



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI – LAGHOUAT

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE MASTER

Présentée et soutenue publiquement par :

Boutaba Youcef Taha et Yahia Benabdearrahmane

DOMAINE : Science Et Technique

FILIERE : Génie Mécanique

OPTION : Génie des matériaux

Thème

**Contribution à l'analyse structurale par MEB et DRX
du cordon de soudure l'acierx70(API).**

M^R Bensmail Belkacem

MCB

Président

M^R Bourenane Hocine

MCB

Examineur

M^{elle} Benarrache Souad

MCB

Encadreur

M^R Benhorma Hadj Aissa

Pr

Co- Encadreur

2022

رسالة إهداء

الحمد لله والصلاة والسلام على الرحمة المهداة والسراج المنير سيدنا
محمد صلى الله عليه وسلم

أما بعد نهدي ثمرة هذا العمل المتواضع الى عائلتنا الكريمتين اللاتي
سهرتا من أجلنا وقاما برعايتنا حتى بلغنا هذه المرتبة والمنزلة من العلم
فاللهم أسعدهم ووفقهم ورزقهم الصحة والعافية كما ربينا صغار يا رب
العالمين .

ونهدي هذا النجاح لكل أساتذتنا وأصدقائنا وجميع من كان له فضل علينا .
كما نسال الله تعالى ان يجعل هذا العمل نبراسا لكل طالب علم

والحمد لله رب العالمين .

رسالة شكر وتقدير :

بداية نشكر الله عز وجل ونصلي على سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم ,اما بعد فنحمد الله العلي القدير على توفيقه وتيسيره لنا في هذا العمل المتواضع بأن عرفنا على مجموعة من عباده الذين سخروا انفسهم لنا وضحو بوقتهم الغالي من اجل نصحنا و ووفروا لنا الجو مثالي الذي ساعدنا كثيرا اتمام عملنا .

بعد شكرنا للميسر العليم الحكيم نشكر اولا الاستاذ الحاج عيسى بن حرمة صاحب المواقف الاخلاق السامية ولأستاذتنا سعاد بن عراش التي كانت اما بآتم معنا الكلمة ; كما نخص بالذكر السادة أعضاء اللجنة رئيس اللجنة الاستاذ بن سماعيل بالقاسم والاستاذ الممتحن بورنان حسين فجزاهم الله عنا خيرا.

ونشكر كذلك السيد معمر كلبيت الذي كان له الفضل في احضار العينة من شركة DML .ولا ننسى الطاقم البيداغوجي والاداري كل أسمه وجميل وسمه أولا نشكر الغني عن التعريف ميهوبي شريف المجتهد المحب لعمله رحب بنا اشد ما ترحيب وساعدا كثيرا في مشوارنا الجامعي وكما نخص بالذكر كذلك الطاقم المخبري الاستاذ الباحث عمار علاوي الاستاذ غانم علي وطلبة الدكتور سعاد فرحات وقاوي حليلة والدكتور احمد دعاس والاستاذ منصور وتقني الورشة من مسؤولها الاستاذ الشطي علي و عوسي احمد وقويدر بو عبد الله ومسؤول المكتبة عيسى عطيات.

كما لا ننسى الذين ساعدونا في شركة BATI METAL على رأسهم مسؤولها السيد خطوي محمد و السيد مبروك بوطبة وكذلك في الارضية التكنولوجية للتحليل الفيزيائي و الكيمائي السيدة الموقرة تواتي خديجة التي ساعدتنا في تحليل عيناتنا بالأشعة السينية و الأخ الفاضل أحمد بطيمي لمساعدته لنا في الطباعة و التجليد المذكرة.

فجزاكم الله عنا خيرا وبارك الله فيكم .

ملخص

إن سباق الدول في البحث العلمي في مجالات البترول وطريقة نقل البترول لمكان إلى آخر ألهم فضولنا العلمي للبحث حول لحام انابيب البترول. يتطلب هذا البحث وهذه الدراسة معرفة مدى تأثير الحرارة على منطقة اللحام لل فولاذ X70 حيث وضعناه في الفرن في درجات معالجة مختلفة وأزمنة متغيرة تم تحليل المجهرى بواسطة المجهر الضوئي وكذا المجهر الماسح, تحليل باستعمال جهاز انكسار الأشعة السينية و قياس الصلابة لكل العينات . أن إرتفاع في درجة المعالجة الحرارية أثر في البنية المجهرية لمنطقة اللحام X70 حيث أن البنية المجهرية حدث لها إعادة التبلور في درجة 550°C درجة عند ساعتين و ظهور وإرتفاع في الضغوطات الداخلية أدى الى إنخفاض في الصلابة.

الكلمات المفتاحية: فولاذ X70, المعالجة الحرارية, منطقة اللحام, الأشعة السينية, الصلابة, الحبيبات, إعادة التبلور.

Résumé

La course de monde dans la recherche scientifique dans les domaines du pétrole et la façon dont le pétrole est transporté à un autre endroit a inspiré notre curