	Moutons de Charpy	44
Figure II.10	Principe de l'essai de dureté brinell	44
Figure II.11	Machines d'essai de dureté	45
Figure II.12	Principe de l'essai de dureté vickers	45
Figure II.13	Dispositifs de l'essai Vickers	46
Figure II.14	Diagramme TTC.....	47
Figure II.15	Four électrique	47

Chapitre III

Figure III.1	Microstructure de l'acier S355 a l'état brut	49
Figure III.2	Microstructure de l'acier après traitement thermique.....	50
Figure III.3	Empreinte de la microdureté	51
Figure III.4	Courbe de la microdureté avant traitement	52
Figure III.5	Courbe de la microdureté après traitement	53
Figure III.6	Courbe de dureté HB avant traitement	54
Figure III.7	Courbe de dureté après traitement	54
Figure III.8	Courbe de résilience dans le sens latéral	56
Figure III.9	Courbe de résilience dans le sens transversal	57

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1	Caractéristiques du fer	7
Tableau I.2	Caractéristiques du Carbone	8
Tableau I.3	Classification des aciers selon leur composition chimique	10-11

Chapitre II

Tableau II.1	Composition chimique de l'acier d'étude	37
---------------------	---	----

Chapitre III

Tableau III.1	a Fourchette de la composition chimique de l'acier S355 J2+N	48
Tableau III.2	Mesure de la micro dureté	49
Tableau III.3	Mesure de la dureté HB	51
Tableau III.4	Résultats de l'essai de résilience sens latérale	53
Tableau III.5	Résultats de l'essai de résilience sens transversal	55

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I Généralités sur les aciers.....	2
I. Synthèses bibliographiques.....	2
I.1. Historique.....	2
I.2. Définition de l'acier	2
I.3. Fabrication de l'acier	2
I.4. Diagramme d'équilibre Fer Carbone	7
I.4.1. Constituants du diagramme Fer-Carbone	9
I.5. La composition chimique des aciers	10
I.6. Classification des aciers	11
I.6.1. Les aciers au carbone d'usage général.....	11
I.6.2. Les aciers de traitements thermiques	11
I.6.3. Les Aciers à outils.....	12
I.6.4. Aciers inoxydables.....	12
I.7. Les propriétés mécaniques des aciers	12
I.7.1. La limite d'élasticité.....	13
I.7.2. La résistance à la traction	14
I.7.3. La dureté.....	14
I.7.4. L'allongement à la rupture	15
I.7.5. L'énergie de rupture en flexion par choc ou résilience	15
I.7.6. La ténacité	18
I.8. Méthodes de caractérisation	19
I.8.1. Méthodes de caractérisations non destructives	19
I.8.1.1. Caractérisations microstructurales	19
I.8.1.2. Préparation des échantillons	19
I.8.1.3. Le microscope optique	19
I.8.1.4. Le microscope électronique à balayage (MEB)	20
I.8.1.5. La diffraction de rayons X (DRX)	21
I.9. Méthodes de caractérisation destructive	22
I.9.1. l'essai de traction	22
I.9.1.1. Principe de l'essai	22
I.9.1.2. Eprouvette.....	22
I.9.1.3. Exécution de l'essai.....	23
I.9.1.4. Essai de dureté	24
I.9.1.4.1. Objectif et principe de dureté.....	24
I.9.1.4.2. Eprouvettes	24

I.9.1.4.3. Exécution de l'essai.....	24
I.9.1.5. Essai Brinell.....	25
I.9.1.6. Essai Vickers	25
I.9.1.7. Essai de résilience	26
I.9.1.7.1. Objectif et principe de l'essai.....	26
I.9.1.7.2. Les éprouvettes pour la résilience :	26
I.9.1.7.3. Principe de l'essai.....	27
I.10. Les traitements thermiques.....	29
I.10.1. Définition.....	29
I.10.2. Les traitements thermiques de l'acier.....	30
I.10.2.1. Les recuits.....	30
I.10.2.2. La trempe.....	32
I.10.2.3. Le revenu	34
I.10.2.4. Défauts des traitements thermiques de l'acier	35
I.10.2.5. Les types de fours	36
Chapitre 2 : techniques expérimentales.....	37
II. Techniques expérimentales.....	37
II.1 Introduction.....	37
II.2 Matériaux utiliser	37
II.3 Elaboration des éprouvettes	37
II.3.1 Les éprouvettes de traction.....	37
II.3.2 Eprouvette de résilience	38
II.4 Appareillage.....	39
II.4.1 Scie mécanique type ALMOSMA3	39
II.4.2 La fraiseuse	39
II.4.3 La fraiseuse à commande numérique.....	40
II.5 Etudes métallographiques	40
II.5.1 Préparation des échantillons	40
II.5.2 Attaque chimique.....	41
II.5.3 Observation optique.....	42
II.6 Essais mécaniques	43
II.6.1 Essai de résilience.....	43
II.6.2 Mesure de la dureté :	44
II.7. Traitement thermique.....	46
Chapitre III : Résultats et interprétations	48
III. Résultats et interprétation	48

III.1.	Introduction.....	48
III.2.	Le matériau	48
III.3.	La composition chimique.....	48
III.3.1.	Etat de livraison	48
III.4.	Etude micrographique.....	48
III.4.1.	Microstructure de l'acier a l'état brut.....	49
III.4.2.	Microstructure de l'acier après traitement thermique	49
III.5.	Mesure de la Microdureté	50
III.6.	Discutions des résultats de la microdureté	51
III.7.	Mesure de la dureté	53
III.8.	Discutions des résultats de la dureté.....	54
III.9.	Essai de résilience.....	55
III.10.	Discutions des résultats de l'essais de résilience.....	56
III.11.	Conclusion	58
	Conclusion générale.....	59
	Références bibliographiques	60

Introduction générale

Introduction générale

Pendant un long temps, L'acier jouait un rôle majeur dans notre vie quotidienne. Son intérêt et sa demande le qualifie pour qu'il soit à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles

L'acier a opéré sa révolution technologique pour être aujourd'hui présent dans presque tous les secteurs de l'activité économique. Plusieurs facteurs expliquent cette importance : sur le plan mécanique, les aciers ont un fort module d'élasticité et une forte limite élastique, et à cause de leurs meilleures propriétés aussi physicochimiques que mécaniques qu'ils possèdent, ils se prêtent facilement à une production en masse. L'acier demeure le seul matériau capable tout à la fois de soutenir des efforts et des charges considérables, de conserver ses vertus à haute et basse température et de résister à la corrosion. On peut modifier également leurs propriétés en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle des aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements mécaniques prenant en surface ou à cœur de la matière ; on parle alors des aciers traités.

Donc la connaissance de la structure et du comportement des aciers au cours de leur utilisation reste impérative.[1]

Dans tous les cas, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. Les principaux secteurs d'utilisation de l'acier sont :

- Les bâtiments (44%),
- La construction des machines et appareillages (22%),
- L'automobile (19%)
- Les emballages (4%). Ses usages sont presque illimités.

Chapitre I

Généralités sur les

aciers

I. Synthèses bibliographiques

I.1. Historique

En 1786, Berthollet, Monge et Vandermonde, trois savants français, établirent la définition exacte du trio Fer-Fonte-Acier et le rôle du carbone dans l'élaboration et les caractéristiques de ces trois matériaux. Toutefois, il fallut attendre les grandes inventions du XIX^{ème} siècle (les fours Bessemer, Thomas et Martin) pour que l'acier, jusqu'alors fabriqué en faible quantité à partir du fer, connaisse un développement spectaculaire et s'impose rapidement comme le métal-roi de la révolution industrielle. Au début du XX^{ème} siècle, la production mondiale d'acier atteignit 28 millions de tonnes, soit six fois plus qu'en 1880. Et à la veille de la première guerre mondiale, elle grimpa à 85 millions de tonnes.

En quelques décennies, l'acier permit d'équiper puissamment l'industrie et supplanta le fer dans la plupart de ses applications. [2]

I.2. Définition de l'acier

L'acier est un alliage fer-carbone contenant moins de 2 % de carbone, et d'autres éléments. Le fer contenu dans l'acier provient soit de minerai, soit du recyclage. L'acier produit en France, comme dans les autres pays développés, contient en moyenne un peu plus de la moitié de fer recyclé. Dans les pays émergents tels que le Brésil ou la Chine, l'acier est produit majoritairement à partir de minerai puisqu'il n'y a pas encore suffisamment de recyclage.

Pour transformer la fonte en acier, il suffit de la débarrasser de son carbone excédentaire en le brûlant avec de l'oxygène. La composition chimique de l'acier liquide obtenu à partir de la fonte ou par fusion de fer recyclé doit ensuite être ajustée en fonction des propriétés de mise en œuvre et d'utilisation souhaitées. L'acier liquide est ensuite solidifié, généralement sous une forme assez massive, puis mis en forme habituellement par laminage à chaud et éventuellement par laminage à froid pour les tôles les plus minces. Les tôles minces peuvent être revêtues d'une couche très fine d'un autre métal, par exemple d'étain pour le fer-blanc ou de zinc pour les tôles galvanisées, voire enduites d'un revêtement organique (vernis, peinture...) avant d'être livrées [3].

I.3. Fabrication de l'acier

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

- Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.

- Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique. [3]

- **Matières premières => Acier liquide**

- **Usine d'agglomération** : Au départ, le minerai de fer possède des propriétés chimiques et physiques qui le rendent inexploitable par le haut-fourneau. Il faut donc le préparer par broyage et calibration en grains qui s'agglomèrent entre eux. Le tout est cuit sous hotte à 1300°C. On obtient un aggloméré que l'on va concasser et calibrer.

- **Haut fourneau** : minerai de fer préparé en usine d'agglomération + coke (carbone presque pur doté d'une structure poreuse et résistante à l'écrasement, utilisé ici en tant que réducteur). On extrait le fer de son minerai → le fer se charge en carbone => on obtient de la fonte.

En parallèle, nous avons aussi le four électrique, employé pour les aciers longs et les aciers inoxydables. On y utilise de la ferraille recyclée que l'on va fondre à l'aide d'arcs électriques.



Figure I.1 : Four électrique

- **Convertisseur à oxygène** : convertit la fonte en acier en brûlant les éléments indésirables (carbone en partie et résidus) grâce à l'insufflation d'oxygène pur. On obtient de l'acier liquide que l'on va verser dans une poche.



Figure I.2: Convertisseur

- **Mise à nuance :**

Calmage → consomme l'oxygène dissout dans l'acier

Dégazage → décarburation, déshydrogénation

Affinage → ôte les derniers éléments indésirables (phosphore, soufre)

Ajout des éléments d'alliage

- **Mise à température :** mise à la bonne température pour le coulage → 30°C au-dessus du Liquidus de l'alliage.

• **Acier liquide => Demi-produits**

- **Coulée continue :** acier liquide coulé dans une lingotière de forme souhaitée (carrée, Rectangulaire ou ronde selon ce que l'on veut fabriquer), puis refroidissement violent à l'eau.

On obtient des demi-produits qui vont porter différents noms :

_ « Brames », pour les produits plats

_ « Blooms » et « Billettes », pour les produits longs de forme carrée.



Figure I.3. La coulée

- **Demi-produits => Produits finis**

- **Laminage** : mise en forme des demi-produits sous forme de produits finis. A partir des brames, on va pouvoir obtenir des plaques, des feuilles, des bobines, etc. En utilisant les blooms et les billettes, on obtiendra des poutrelles, des profilés, des rails, des barres, des fils, etc. [4]

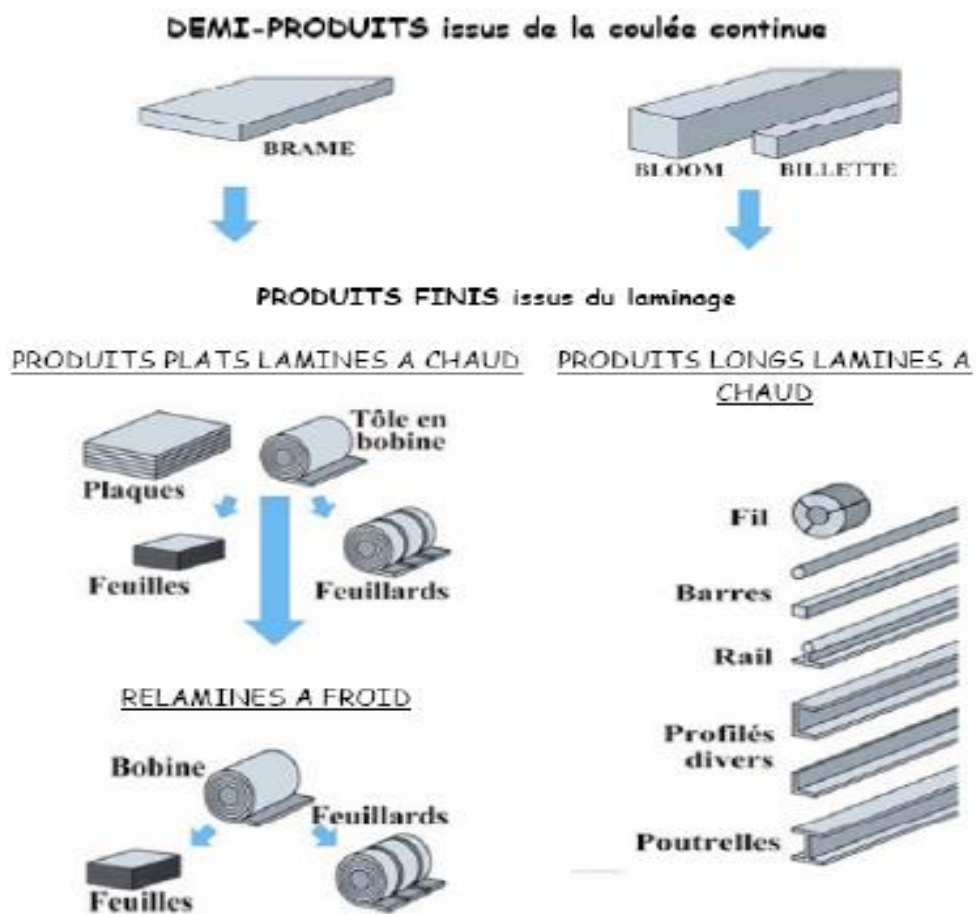


Figure I.4 Schéma représentatif du procédé de laminage

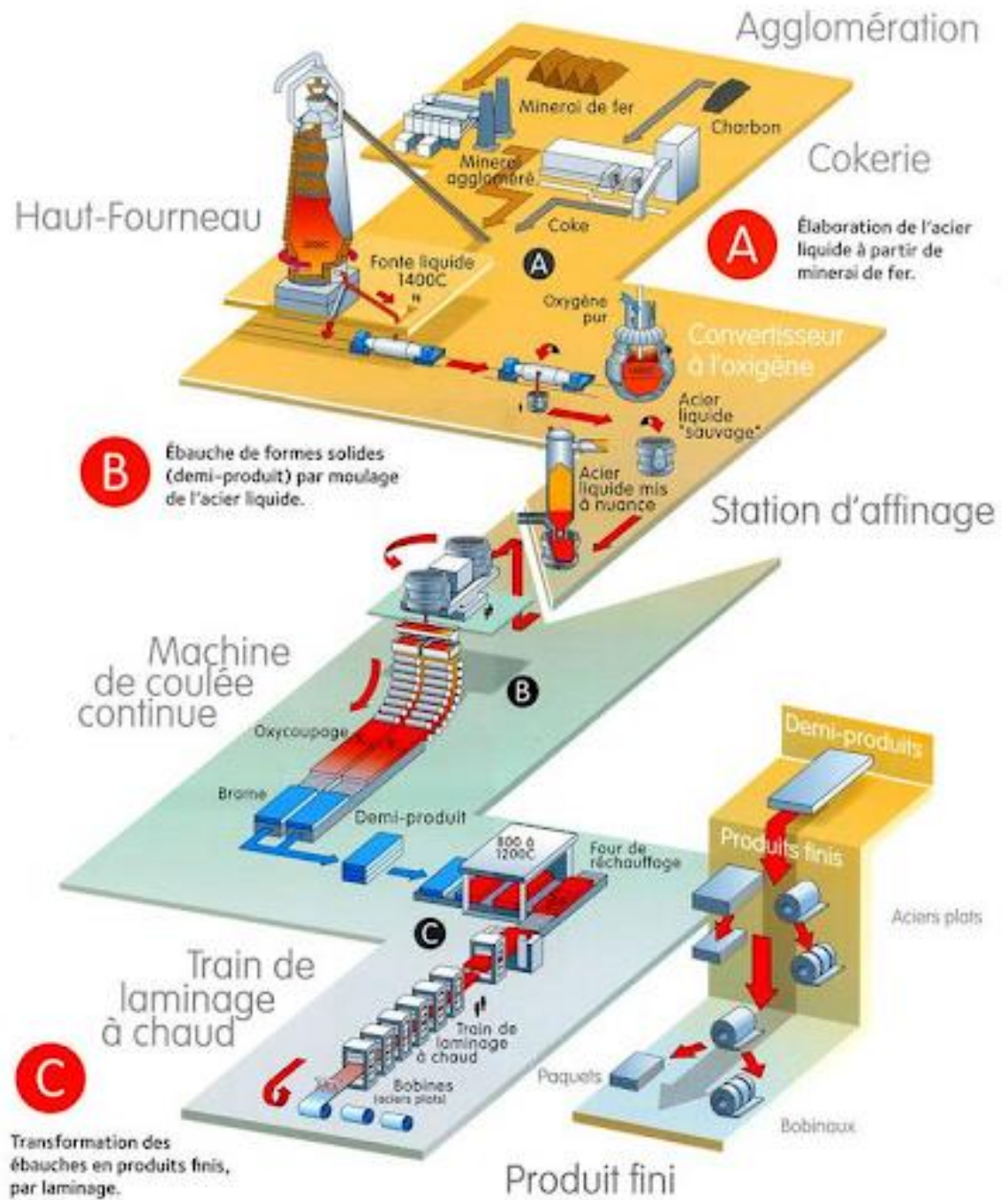


Figure I.5 : schéma explicatif des procédés de fabrication de l'acier

I.4. Diagramme d'équilibre Fer Carbone

Il est probable que l'alliage binaire du fer et du carbone soit le plus important de tous les systèmes d'alliages. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone. La présente section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles [4].

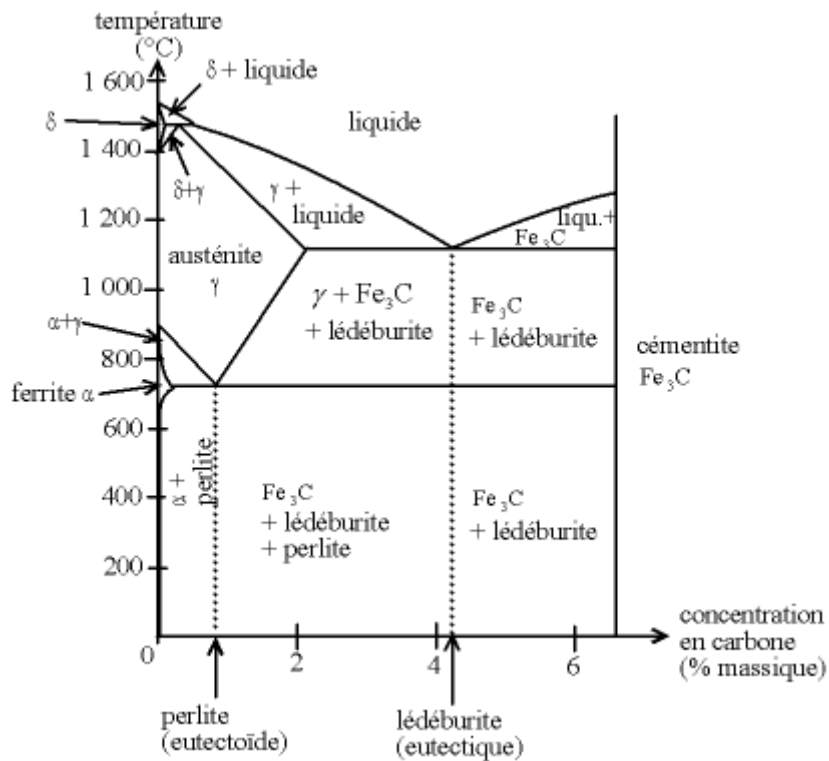


Figure I.6 Diagramme d'équilibre Fer-Carbonate (Fe-C)

Le diagramme d'équilibre se compose des éléments suivants :

a. Le fer

Le fer existe sous trois variétés allotropiques, il existe sous la forme de fer alpha, gamma et delta de structures cristallines : CC et CFC. Il est doté des caractéristiques suivantes :

Tableau.I.1. Caractéristiques du fer

Nombre atomique	Masse atomique (g/mole)	Rayon atomique (Å)	Masse volumique (g/cm ³)	Température de fusion (°C)
26	55.85	1.27 (dans le réseau CFC)	7.8	1539

- À des basses températures jusqu'à 912°C, ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré (CC) : On l'appelle alors Fer α . Le Fer α ne dissout pratiquement pas le carbone : 0.02%C au maximum à 723°C, moins de 0.01%C à 300°C.
- À des températures supérieures à 912 °C et jusqu'à 1394°C le réseau cristallin est du type cubique à faces centrées (CFC) : on l'appelle Fer γ . Le fer γ dissout facilement le carbone : 0.8%C à 723°C, 2.14%C à 1147°C.
- Au-dessus de 1394°C et jusqu'au point de fusion à 1538°C, le fer retrouve la structure cubique centrée du Fer α : On l'appelle alors Fer δ . Il dissout un peu mieux le carbone que le Fer α (0.07%C au maximum à 1493°C).

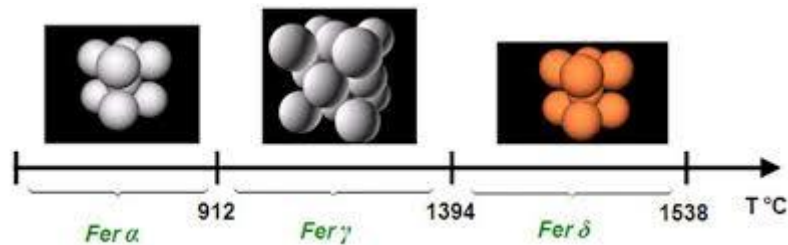


Figure I.7. Transformation allotropique de fer [4].

Le carbone

C'est un élément non métallique peut abondant (0,1% en masse dans l'écorce terrestre). Il est rare à l'état libre, on le rencontre à l'état combiné dans toutes les substances végétales et animales comme dans le pétrole, le charbon, le bois, la houille etc... Ses caractéristiques sont les suivantes :

Tableau I.2.Caractéristiques du Carbone

Numéro atomique	Masse atomique (g/mole)	Rayon atomique (Å)	Masse volumique (g/cm³)	Température de fusion (°C)
6	12	0.77	2.5	3500

Le carbone dont le point de fusion est supérieur à 3500°C est soluble dans le fer et peut se cristalliser à l'état pur en formant le graphite ou se combiner avec le fer en formant une phase intermétallique Fe₃C appelée cémentite ou carbone de fer.

- La phase intermétallique cémentite a une structure très compliquée et elle est très dure
- La Formation du graphite ou de la cémentite dépend des éléments d'alliage qui accompagnent le fer et surtout du type de refroidissement (vitesse de refroidissement).
- Lorsque le refroidissement du métal liquide est lent les atomes de carbone se cristallisent en formant le graphite et selon le cas contraire, lorsque le refroidissement est rapide on a la formation de la cémentite (Fe_3C), qui ne peut se décomposer à la température ambiante, mais à un maintien de température supérieure à 500°C et d'une durée très longue. [4]

I.4.1. Constituants du diagramme Fer-Carbone

Le diagramme Fer-Carbone met en évidence la présence des constituants suivants :

a. La ferrite

C'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer α , elle se cristallise dans un réseau cubique centré (CC).

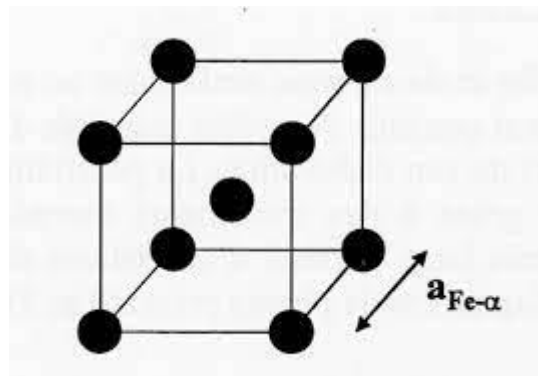


Figure I.8 Structure cristalline de la ferrite (Réseau cubique centré)

b. La perlite

Formée d'agrégats intimes de ferrite et de cémentite d'où la composition est 87,6 % de ferrite et de 12,4 % de cémentite.

c. L'austénite

C'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer γ ; elle se cristallise dans un réseau cubique à faces centrées.

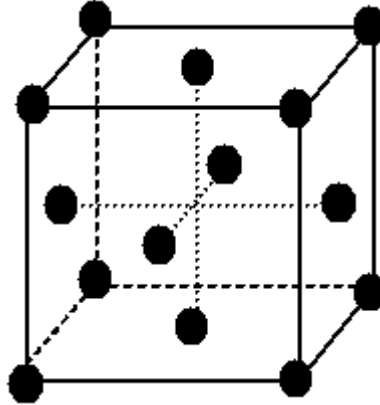


Figure I.9. Structure cristalline de l'austénite (réseau CFC)

d. La ledeburite

Les alliages dont la teneur en carbone excède 2,06%, donne naissance au refroidissement à un eutectique, mélange de cémentite et d'austénite correspondant à une teneur en carbone de 4,3 % ; c'est la lédeburite.

e. La Cémentite

C'est un composé chimique de dureté élevée.

f. Le graphite (carbone pur)

Le graphite est la forme stable de la phase riche en carbone, il remplace la cémentite dans le diagramme Fer- carbone, et il cristallise dans le système hexagonal [5].

I.5. La composition chimique des aciers

On a désigné des alliages de fer et de carbone sous le nom aciers non alliés ou aciers au carbone, des alliages de fer plus ou moins carburés et d'autres éléments, en générale métalliques sous le nom d'acier alliés

Tableau I.3. Classification des aciers selon leur composition chimique

Qualités	C (%)	Mn (%)	P (%)	Si (%)	S (%)
Extra-doux	0.15	0.4	0.04	0.03	0.02
Doux	0.25	0.4	0.04	0.03	0.02

			0.06	0.10	0.03
Mi- doux	0.35	0.4	0.06	0.15	0.03
Mi-dur	0.45	0.5	0.06	0.20	0.03
Dur	0.55	0.6	0.06	0.25	0.03
Extra-dur	0.65	0.7	0.06	0.30	0.03

I.6. Classification des aciers

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes.

On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. ; L'adoption de cette dernière, nous permet de recenser les familles d'aciers suivantes [6].

I.6.1. Les aciers au carbone d'usage général

Les aciers au carbone d'usage général, utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 85 % de la production des aciers. Ce sont des matériaux produits en très grande quantité et dont le prix est relativement bas. Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition (manganèse, silicium...) et des impuretés (soufre et phosphore) dont la présence découle de leur mode d'élaboration.[7]

I.6.2. Les aciers de traitements thermiques

Les aciers alliés ou non alliés de traitements thermiques sont définis en fonction de leur composition. La composition chimique de ces aciers permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés recherchées.

-Aciers non alliés :

Ces aciers sont, en fait, intermédiaires entre les aciers d'usage général et les aciers fins ; on peut leur faire subir un traitement thermique mais les caractéristiques mécaniques obtenues peuvent être assez variables d'un lot à l'autre et même à l'intérieur d'un même lot.

-Aciers alliés :

On distingue deux grandes catégories d'aciers alliés :

- **Aciers faiblement alliés** : Ce sont des aciers dans lesquels aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5%.
- **Aciers fortement alliés** : Dans ces aciers, au moins un élément d'addition atteint la teneur supérieure ou égale à 5% [8].

I.6.3. Les Aciers à outils

Ce Sont des aciers utilisés pour la fabrication d'outils mécaniques tels que les mèches, outils de coupe, cisailles, marteaux, burins...etc. Les caractéristiques d'utilisation des aciers à outils sont semblables à celles des aciers alliés, mais elles exigent l'amélioration d'un certain nombre de propriétés : la dureté, la trempabilité ; la tenue à chaud, la ténacité, la résistance et la résistance aux chocs thermiques.[7]

I.6.4. Aciers inoxydables

Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages à base de fer dont la principale propriété est la résistance à la corrosion généralisée. Toutefois, bien qu'on les qualifie d'inoxidables, ces aciers ne sont pas dans tous les cas totalement exempts d'une possibilité de corrosion. Le chrome est l'élément essentiel qui, à des teneurs supérieures à environ 12 %, rend l'acier inoxydable en favorisant, en milieu oxydant, la formation d'un film passif à sa surface.[7]

I.7. Les propriétés mécaniques des aciers

Les propriétés des métaux caractérisent leurs comportements face à différentes Actions extérieures correspondant aux diverses conditions d'emploi. Globalement on constate que, d'un point de vue pratique ces propriétés peuvent être classées en plusieurs catégories :

- les caractéristiques de résistance (mécanique) avec la « limite d'élasticité », la « résistance à la traction » et la « dureté » ;
- les caractéristiques de ductilité avec « l'allongement à la rupture », « l'allongement sous charge maximale » ou « allongement réparti » et la « striction » ;
- une caractéristique particulière, « l'énergie de rupture en flexion par choc » ou « résilience »

- la « ténacité » ;
- la « résistance à la fatigue » ;
- la « tenue mécanique à chaud ». [9]

I.7.1. La limite d'élasticité

La limite d'élasticité est la limite de la charge unitaire (effort rapporté à la section **initiale** de l'éprouvette) au-delà de laquelle le métal se déforme d'une manière irréversible c'est-à-dire qu'il ne conserve plus sa géométrie initiale (la pièce considérée n'est plus à la cote). Elle est mesurée au cours du début de l'essai de traction qui est l'essai mécanique de base ; sa méthode est décrite par la norme NF EN 10002. Il consiste à soumettre une éprouvette de forme définie à un effort de traction croissant et à enregistrer les variations de la force appliquée et celles de la déformation de l'éprouvette. Le diagramme obtenu constitue la « courbe de traction » (figure I.10) qui représente les évolutions de la charge unitaire (effort de traction/section initiale de la partie calibrée de l'éprouvette) à laquelle est soumise l'éprouvette en fonction de l'allongement relatif (allongement/ longueur initiale de la base de mesure exprimé en %) qu'elle subit. Cet allongement est mesuré sur la partie calibrée de l'éprouvette ; la base de mesure l_0 varie avec la section de la partie calibrée S_0 selon la relation :

$$l_0 = 5,65 \times \sqrt{S_0}$$

La courbe de traction (figure I.10) comporte plusieurs domaines :

- une partie linéaire AB, à forte pente dans laquelle le métal subit des déformations réversibles ;
- une partie courbe BCD qui correspond au domaine dans lequel le métal subit des déformations irréversibles. Ce domaine peut être divisé en deux parties :
 - la partie « montante » BC au cours de laquelle l'effort unitaire augmente avec l'allongement. Si l'on s'arrête au point M, le fonctionnement réversible ultérieur du métal se fera selon la droite MN,
 - la partie « descendante » CD au cours de laquelle l'éprouvette subit une déformation très localisée qui réduit sa section jusqu'à engendrer sa rupture.

Les déformations dans la partie AB de la courbe (figure I.10) sont réversibles ; on les dit « élastiques » et le point B définissant la limite du domaine d'élasticité est dit « limite d'élasticité ». En effet on constate que :

– sur la courbe I.10, la déformation plastique débute à la faveur d'une instabilité qui se traduit par un crochet. Conventionnellement on détermine alors la limite supérieure d'écoulement ReH qui est la charge unitaire pour laquelle on observe une chute de l'effort de traction ; [9]

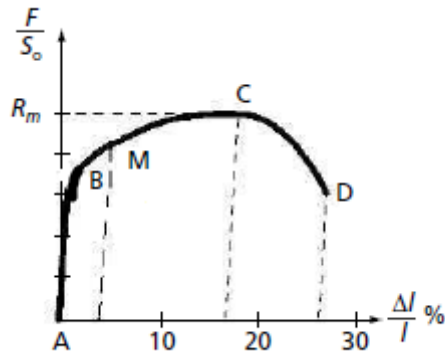


Figure I.10 courbe de traction

1.7.2. La résistance à la traction

La résistance à la traction R_m est la charge maximale que peut supporter le métal soumis à une traction. Au-delà de cette valeur de la charge unitaire apparaît le phénomène d'instabilité qui conduit à la rupture avec formation de la striction. Sa valeur est déterminée au cours de l'essai de traction ; elle correspond au point B de la courbe (figure I.10). La résistance à la rupture est une grandeur conventionnelle puisqu'elle fait référence à la section initiale de l'éprouvette mais elle représente une limite que les sollicitations ne doivent pas atteindre pour éviter un risque de ruine. Au-delà du point C (figure I.10) l'éprouvette casse. La rupture peut alors se faire selon deux modes : ductile ou fragile. [9]

1.7.3. La dureté

La dureté caractérise la résistance à la déformation d'une manière complexe qui fait que les résultats obtenus constituent essentiellement des repères. Ceux-ci permettent d'effectuer des classements, de vérifier la conformité avec les exigences imposées et, en se référant à l'expérience du praticien, d'estimer ce que sont les propriétés mécaniques du métal. De ce fait l'essai de dureté est un essai mécanique. Ceux-ci permettent d'effectuer des classements, de vérifier la conformité avec les exigences imposées et, en se référant à l'expérience du praticien,

d'estimer ce que sont les propriétés mécaniques du métal. Que très utile et très pratiqué car il est rapide, relativement simple et peu coûteux, ponctuel et pratiquement non destructif. Il est réalisé selon différentes méthodes. La plus utilisée consiste à enfoncez un pénétrateur de forme définie dans le métal soumis à l'essai ; on caractérise ainsi la résistance du métal à l'enfoncement, sous une charge imposée. La grandeur de l'empreinte laissée pas le pénétrateur à la surface du métal constitue le paramètre pris en compte pour le calcul de la dureté. Selon la méthode d'essai on prend en compte :

- soit la surface de l'empreinte par la mesure du diamètre ou de la diagonale de l'empreinte selon que le pénétrateur est sphérique ou pyramidal. Les essais de dureté Brinell (NF EN ISO 6506) et Vickers (NF EN ISO 6507) sont de ce type. La dureté du métal est exprimée sous la forme du quotient de la charge par la surface de l'empreinte. Des tables permettent d'obtenir directement la valeur de la dureté à partir des valeurs du diamètre ou de la diagonale de l'empreinte ;
- soit la profondeur de l'empreinte. En fait on mesure l'accroissement de la profondeur de pénétration du pénétrateur, résultant de l'application en deux temps (sous deux charges différentes) du pénétrateur sur la pièce. Les essais de ce type sont les essais Rockwell (NF EN ISO 6508). La plupart des machines en usage permettent la lecture directe de la dureté sur la graduation de l'appareil de mesure. Des correspondances entre les résultats des mesures de dureté et le niveau des caractéristiques de résistance (essentiellement la résistance à la traction R_m) ont été établies ; elles dépendent de la nature du métal de base. Pour les aciers non austénitiques ces correspondances font l'objet du document AFNOR NF A 03-173. [9]

I.7.4. L'allongement à la rupture

L'allongement à rupture A est la première caractéristique de la ductilité mesurée à la suite de l'essai de traction. Il se détermine après l'essai en rapprochant au mieux les deux moitiés de l'éprouvette et en mesurant la longueur entre les repères définissant la base de mesure :

$$A (\%) = 100 \times (l - l_0) / l_0$$

Il est la somme de l'allongement réparti (développé pendant la période BC) qui intéresse toute la longueur calibrée de l'éprouvette et de l'allongement de striction (période CD) qui ne concerne que la zone dans laquelle se forme la striction et dépend de la géométrie de l'éprouvette.[9]

I.7.5. L'énergie de rupture en flexion par choc ou résilience

La résilience est une caractéristique conventionnelle qui permet, dans des conditions bien déterminées, d'apprécier la résistance d'un métal à une rupture brutale. L'essai consiste à rompre, à l'occasion d'un choc unique, sur un mouton- pendule une éprouvette entaillée en son milieu, reposant sur deux appuis et sollicitée en flexion. On mesure alors l'énergie absorbée par la rupture. La méthode de cet essai est définie par la norme

NF EN 10045-1. L'éprouvette est constituée d'un barreau de section carrée ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$) comportant en son milieu une entaille de forme donnée. L'éprouvette retenue sur le plan international est l'éprouvette Charpy V à entaille en V (rayon à fond d'entaille = 0,25 mm). L'énergie de rupture mesurée est symbolisée par KV et elle est exprimée en joules.

L'essai est effectué à la température ambiante (20 °C) ou à l'une des températures spécifiées dans les normes de produits, par exemple - 20 °C, - 40 °C, - 50 °C... En effet l'essai de flexion par choc réalisé à une température inférieure à 20 °C permet de mettre en évidence le fait qu'un métal à **structure cubique centrée** peut subir une rupture fragile. Quand la température s'abaisse la résistance à la traction croît sensiblement moins que la limite d'élasticité au point que la limite d'élasticité devienne égale à la résistance. La rupture se fait alors pratiquement sans déformation plastique préalable et c'est la raison pour laquelle le domaine de température dans lequel apparaît cette égalité est dit domaine de transition de la ductilité. Au-dessous de ce domaine de température ; la rupture est fragile, elle se fait par clivage et donne un faciès de rupture à facettes (qu'il ne faut pas confondre avec une rupture intergranulaire). Lorsque la température s'élève dans ce domaine de température, les caractéristiques de ductilité augmentent rapidement ; la rupture apparaît mixte, partiellement fragile et partiellement ductile comme à plus hautes températures. Pour les métaux à structure cubique centrée on analyse les Variations de l'énergie de rupture mesurée à différentes températures ce qui va permettre d'apprécier la résistance à la rupture fragile du métal considéré. Pour ce faire on trace la courbe dite de transition (figure I.5) qui représente les variations de cette énergie de rupture en fonction de la température d'essai. La principale caractéristique tirée d'une telle courbe de transition est une donnée arbitraire appelée « température de transition » qui est la température à laquelle l'énergie de rupture atteint un niveau donné (pour les aciers de construction il est souvent pris égal à 28 J – d'où la désignation TK28 ou T28J). Ces températures de transition doivent être utilisées avec précaution car leur relation avec les températures minimales de service des constructions est fort complexe ; elle dépend de nombreux paramètres tels que les caractéristiques mécaniques du métal, son épaisseur, son écrouissage éventuel, les sollicitations auxquelles il est soumis et leurs conditions d'application. On voit donc que les essais de flexion

par choc permettent de tester la résistance à la rupture brutale du métal dans des conditions très particulières et si particulières que les résultats obtenus (énergies de rupture ou température de transition) sont utilisés uniquement comme des repères étalonnés par l'expérience. Ainsi un essai de flexion par choc isolé n'a de sens que dans le contexte d'une connaissance approfondie du métal. [9]

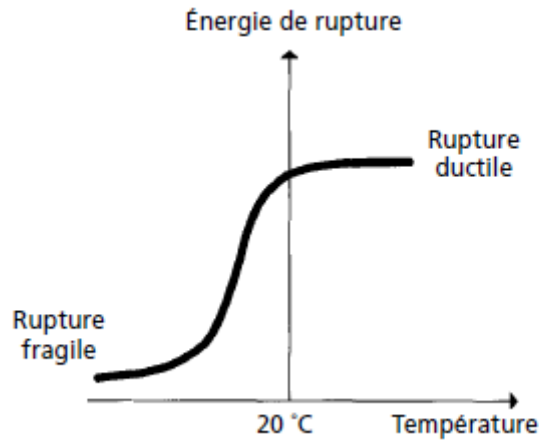


Figure I.11. Courbe de transition de la résilience

I.7.6. La ténacité

Pour calculer des structures réalisées en métaux possédant des caractéristiques de résistance élevées et, par conséquence, une ductilité relativement limitée, il est nécessaire de prendre en compte le danger que peut créer la présence d'une fissure. En effet, le processus de ruine éventuelle de ce type de matériaux passe théoriquement par une phase d'endommagement qui crée des micro défaut (microcavités, microfissures), phase d'endommagement elle-même suivie d'une phase de propagation au cours de laquelle la fissuration se développe et peut conduire à la rupture. La présence d'une fissure préexistante réduit le processus de rupture à la seule phase de propagation (le processus de rupture s'en trouve donc accéléré). Comme il est pratiquement impossible de garantir qu'une construction ne comporte aucun défaut (que ce soient des inclusions dans tout alliage industriel ou des fissures dans un assemblage soudé...), il est indispensable de prendre en compte ces défauts pour estimer quelle est, sous les contraintes de service considérées, la taille critique de ces défauts au-delà de laquelle ils seront responsables de la rupture et en deçà de laquelle la rupture serait évitée. Pour ce faire on caractérise la sollicitation subie par le métal en se plaçant, par précaution, dans la situation la plus sévère qui voit les deux faces de la fissure préexistante s'écarter l'une de l'autre (le déplacement se fait perpendiculairement au plan de la fissure) on dit alors que la déformation est plane et que la rupture est de mode I. La caractéristique significative est alors le « facteur d'intensité de contrainte » K_I [9]

I.8. Méthodes de caractérisation

I.8.1. Méthodes de caractérisations non destructives

I.8.1.1. Caractérisations microstructurales

La connaissance de la microstructure des matériaux est un paramètre crucial. En effet, il existe un lien étroit entre les propriétés, la morphologie structurale et la mise en œuvre des matériaux qui constituent les objets qui nous entourent.

Différentes techniques permettent de déterminer et d'étudier cette microstructure. Notons par exemple l'analyse métallographique pour les matériaux métalliques, l'analyse par microscopie électronique à balayage ou encore la diffraction de rayons X. [10]

I.8.1.2. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été préparés à l'aide d'une table de polissage automatique en plusieurs étapes associées à différentes grosseurs de grain d'abrasif. Les premiers étant de type 180,

320, 400, 600, 800, 1000 et 1 200 sont en fait du sablage avec des tapis de silice. Ensuite, de la pâte de diamant 3 μm , 1 μm et finalement 0.05 μm , sur des tapis appropriés. [10]

I.8.1.3. Le microscope optique

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (ce qui caractérise son grossissement) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain. Il est utilisé en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage, Les microconstituants caractérisés sont la martensite, la bainite et la ferrite. Cependant, la solution chimique utilisée permet de colorer la bainite et de la martensite en couleur claire et foncée successivement.

Il est utilisé pour :

- Valider la conformité du matériau au niveau microstructure lors d'expertise fractographique
- Visualiser la propagation d'une fissure (intergranulaire, intragranulaire)
- Vérifier Présences d'impuretés, d'inclusions
- Déterminer et Vérifier la microstructure. Lien microstructure/propriétés mécaniques
- Déterminer la taille de grains.[10]



Figure I.12 Microscope optique

I.8.1.4. Le microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage est un microscope électronique qui permet de visualiser des objets en relief.

Le microscope électronique à balayage (MEB ou SEM en anglais pour scanning electron microscopy) utilise un fin faisceau d'électrons, émis par un canon à électrons. Des lentilles électromagnétiques permettent de focaliser le faisceau d'électrons sur l'échantillon.

L'interaction entre les électrons et l'échantillon provoque la formation d'électrons secondaires de plus faible énergie. Ils sont amplifiés puis détectés et convertis en un signal électrique. Ce processus est réalisé en chaque point de l'échantillon par un balayage du microscope. L'ensemble des signaux permet de reconstruire la typographie de l'échantillon et de fournir une image en relief.

La préparation des échantillons est contraignante. Ils doivent être déshydratés puis subir un traitement pour devenir conducteur (fixation des tissus, nettoyage). L'échantillon est ensuite placé sur le porte-objet. [10]



Figure I.13 Microscope électronique à balayage

I.8.1.5. La diffraction de rayons X (DRX)

La DRX permet d'identifier la nature et la structure des produits cristallisés (matériaux métalliques ou céramiques) ou semi cristallisés (polymères, céramiques). Un faisceau de RX bombarde la surface de l'échantillon et le rayonnement X diffracté, caractéristique de l'échantillon, est récupéré par un détecteur qui va transformer le signal en un diffractogramme (courbe intensité détectée en fonction de l'angle de diffraction)

Le tube à rayons X fonctionne de la manière suivante : dans une enceinte sous vide, des électrons sont émis par un filament dans lequel circule un courant électrique (25mA). Ceux-ci sont accélérés en direction d'une anode par un champ électrique créé par une différence de potentiel élevée (25 kV) entre le filament qui sert de cathode et l'anode. Ces électrons entrent en collision avec la cible que constitue le métal de l'anode (ici le cobalt).[11]

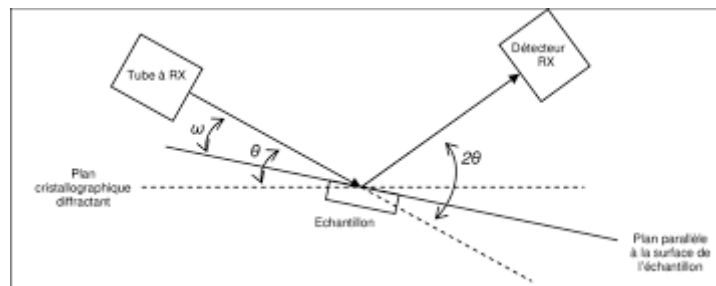


Figure I.14 Schéma explicatif de la DRX



Figure I.15 Dispositif de la DRX

I.9. Méthodes de caractérisation destructive

Il existe de nombreux essais qui permettent de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux. Certains sont normalisés (AFNOR, Association Française de Normalisation ; ISO, International Standardisation Organisation ; ASTM, American Society for Testing and Materials). Il s'agit d'essais simples à réaliser, reproductibles, servant à donner des informations sur les seuils de charge qui produisent des déformations irréversibles, ou encore la rupture.[11]

I.9.1. l'essai de traction

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

I.9.1.1. Principe de l'essai

Des éprouvettes du matériau concerné, en forme de barreau cylindrique ou prismatique comportant une partie centrale calibrée à section constante S_0 et longueur L_0 raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction. Sauf indications contraires, l'essai est effectué à la température ambiante dans les limites comprises entre 10°C et 35°C. Des essais de traction peuvent être effectués à des différentes températures allant de la température cryogénique à celle des hautes températures inférieures à la moitié de la température de fusion pour modéliser le comportement du matériau en fonction de la température.

I.9.1.2. Epreuve

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la forme et des dimensions des produits métalliques dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques. L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement d'un produit ou d'une ébauche moulée. Cependant, les produits de la section constante (profilés, barres, files, etc.), ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (par exemples : fontes, alliages non ferreux) peuvent être soumises à l'essai sans être usinées. Les éprouvettes usinées doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée lorsque celles-ci sont de dimensions différentes. Les dimensions de ce congé peuvent être importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la spécification du matériau. Les têtes de

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

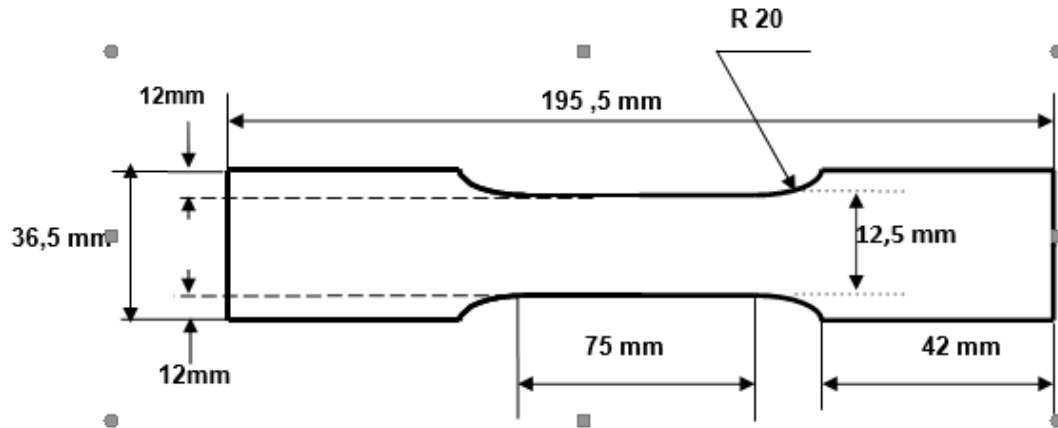


Figure.16 Eprouvette de traction

I.9.1.3. Exécution de l'essai

Une machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré soit par une commande hydraulique, soit des vis sans fin. La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre. Ceci, permettra d'aboutir à des résultats d'enregistrement de la courbe brut de traction, $F=F(\Delta)$, caractéristique de l'échantillon et de sa géométrie.[11]

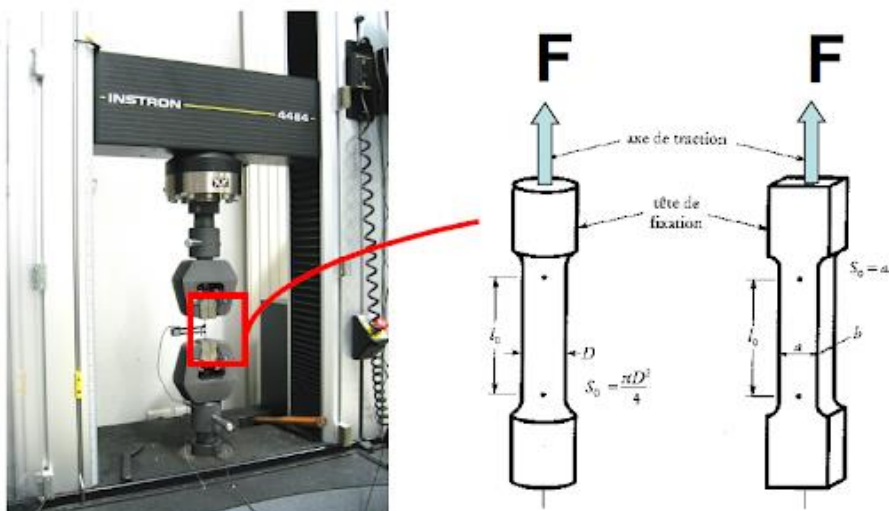


Figure I.17 Machine de traction

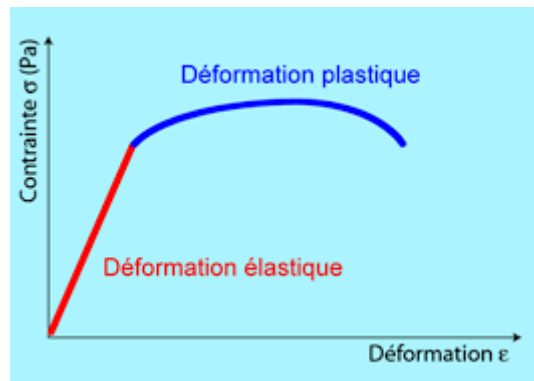


Figure I.18 courbe de traction

I.9.1.4. Essai de dureté

I.9.1.4.1. Objectif et principe de dureté

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière est fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, le frottement pénétreur-surface indentée, la géométrie de pénétreur, ses propriétés mécaniques et la charge qui y est impliquée. Le tableau 2. Résume les caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté utilisée : la dureté Brinell (HB), la dureté Vickers (HV), les duretés Rockwell C et B (HRC et HRB). Bien que les valeurs de dureté soient données sans dimensions, les duretés Brinell et Vickers, de par leur définition, sont homogènes à des contraintes.[12]

I.9.1.4.2. Eprouvettes

La surface de l'éprouvette doit être propre, plane et lisse soigneusement préparée. Plus des dimensions du pénétreur sont petites, plus l'état de la surface doit être lisse. Une application du polissage en mode automatique est parfois obligatoire. La préparation de l'éprouvette doit être faite sans provoquer des altérations des propriétés du matériau dues, par exemple, au chauffage ou à l'écrouissage. L'épaisseur de l'éprouvette doit être suffisante pour qu'aucune trace d'une déformation ne soit visible sur la surface opposée à celle de l'application de la charge. D'après une règle générale, l'épaisseur minimale est au moins dix fois supérieure à la profondeur de l'empreinte.

I.9.1.4.3. Exécution de l'essai

On emploie pour l'exécution de l'essai un dispositif qui est suffisamment rigide et stable. L'essai doit être fait sans choc et sans vibrations, autrement les résultats sont erronés. L'éprouvette doit être installée sur un support rigide du dispositif pendant l'action de la charge. Les essais les plus courants se font par pénétration, les essais les plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell.[12]

I.9.1.5. Essai Brinell

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbures de tungstène de diamètre D (mm) sous une charge F (N), et à mesurer le diamètre d de l’empreinte résiduelle après retrait de la charge. La charge d’essai F (N) est choisie dans une gamme normalisée adaptée au diamètre de l’indenteur et au matériau testé.

$$HBW = \frac{0.102 * 2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Pour éviter la déformation de la bille et la détérioration de la bille, l’usage de l’essai Brinell est limité aux matériaux tels que $HBS < 650$. [12]

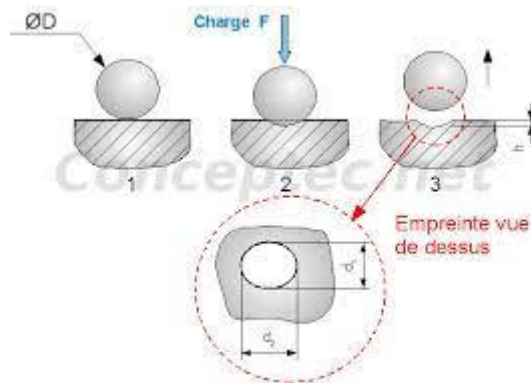


Figure I.19 Principe de la dureté brinell

I.9.1.6. Essai Vickers

Le pénétrateur est une pyramide en diamant, à base carrée et d’un angle au sommet entre faces opposées égales à 136° . L’empreinte est une pyramide en creux de diagonales du carré de base. Les mesures s’effectuent à l’aide d’un appareil optique approprié ou à afficheur direct dans les nouvelles générations des bancs d’essais.

$$HV = 0.102 * \frac{2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2} = 0.189 \cdot \frac{F}{d^2}$$

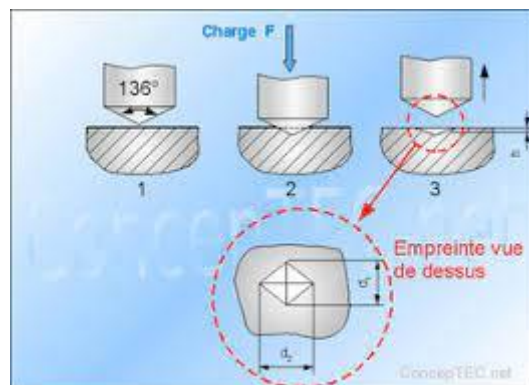


Figure I.20 Principe de la dureté Vickers

I.9.1.7. Essai de résilience

I.9.1.7.1. Objectif et principe de l'essai

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile. Les facteurs fragilisant sont :

- Le triaxialité des contraintes ;
- L'abaissement de la température ;
- L'augmentation de la vitesse de déformation.

Le principe de l'essai consiste à rompre par choc du mouton pendule une éprouvette entaillée reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie absorbée caractérisant la résistance aux chocs du matériau métallique essayé. La résistance aux chocs, donc l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, exprimée en joule par centimètre carré.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Energie absorbée par la rupture (J)}}{\text{Section au droit de l'entaille (Cm}^2\text{)}}$$

I.9.1.7.2. Les éprouvettes pour la résilience :

- **L'éprouvette Charpy U :**

Une éprouvette est un barreau usiné de section carrée de 10 mm de côté et dont la longueur est 55 mm. L'entaille de 2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1 mm de rayon. La résilience est alors mesurée et précisée selon le symbole Kcu.[12]

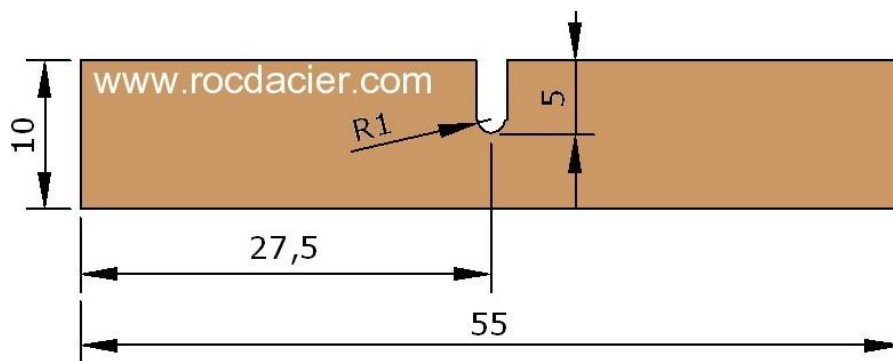


Figure I.21 Epreuve de résilience en U

- **L'éprouvette Charpy V :**

Pour un essai avec une éprouvette Charpy V, l'éprouvette sera entaillée en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de 45° dont les dimensions sont les mêmes que pour les éprouvettes Charpy U. On précise par le symbole Kcv l'essai de résilience en V. Les éprouvettes Mesnager et DVM sont identiques avec pour seule variante la profondeur de l'entaille (3mm et 2mm) [12]

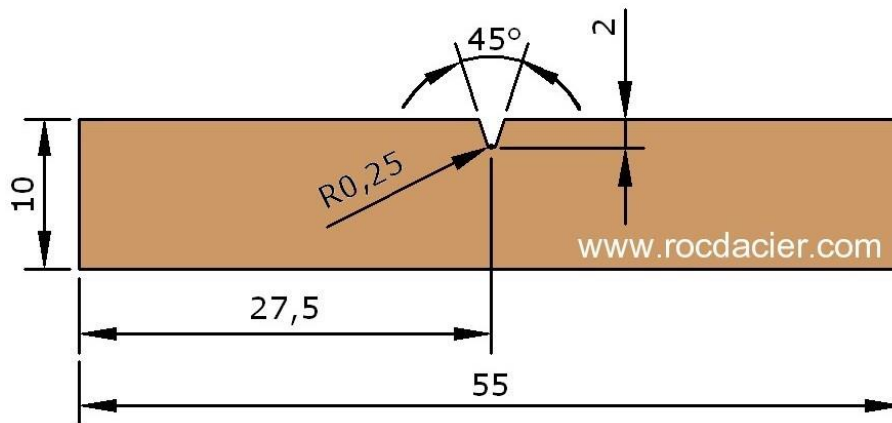


Figure I.22 Epreuve de résilience en V

I.9.1.7.3. Principe de l'essai

Un marteau de masse m est fixé à l'extrémité d'un pendule (Figure.23). Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position initiale P et on le lâche. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait à sa position de départ mgh_0 , h étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre. Après la rupture, le marteau remonte. Dans son point culminant (hauteur h_1), l'énergie cinétique résiduelle s'est de nouveau transformée en énergie potentielle mgh_1 . L'énergie K dépensée pour rompre l'éprouvette vaut alors

$$KV = mg(h_0 - h_1) \quad (m.g : \text{le poids du pendule})$$

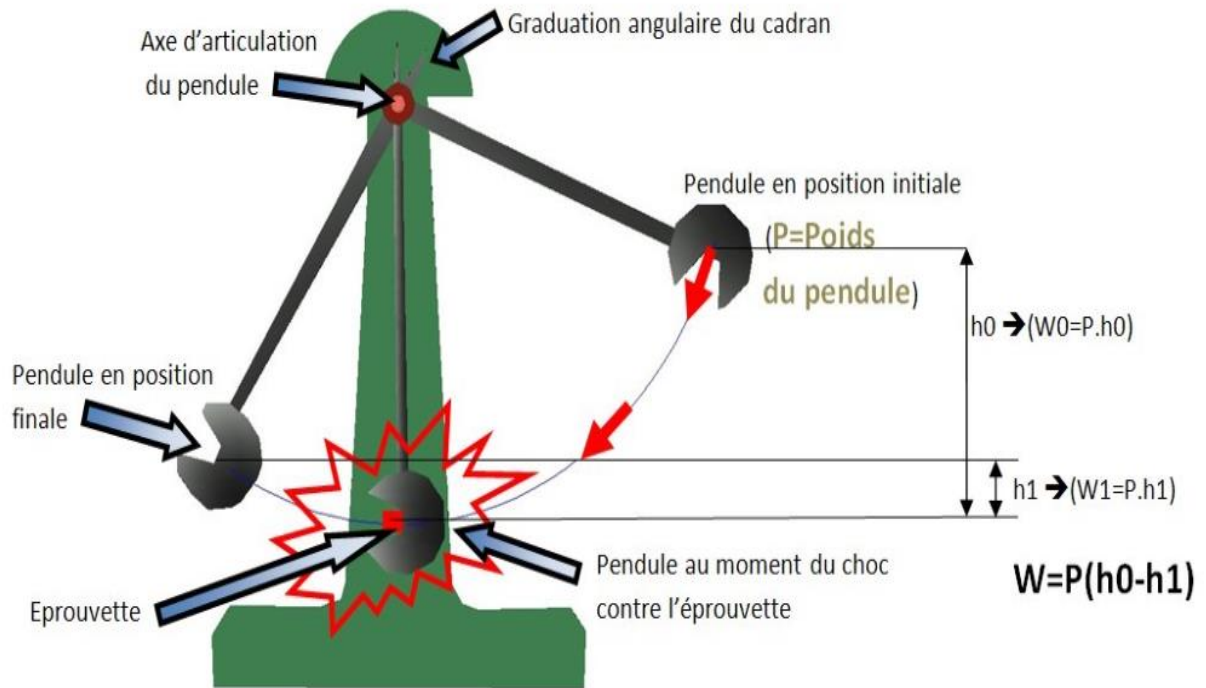


Figure I.23 Principe de l'essai de Charpy

I.10. Les traitements thermiques

Les traitements thermiques se définissent comme étant l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement). [13]

I.10.1. Définition

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

- D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, en augmentant la résistance à la rupture et la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément. En augmentant la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. Les traitements thermiques sont appliqués surtout aux aciers et aciers alliés alliages non ferreux. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage.

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (Figure I.) [13]

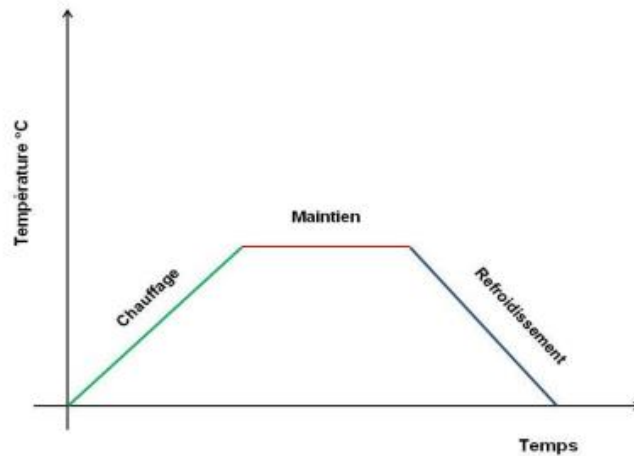


Figure I.24 Courbe de cycle thermique

- Chauffage à des températures supérieures aux températures de transformation
- Maintient à une température définie.
- Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

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

- De la température maximale ;
- De la durée de maintien de la pièce à cette température ;
- Du milieu dans lequel se trouve la pièce à cette température ;
- De la vitesse de variation de la température lors du chauffage et surtout lors du refroidissement
- Des dimensions de la pièce à traiter (effet de masse).[13]

I.10.2. Les traitements thermiques de l'acier

I.10.2.1. Les recuits

Les recuits consistent en un traitement thermique visant l'obtention d'états proches de l'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire la restauration des propriétés originales du matériau. Ce procédé se déroule dans une atmosphère protégée pour prévenir l'oxydation de la surface métallique.

Dans la pratique industrielle un recuit se définit essentiellement par deux points principaux :

- la température de chauffage
- la durée du traitement.

En effet, il ne faut pas négliger deux autres éléments importants qui sont :

- la vitesse de chauffage
- la vitesse de refroidissement.

Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité. (Résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). Le recuit a pour but de :

- Diminuer la dureté d'un acier trempé
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- Homogénéiser les textures hétérogènes de la composition chimique.
- D'éliminer ou de réduire les contraintes internes de la pièce ;
- De supprimer les effets sur la structure : de la solidification ; d'une déformation plastique ; d'une soudure ; d'un traitement thermique antérieur.
- De provoquer la formation de structures favorables à l'usinage ou à la déformation à froid ;
- Éliminer les contraintes résiduelles ;
- Diminuer la dureté ;
- Améliorer la ductilité et la ténacité ;
- Produire une microstructure particulière. [14]

Le cycle thermique d'un recuit comprend

- Un chauffage jusqu'à une température dite « température de recuit » ;
- Un maintien isotherme a cette température déterminer, maintien de durée variable ou en variante oscillation autour de cette température
- Un refroidissement généralement lent a une vitesse inferieur a la première vitesse critique de la trempe, le plus souvent à l'aire ou dans le four ; parfois dans le sable. (Figure I.)

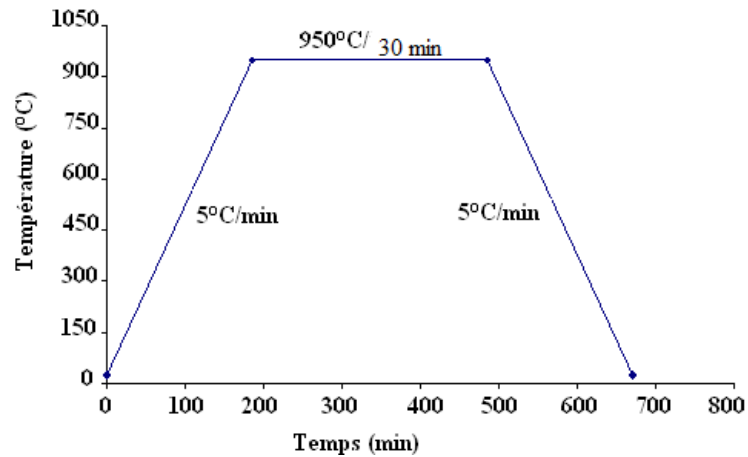


Figure I.25 Cycle thermique du recuit

Suivant l'état initial de l'acier et la température de recuit. On distingue dans ce type de recuit trois types :

- Recuit d'homogénéisation (recuit de diffusion).
- Recuit de recristallisation.
- Recuit de détente (stabilisation).[14]

I.10.2.2. La trempe

La trempe est un traitement thermique de durcissement qui consiste à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer α ; fer γ (austénitisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale. Ce mode de durcissement, commun à de nombreux métaux, est réalisé selon le schéma général, à travers trois opérations successives : austénitisation, trempe et revenu.

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

S'ensuit la trempe qui consiste en un traitement visant à refroidir rapidement le métal à partir de sa température d'austénitisation (généralement entre 815 °C à 870 °C afin d'obtenir une constitution martensitique. C'est cette transformation qui permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques du métal traité, notamment sa dureté.

Le cycle thermique de la trempe sera caractéristique de la dureté finale recherchée. Ce degré de dureté envisagé fera recourir à différentes méthodes de refroidissement. La vitesse de refroidissement dépend principalement, pour une pièce déterminée :

- De la chaleur spécifique et la conductibilité thermique de l'acier ;
- De la masse, la forme et l'état de surface de la pièce ; plus la pièce sera massive plus le temps sera long ;
- Du pouvoir refroidissant du médium de trempe (air, eau, eau-sel, huile, sel, air forcé, etc.).

Notons que la vitesse de refroidissement est maximale à la surface de la pièce et diminue vers le cœur.

On distingue différents types de trempe,

- La trempe martensitique,
- La trempe bainitique,
- La trempe austénitique (aussi appelée hypertrempe).[14]

I.10.2.3. Le revenu

Les revenus sont pour leur part effectués après la trempe, et visent à supprimer les tensions moléculaires internes dues au refroidissement rapide qui fragilise le matériau. Si cette opération n'est pas réalisée immédiatement après la trempe, un risque de rupture des pièces peut se produire plusieurs heures, voire plusieurs jours après la trempe. Cela dit, on parle ici pour le revenu d'un chauffage à faible température pendant plusieurs heures. À titre d'exemple, le revenu de la martensite des aciers favorise un retour partiel vers l'équilibre par diminution de la teneur en carbone de la martensite et par précipitation de carbure. Le résultat pratique est une augmentation de la ténacité de la structure, accompagné d'une diminution de la dureté.

Le revenu est destiné à provoquer un retour plus ou moins marqué vers l'état stable à froid, donc d'obtenir les propriétés mécaniques requises, c'est à dire la martensite se transforme en de nouveaux constituants (sorbite, bainite). Donc le revenu permet de supprimer les contraintes internes provoquées par la trempe, de diminuer la fragilité des pièces trempées tout en conservant une dureté suffisante. Cette suppression de contraintes est d'autant plus complète que la température du revenu est plus élevée, c'est à dire, l'affaiblissement des contraintes est le plus intense lorsque le maintien atteint 15 à 30 min à 550°C. La vitesse de refroidissement après revenu, a une influence faible sur l'état des contraintes résiduelles. Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles. Un refroidissement rapide dans l'eau à partir de 600°C produit des contraintes thermiques nouvelles.

Pour éviter un gauchissement après revenu, surtout pour les pièces de formes complexes, il faut refroidir lentement. Les aciers alliés sont refroidis rapidement. Les propriétés d'un acier obtenu par revenu dépendent surtout de la température. Il existe trois modalités de revenus.

- Revenu à basse température :
- Revenu à température intermédiaire
- Revenu à haute température [14]

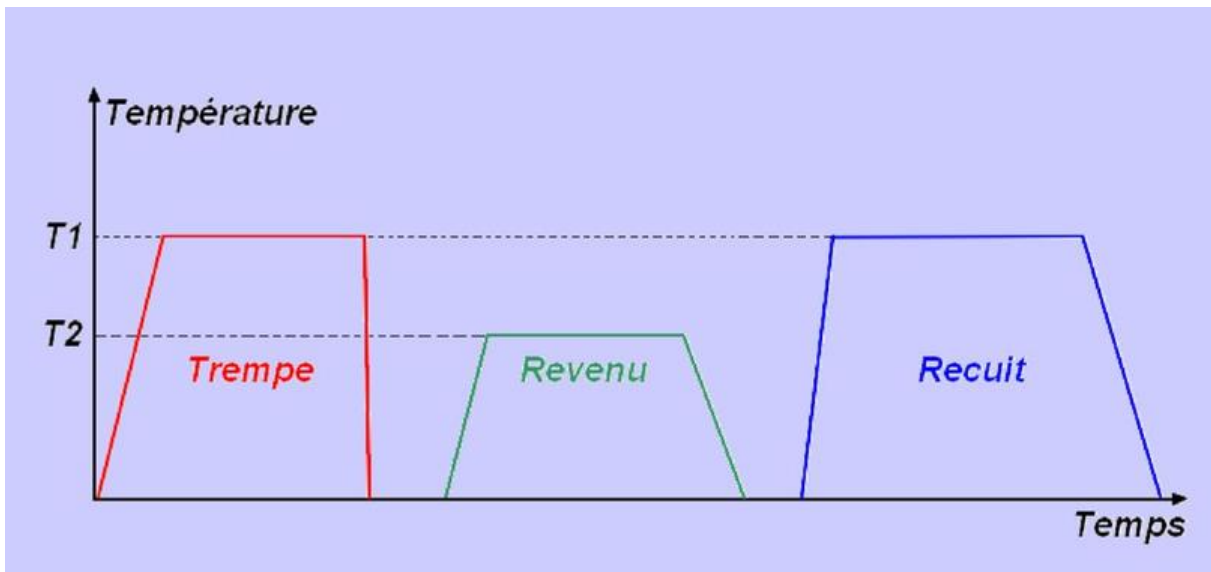


Figure I.26 Traitements thermiques des aciers

I.10.2.4. Défauts des traitements thermiques de l'acier

Les principaux défauts provoqués par les traitements thermiques des pièces peuvent être résumés en trois points :

- **Contraintes propres** : provoquées par les gradients de température au chauffage et au refroidissement entre les divers points de la pièce. Pour le chauffage, il faudrait que la montée en température dans le four soit faible. Pour le refroidissement, il faudrait que la vitesse soit faible pour réduire le gradient de température, mais pas trop afin d'éviter toute transformation indésirable.
- **Tapures (fissures)** : elles se forment le plus souvent au cours de la trempe. Pour parer à ce défaut incorrigible, on recommande lors du projet des pièces, d'éviter les saillies, les angles vifs, les raccords brusques etc., de refroidir modérément en utilisant une trempe à deux bains.
- **Déformations et gauchissements** : concernent surtout les pièces trempées à cause du refroidissement qui n'est pas homogène. Au début, seules les couches externes se refroidissent et donc se transforment en martensite, ce qui provoque des contraintes de traction sur le cœur de la pièce qui est encore plastique. Puis les couches internes se transforment à leur tour, la dilatation correspondante, peut exercer sur les couches superficielles plus froides, donc peu plastiques, un effort de traction, le cœur étant en état de compression.

I.10.2.5. Les types de fours

a. Fours à sole :

Dans les fours à sole, le chauffage se fait surtout par rayonnement et ils présentent une chambre dans laquelle on met la pièce à chauffer. Dans certains cas une deuxième chambre située au-dessus de la première et récupérant une partie de la chaleur formée, sert comme chambre de préchauffage.

b. Fours à bain de sels :

Ils présentent les avantages suivants :

- rapidité de chauffage : car la pièce est en contact sur toutes ses faces avec le sel liquide en mouvement permanent.
- Uniformité de chauffage : les écarts de température entre les différents points du bain sont très faibles, la pièce s'échauffe régulièrement, ce qui diminue l'importance de déformation.
- Absence de dénaturation du métal : le bain qui peut être choisi neutre, oxydant ou réducteur, protège la pièce de tout contact avec l'oxygène de l'air

c. Fours électriques :

Les fours électriques peuvent être à sole ou à bain de sel. Ils sont chauffés le plus souvent par résistances métalliques en nickel-chrome pour des températures ne dépassant pas 1000°C et en silicium pour des températures de 1300°C. Les fours électriques à bain de sel à haute température sont à électrodes, le sel fondu formant résistance entre celles-ci.

d. Atmosphères :

Lorsque les pièces sont chauffées jusqu'aux hautes températures dans ces fours à flammes ou dans les fours électriques, les gaz entrent en réaction avec la surface du métal, ce qui entraîne l'oxydation ou la décarburation des couches superficielles des pièces.

- L'oxydation résulte de l'interaction du métal avec l'oxygène ou la vapeur d'eau se trouvant dans le milieu du four. En général, le dioxyde de carbone CO₂ réagit avec le fer en l'oxydant.[14]

Chapitre 2 : techniques expérimentales

II. Techniques expérimentales

II.1 Introduction

Ce chapitre consiste tout d'abord à la présentation du matériau étudié : l'acier de construction métallique S355 J2+N. Nous allons discuter de l'évolution de sa microstructure en fonction du traitement thermique et de ses propriétés mécaniques. Par la suite, nous présenterons en détail les différentes techniques de caractérisation du matériau et les procédures expérimentales menées dans ce travail.

II.2 Matériaux utiliser

Les nuances d'acier de structure S355 sont des aciers au carbone-manganèse ayant des propriétés mécaniques minimales garanties (limite d'élasticité et résistance à la traction) et une ductilité satisfaisante

Les aciers de structure offrent une bonne soudabilité avec tous les procédés de soudage conventionnels. En plus de leurs excellentes propriétés mécaniques, les aciers de structure ont des valeurs de ténacité satisfaisantes, notamment avec + N ou + M.

Elément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
%	0.15	0.20	1.35	0.013	0.004	0.04	0.07

Elément	Cu	Al	Mo	Nb	V	N	Ti
%	0.16	0.032	0.01	0.03	0.006	0.008	0.020

Tableau II.1 : Composition chimique de l'acier d'étude

II.3 Elaboration des éprouvettes

II.3.1 Les éprouvettes de traction

ISO6892-1

Nous avons réalisé des éprouvettes de traction, dont les dimensions sont normalisées dans trois directions (Figure II.1)

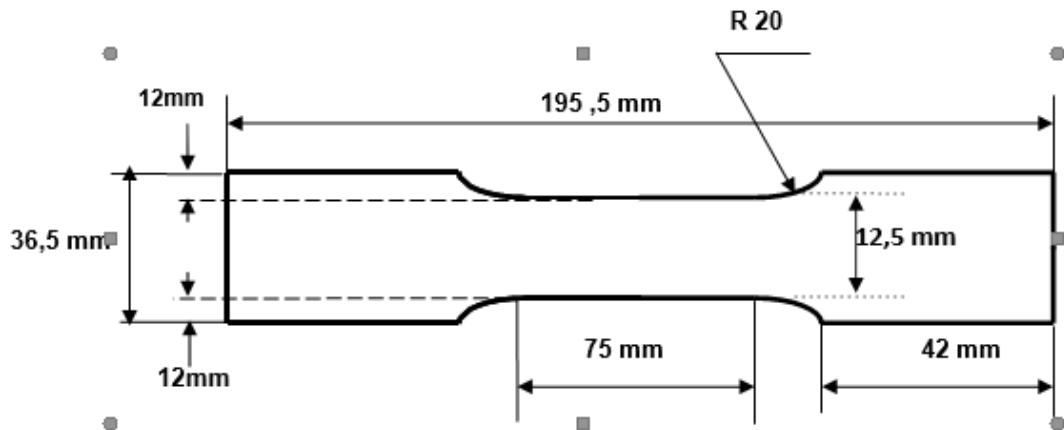
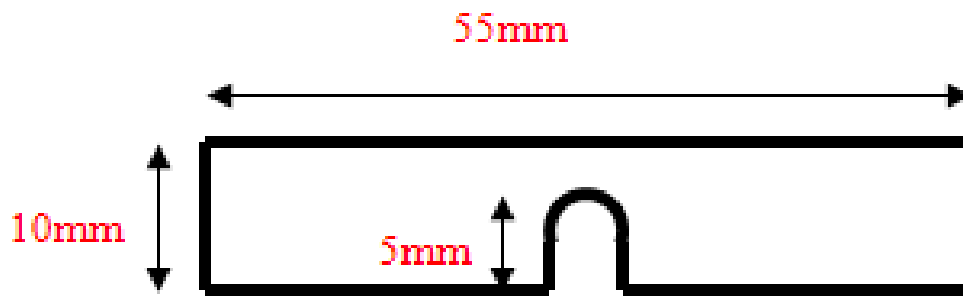


Figure.II.1. Eprouvette de traction normalisée

II.3.2 Eprouvette de résilience

Nous avons réalisé des éprouvettes de résilience dont l'entaille est en U et dont les dimensions sont normalisées (Figure II.2)



Largeur de l'entaille 2mm

Figure II.2 Eprouvettes de résilience normalisée

II.4 Appareillage

II.4.1 Scie mécanique type ALMOSMA3

Pour le découpage des éprouvettes et les échantillons d'essai, nous avons utilisé une scie mécanique (Figure II.3)



Figure II.3 Scie mécanique

II.4.2 La fraiseuse

La fraiseuse est une machine-outil permettant de réaliser des opérations d'usinage à l'aide d'une fraise. Elle peut également être équipée d'un foret, de taraud ou d'alésoir pour réaliser des opérations de perçage et taraudage. (Figure II.4)



Figure II.4 La fraiseuse

II.4.3 La fraiseuse à commande numérique

Nous avons utilisé la fraiseuse à commande numérique pour réaliser les entailles sur nos éprouvettes (Figure II.5)

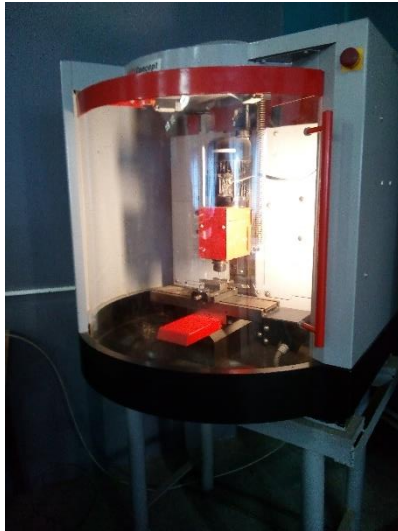


Figure II.5 La fraiseuse à commande numérique

II.5 Etudes métallographiques

L'examen métallographique a pour but de mettre en évidence les différentes phases microstructurales des échantillons lors de l'observation au microscope optique, au MEB ainsi que pour l'analyse par diffraction des rayons X.

II.5.1 Préparation des échantillons

L'observation microscopique nécessite un polissage fin de la surface à observer, afin d'obtenir une bonne image représentative de sa structure. Le polissage dans notre cas est obtenu manuellement sur une polisseuse manuelle dont la vitesse est de 300 trs/min (Figure II.6).

L'échantillon est découpé de façon à obtenir une surface d'examen de 10 mm².

Polissage : consiste à rendre la surface plane et brillante, de façon à ce qu'il ne représente aucune rayure susceptible de gêner l'examen ultérieur.

Le polissage se fait généralement en deux étapes : pré polissage et polissage de finition. Il est réalisé à l'aide d'une polisseuse a disque muni d'un dispositif d'arrosage permanent.

- ✓ **Pré polissage** : il se fait par frottement de l'échantillon sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fine (180 à 2500). Le polissage

se fait habituellement sous eau pour éliminer tout risque d'échauffement de l'échantillon.

- ✓ **Polissage de finition** : deux principaux modes de polissage de finition sont généralement utilisés :

Polissage à l'alumine : ce type de polissage consiste à frotter l'échantillon sur des disques en feutre.

Polissage à la pâte diamanté : le polissage se fait comme précédemment, l'agent de polissage étant de la pâte diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur le disque.

Après le polissage et la finition certains constituants sont visibles sans attaque chimique, mais certains autres présents dans la structure ne peuvent pas être différenciés que par une attaque chimique, qui a pour but la mise en évidence de toute la structure, les joints des grains et permet également de mettre en évidence l'orientation cristallographique.

Comme dans notre cas, on a utilisé comme attaque chimique le Nital dont la concentration est de 3 %. (Figure II.6)



Figure II.6. La polisseuse

II.5.2 Attaque chimique

Le réactif utilisé dans notre cas est le Nital dont la composition est la suivante :

- Acide nitrique 4% (HNO_3)
- Alcool éthylique 96% ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$)

La durée de l'attaque chimique est de quelques secondes puis laver à l'eau et sécher à l'aide d'un séchoir. Les échantillons sont prêts pour l'observation microscopique. (Figure II.7)

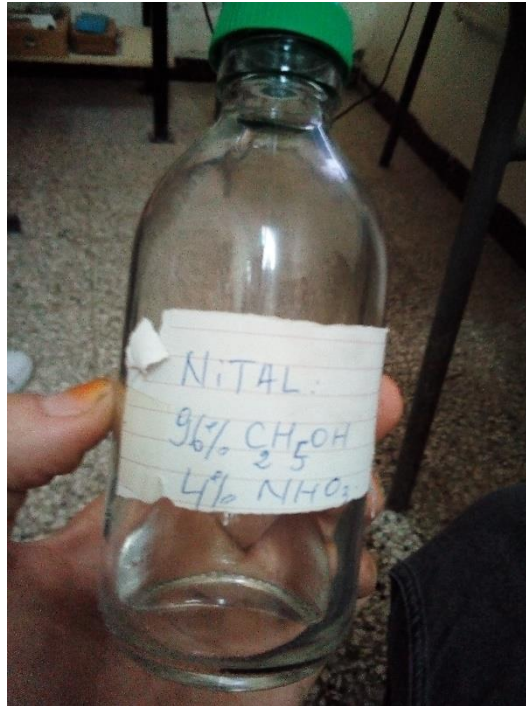


Figure II.7 la composition du Nital

II.5.3 Observation optique

L'analyse métallographique a pour but de mettre en évidence de tous les changements opérés au sein de la structure des échantillons en étude.

L'examen micrographique des échantillons étudiés (après polissage et attaque chimique), a été fait à l'aide d'un microscope métallographique ; équipé d'un système de prise de photos, piloté par ordinateur, qui permet l'observation des microstructures avec un grossissement pouvant atteindre 1200 (Figure II.8).



Figure II.8 Microscope optique

II.6 Essais mécaniques

II.6.1 Essai de résilience

La résilience qui a pour symbole K , est l'aptitude que possède un matériau à résister plus ou moins bien aux chocs.

Il s'agit pour le métallurgiste de déterminer la résistance aux chocs de certaines pièces ou de certains matériaux. La résistance aux chocs est une des caractéristiques primordiales pour le choix d'un matériau notamment dans la construction.

Lors de l'essai, une force de poids P va tomber d'une certaine hauteur H , à ce moment on va enregistrer au niveau de l'éprouvette un certain travail que l'on va noter W . Lorsque l'éprouvette sera cassée, on aura enregistré un travail résiduel W_r , ce qui va nous permettre de déterminer le travail nécessaire pour briser l'éprouvette. (W_n)

II.6.1.1 Mouton de Charpy

L'essai de résilience (encore appelé essai de flexion par chocs) consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette qui sera préalablement entaillée en son milieu, afin de faciliter la rupture de la pièce. Cette éprouvette, repose sur des appuis. Au moment où le couteau frappe l'éprouvette (figure 1) on va déterminer l'énergie absorbée qui sera exprimée en joules. C'est cette énergie qui caractérise la résistance aux chocs des matériaux

Le bras qui porte le couteau, vient percuter l'éprouvette dans sa chute par un mouvement de rotation, puis celui-ci remonte en sens inverse après la rupture de l'éprouvette.

La valeur est alors enregistrée sur le cadran angulaire, ce qui va nous donner le résultat de l'essai. (Figure II.9)



Figure II.9 moutons de Charpy

II.6.2 Mesure de la dureté :

La dureté de matériau est une propriété mécanique complexe et difficile à interpréter, qui dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration (type d'essai). Dans notre travail en a réalisé deux types d'essais : la dureté BRINEL et la dureté VICKERS et pour réaliser ces essais en autilisé un duromètre et un microduromètre.

II.6.2.1 Essai de dureté brinell

Principe L'essai consiste à faire pénétrer en appliquant une force F un pénétrateur ayant une forme de bille diamètre D , généralement du carbure poli, dans un métal afin d'en déduire la dureté du matériau. (Figure II.10)

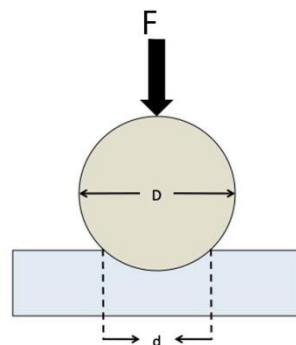


Figure II.10 Principe de l'essai de dureté brinell

Placer le pénétrateur en contact avec la surface du matériau. Appliquer la force. Maintenir cette charge pendant 10 à 15 secondes. Mesurer sur l'empreinte deux diamètres à 90° l'un de l'autre. La mesure est effectuée à l'aide d'un dispositif grossissant et d'une règle graduée tenant compte du facteur de grossissement. (Figure II.11)



Figure II.11 Machines d'essai de dureté

II.6.2.2 Essai de dureté Vickers

Il consiste à imprimer dans le métal testé un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidal à base carrée, d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136°, sous l'action d'une force connue (figure II.12). On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur

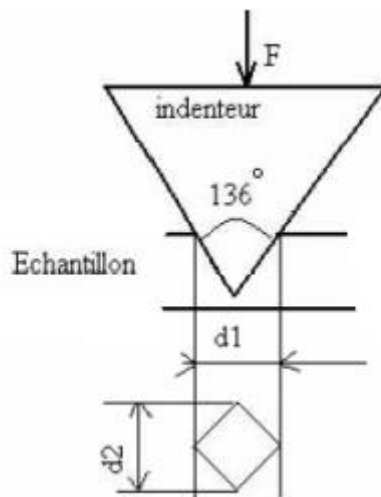


Figure II.12 Principe de l'essai de dureté vickers



Figure II.13 dispositifs de l'essai Vickers

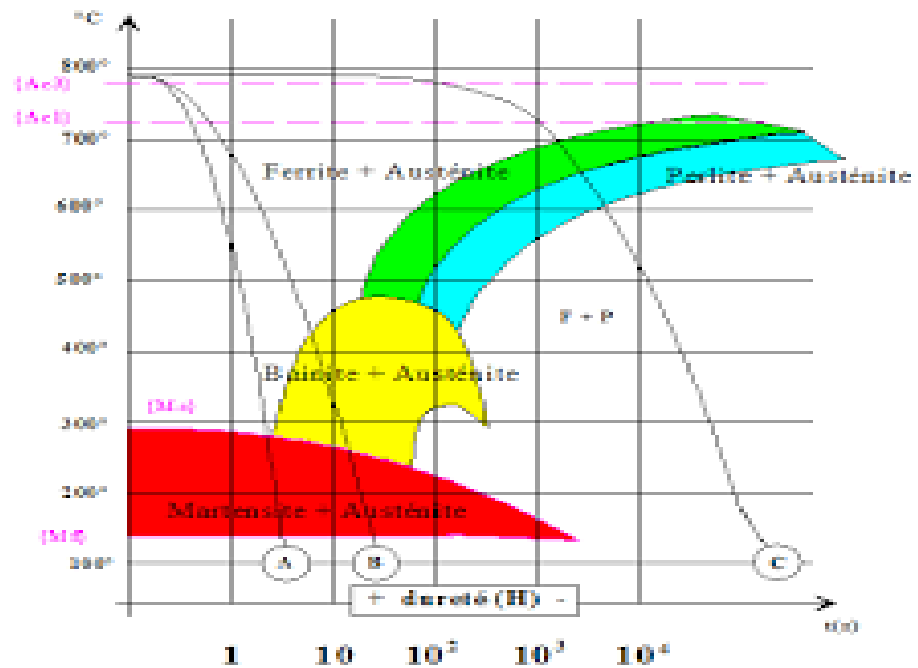
II.7. Traitement thermique

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage, de maintien suivi d'un refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus appropriées pour son emploi. Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques d'un acier de composition déterminée. D'une façon générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique de l'alliage, mais apporte les modifications suivantes :

- Constitution (état de carbone et forme allotropique du fer) ;
- Structure (grosseur du grain et répartition des constituants) ;
- Etat mécanique.

Dans cet essai nous avons effectué un traitement thermique de revenu à une température de 950°C durant 30 minute, suivis d'une trempe a l'eau

La température d'austénitisation a été choisi par rapport au digramme TTC (Figure II.14)



Pour ce traitement nous avons utilisé un four électrique a température maximale de 1400°C (Figure II.15)



Figure II.15. Four électrique

Chapitre III :

Résultats et

interprétations

III. Résultats et interprétation

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux des différents types d'essais effectués pour la caractérisation du comportement mécanique et microstructural de l'acier S355 en construction métallique.

Pour cela nous avons effectué une analyse microstructurale et des essais de résilience, dureté et de traction sur différents types d'échantillons.

III.2. Le matériau

L'acier S355J2+N correspond à l'E36-3 équivalent à l'A52 qui est un acier de construction soudable demi-dur avec une limite élastique (Re) minimale garantie de 355 MPa.

III.3. La composition chimique

La composition chimique énumérée dans le tableau 1 est donnée suivant la fiche technique du fabricant il s'agit de la norme **EN 10025-2**

Tableau III.I la Fourchette de la composition chimique de l'acier S355 J2+N

Elément	C	Mn	P	S	Cu	Si
%	0.2	0.16	0.025	0.02 5	0.55	0.55

III.3.1. Etat de livraison

L'acier est livré sous forme de barre rectangulaire et barre rond à l'état recuit où la dureté ne dépasse pas la valeur de 240HB cette valeur permet un usinage aisé et sans difficultés. Selon la fiche technique du fabricant ce recuit est effectué à une température de 850°C à 960°C.

III.4. Etude micrographique

L'observation de la microstructure de l'acier utilisé est effectuée sur un

microscope optique, après polissage mécanique et attaque chimique au Nital

La microstructure des échantillons a été réalisée au microduromètre du hall de technologie avec un grossissement de 200

III.4.1. Microstructure de l'acier à l'état brut

La (figure III.1) présente la microstructure de l'acier à l'état brut, elle est constituée globalement d'une structure ferrito-perlitique (ferrite et perlite) de taille des grains non homogène ; ferrite (la zone claire) et la perlite (la zone en noire). D'où la quantité de la phase ferrite est moindre que la quantité de la phase perlite

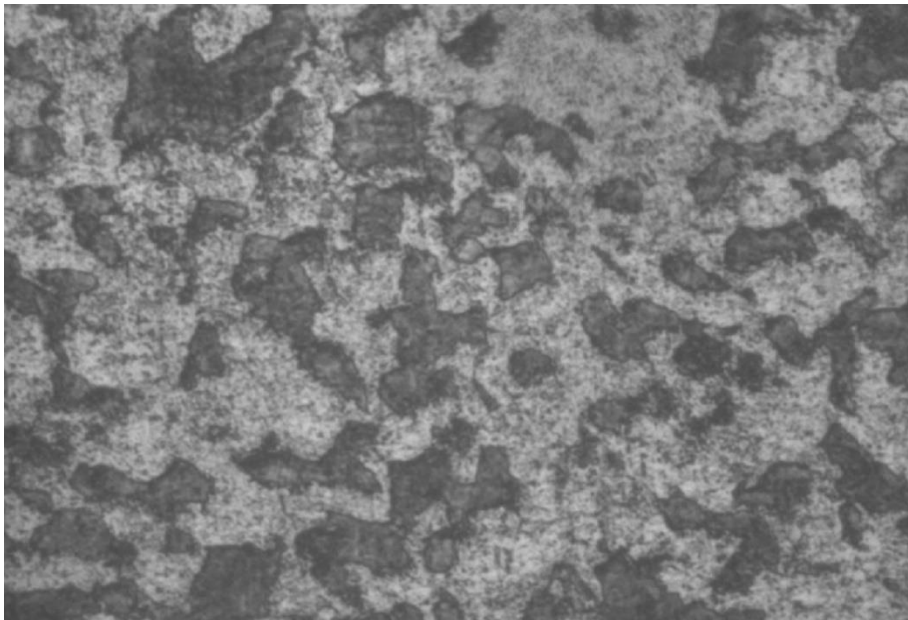


Figure III.1. Microstructure de l'acier S355 à l'état brut

III.4.2. Microstructure de l'acier après traitement thermique

L'objectif de cette partie d'étude est de présenter l'effet des traitements thermiques et le temps de maintien sur l'évolution microstructurale de l'acier S355, Pour cela on a appliqué un traitement thermique à une température d'austénitisation de 950°C pendant un maintien 30min ; puis un refroidissement à l'eau

L'observation microscopique nous a montré que la phase perlitique est augmentée, contrairement à la phase ferritique, qui disparaît presque et on peut remarquer une formation

Chapitre III : Résultats et interprétations

d'une nouvelle phase isotherme dans ce domaine de traitement, c'est l'austénite. Et concernant le temps de maintien ; on peut remarquer aussi un raffinement des grains.

On remarque dans la figure III.2 que le traitement thermique et le temps de maintien de l'acier ont une influence sur la morphologie et la phase de cémentation.

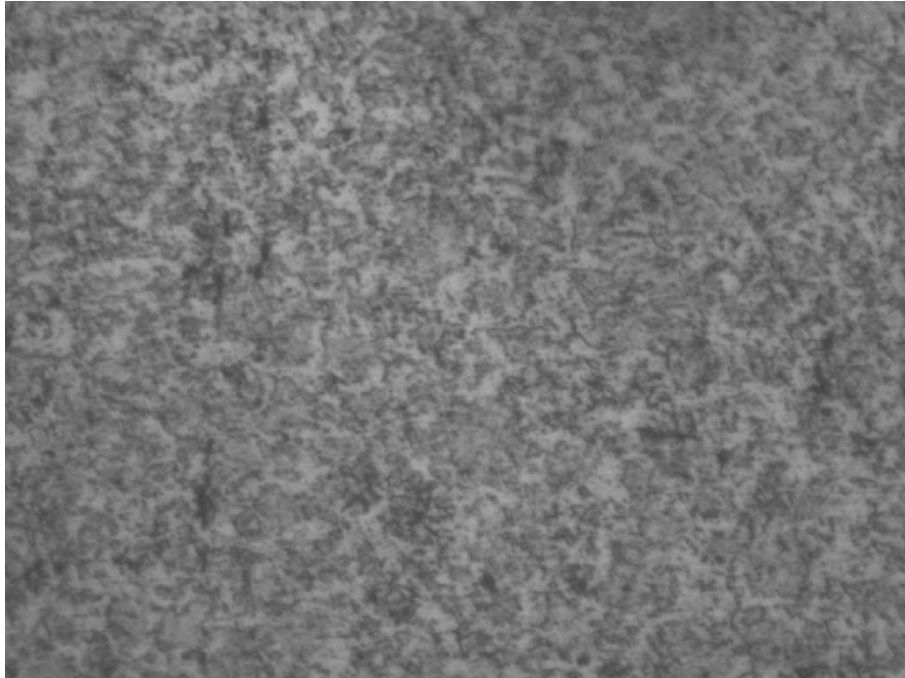


Figure III.2. Microstructure de l'acier après traitement thermique

III.5. Mesure de la Microdureté

L'essai consiste à faire pénétrer en appliquant une force (**F**) sur un pénétrateur ayant une forme de pyramide, en diamant de base carrée avec un angle au sommet de 136° . Nous avons réalisés des essais de dureté Vickers (HV) sur la tôle à l'état initial de livraison. Les mesures de la microdureté (figure III.3) ont été effectuées par un balayage sur différents points de la surface des échantillons S355. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau III.2 ci-après.

Tableau III.2. Mesure de la microdureté

Chapitre III : Résultats et interprétations

Nbr d'essai	1	2	3
Dureté Hv avant traitement	176	180	168
Dureté Hv après traitement	202	203	200

En moyenne la microdureté de l'acier

- ✓ Avant traitement Hv=174.66
- ✓ Après traitement Hv=201.66

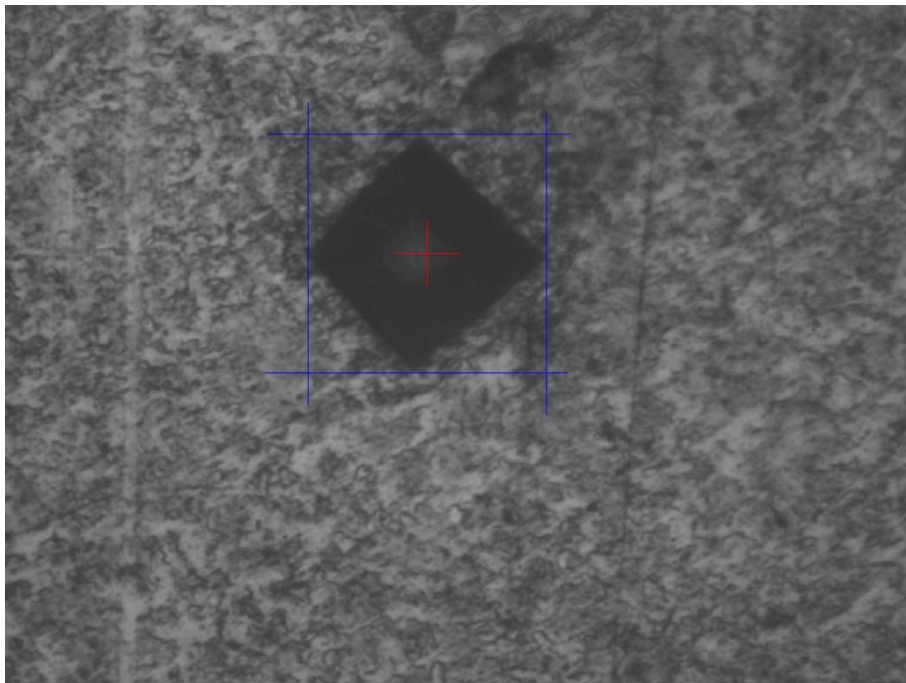


Figure III.3. Empreinte de la microdureté

III.6. Discussions des résultats de la microdureté

Nous remarquons que la dureté de l'acier reste relativement homogène entre les différentes zones balayées, ceci est peut-être dû aux effets d'homogénéisation du traitement thermique

✓ Avant traitement thermique

Nous remarquons que l'acier a une dureté relativement homogène (pas de variation importante entre les différentes zones balayées) car sa structure est ferrito-perlitique homogène Figure III.4

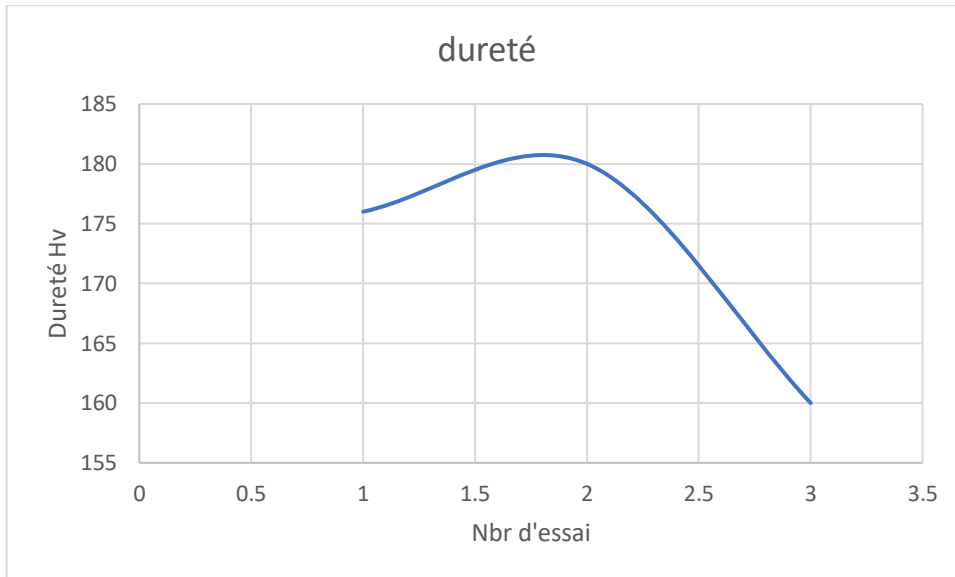


Figure III.4. Courbe de la microdureté avant traitement

✓ Après traitement thermique

Nous remarquons que la microdureté augmente par rapport à l'état brut : par contre nous remarquons une petite variation de la microdureté ; cela est due à sa structure qui contient des plages ferritiques et perlitiques de proportions différentes. Figure III.5

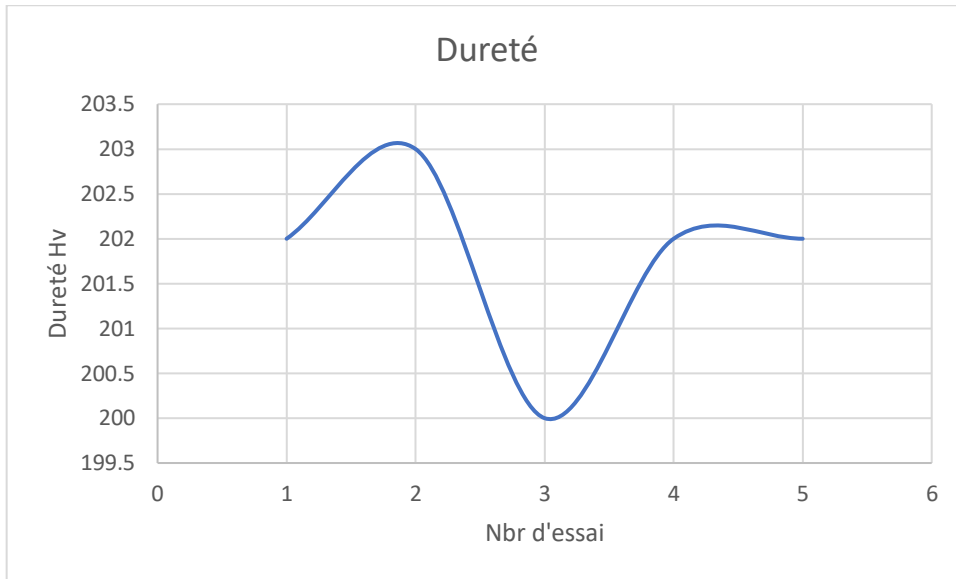


Figure III.5. Courbe de la microdureté après traitement

III.7. Mesure de la dureté

Les résultats obtenus lors des essais de dureté sur l'échantillon sont donnés par le tableau ci-dessous

Tableau III.3. Mesure de la dureté HB

Nbr d'essai	1	2	3
Dureté HB avant traitement	157.3	165.3	151.9
Dureté HB après traitement	239	229	244

En moyenne la dureté de l'acier

- ✓ Avant traitement HB= 158.16
- ✓ Après traitement HB= 237.33

III.8. Discussions des résultats de la dureté

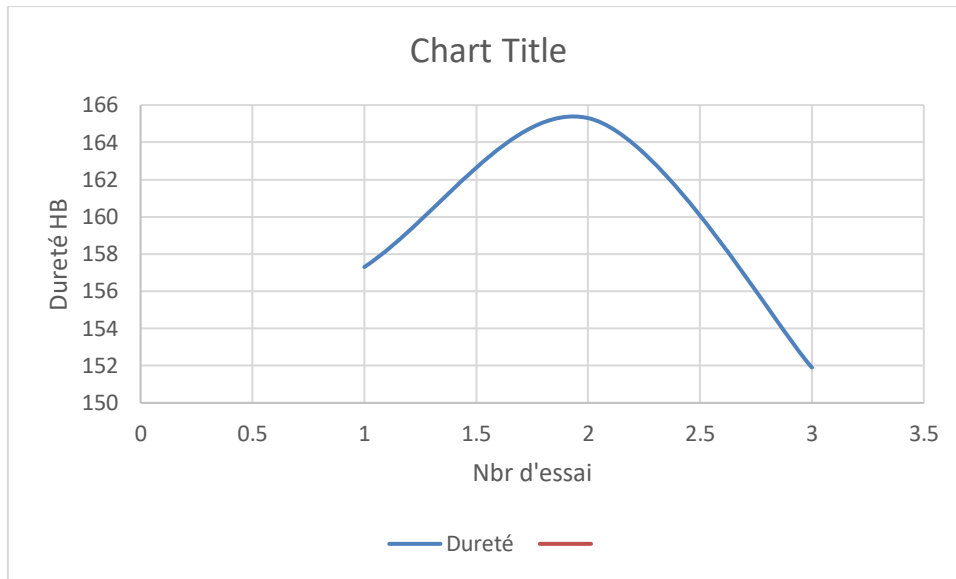


Figure III.6 Courbe de dureté HB avant traitement

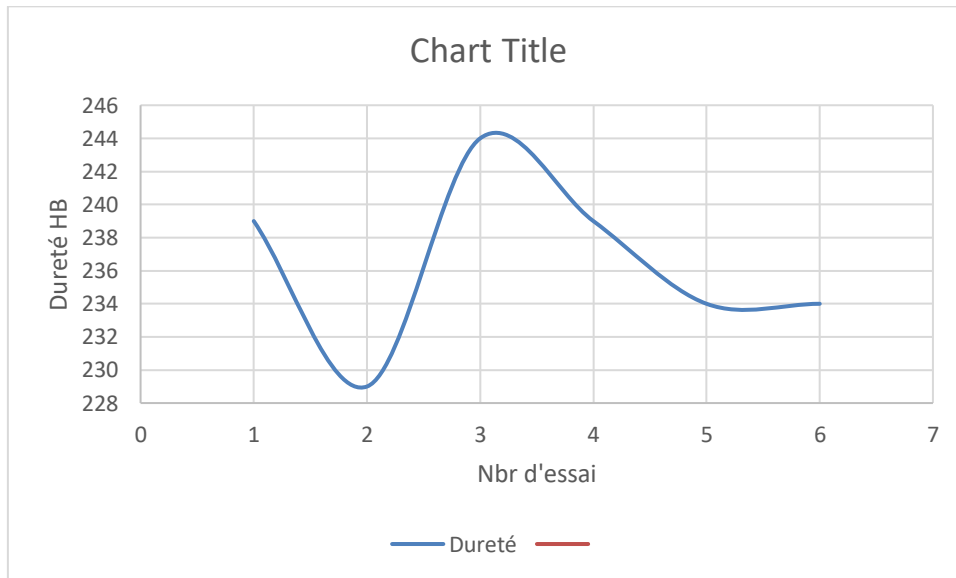


Figure III.7 Courbe de dureté après traitement

La dureté obtenue à l'état initial est de la moyenne 158.16 HB, et la dureté obtenue après avoir effectué un traitement thermique est qu'elle est homogène sur toute la surface de l'acier, et la moyenne de ce dernier est de 237.33HB.

On remarque que la dureté a augmenté après le traitement thermique

III.9. Essai de résilience

L'essai de résilience (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture. La résilience est définie par la lettre K (Joules/cm²)

L'essai se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif. On mesure la résistance au choc du matériau.

Pour effectuer cet essai nous avons réalisé plusieurs éprouvettes. Dans le sens des découpes sont différentes et ce pour pouvoir comparer l'influence du sens de laminage sur la résistance au choc de notre acier

Les essais étaient effectués dans le laboratoire de l'entreprise ENMTP

✓ **Sens latéral**

Les résultats obtenus lors des essais de résilience sur l'échantillon sont donnés par le tableau ci-dessous

Tableau III.4 Résultats de l'essai de résilience sens latérale

Nbr d'essai	1	2	3
Avant traitement	142 KcU(J/Cm ²)	150 KcU(J/Cm ²)	/
Après traitement	114KcU(J/Cm ²)	150KcU(J/Cm ²)	112KcU(J/mm ²)

En moyenne la résilience de l'acier dans le sens latéral

- Avant traitement $KcU = 146 \text{ J/Cm}^2$
- Après traitement $KcU = 125.33 \text{ J/Cm}^2$

✓ **Sens transversal**

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau ci-dessous

Chapitre III : Résultats et interprétations

Tableau III.5 Résultats de l'essai de résilience sens transversal

Nbr d'essai	1	2	3
Avant traitement	128KcU(J/Cm ²)	184KcU(J/Cm ²)	94KcU(J/Cm ²)
Après traitement	182KcU(J/Cm ²)	184KcU(J/Cm ²)	158KcU(J/Cm ²)

En moyenne la résilience de l'acier dans le sens transversal

- Avant traitement KcU=120 J/Cm²
- Après traitement KcU=174.66 J/Cm²

III.10. Discussions des résultats de l'essais de résilience

✓ Sens latéral

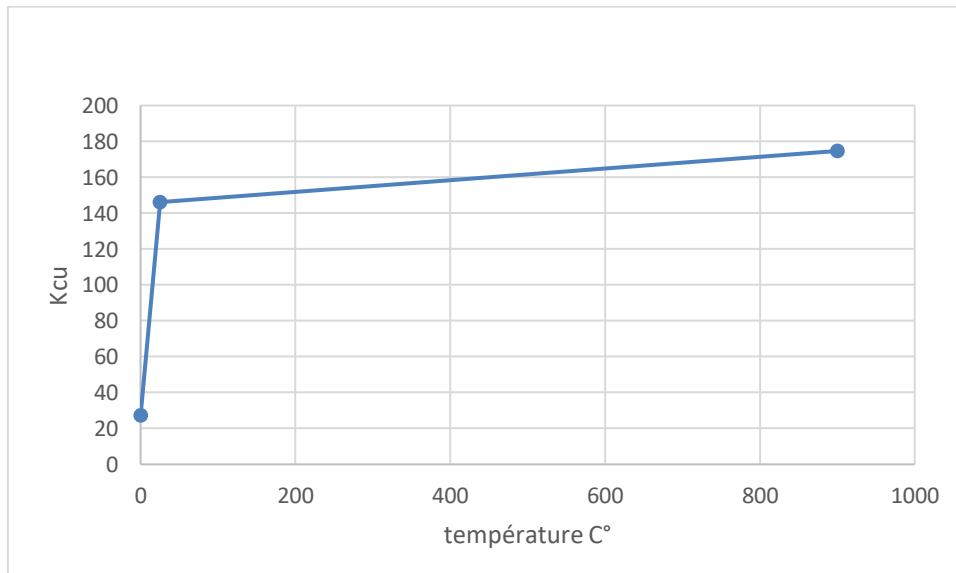


Figure III.8. Courbe de résilience dans le sens latéral

✓ Sens transversal

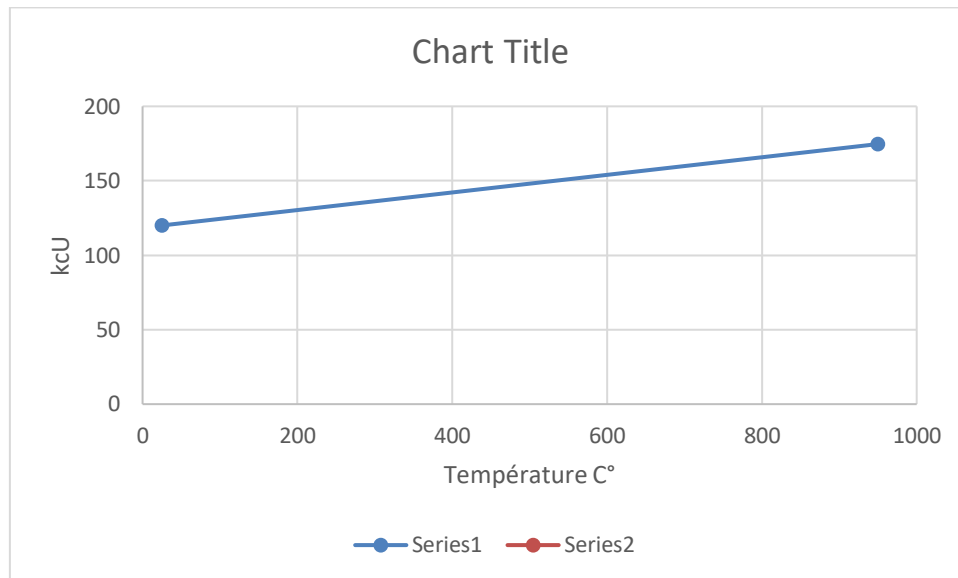


Figure III.9. Courbe de résilience dans le sens transversal

D'après les résultats obtenus nous remarquons une différence sur l'énergie absorbée à la rupture de l'acier entre les deux sens ;

Avant traitement thermique l'acier S355 absorbe beaucoup plus d'énergie dans le sens latéral que dans le sens transversal

Par contre l'acier S355 absorbe une énergie à la rupture plus élevée dans le sens transversal que dans le sens latéral

III.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats expérimentaux pour décrire les essais mécaniques sur l'acier S355 J2+N

Nous avons présenté en premier lieu les résultats de la microscopie, ensuite les résultats de la dureté Brinell et Vickers et pour finir nous avons présenté les résultats de la résilience.

Pour terminer ce chapitre, est une étude comparative, entre le sens de laminage de l'acier S355 J2+N ? dans le but de déterminer l'effet du traitement thermique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail de mémoire met en évidence les transformations métallurgiques et évolutions des propriétés mécaniques au cours de revenu de l'acier trempés. Les principales conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Avant le traitement thermique, nous avons remarqué que la microstructure de base du minerai était une combinaison de ferrite et de perlite. Ainsi, la phase ferrite est inférieure à la phase perlite.
- La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénite, pour obtenir une structure plus dure la structure martensitique.
- Le traitement thermique et le temps de maintien de l'acier ont un effet très clair sur la morphologie ou bien la microstructure de ce métal.
- La température d'austénitisation doit être optimale, l'élévation de cette température favorise la mise en solution des carbures contenus à l'état recuit ce qui accroît la teneur en carbone de la martensite, donc le durcissement à la trempe
- La température de revenu est le facteur le plus influent sur les caractéristiques mécaniques du matériau
- Au cours de revenu de retour à l'équilibre chimique, on assiste à une remontée non moins continue des caractéristiques de ductilité
- De point de vue dureté, l'acier a une considérablement plus élevée après traitement thermique.
- Le sens de laminage a une influence sur les propriétés mécaniques de l'acier.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Référence bibliographique :

- [1] : Afnor, Produits sidérurgique, Aciers pour construction, Recueil de normes françaises, 1988.
- [2] : Matériaux, tome 1 et 2, N.Bouaoudja, édition OPU, 1992
- [3] : Fédération Française de l'Acier ; juillet 2012.
- [4] : Métallographie et traitements thermiques des métaux, I.Lakhtine, édition Mir Moscou, 1978
- [5] : J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques, 2007.
- [6] : H.Hamadache ; Concepts Fondamentaux de la Mécanique Des Matériaux, éditions de l'université de Badji Mokhtar, 2007.
- [7] : Muriel Hantcherli, pour obtenir le grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 15 Avril 2010
- [8] : J. Campbell : Solidification structure castings second édition (2003), pages 117-177.
- [9] : G. Murry, « Aide-mémoire Métallurgie 2eédition Métaux • Alliages • Propriétés, Dunod», Paris, 2004, 2010
- [10] : Construction métallique – Manfred A. Hirt, Rolf Bez
- [11] : Madeleine Durand-Charre : la microstructure des aciers et des fontes, Genèse et interprétation, SIRPE éditeur, Paris (2003)
- [12] : William D. Callister, Jr, Science et génie des matériaux, MODULO, Canada 2001
- [13] : Colombier : les aciers à outils et leur traitement thermique(1971), pyc-édition, Paris.
- [14] O. Taâmallah. « Effet de traitement mécaniques de surface (TMS) sur l'érouissage et la ténacité d'un acier », mémoire de magister, université Badji Mokhtar-Annaba 2012.

Résumé

Notre travail a porté essentiellement sur l'étude des propriétés mécaniques de l'acier S355 J2+N utilisé dans la construction métallique, pour chercher l'influence du traitement thermique et le sens de laminage sur ces caractéristiques mécaniques.

Nous avons appliqué plusieurs essais mécaniques tel que l'essai de micro dureté, l'essai de résilience.

Mots clés : acier S355 J2+N, propriétés mécaniques, courbe de résilience, courbe de micro dureté, micro dureté microstructure

Abstract

Our work has focused on the study of the mechanical properties of S355 J2 + N steel used in metal construction, to investigate the influence of heat treatment and the direction of rolling on these mechanical characteristics.

We applied several mechanical tests such as the micro hardness test, the impact test.

Key words: S355 J2 + N steel, mechanical cleanliness, impact curve, micro hardness curve, micro hardness microstructure

المخلص

ركز عملنا على دراسة الخواص الميكانيكية لصلب S355 J2 + N المستخدم في الإنشاءات المعدنية، للتحقق من تأثير المعالجة الحرارية واتجاه التدحرج على هذه الخصائص الميكانيكية. قمنا بإجراء العديد من الاختبارات الميكانيكية مثل اختبار الصلابة الدقيقة واختبار الصدم. **الكلمات الأساسية:** الفولاذ S355 J2 + N، النقاة الميكانيكية، منحنى التأثير، منحنى الصلابة الدقيقة، البنية المجهرية للصلابة الدقيقة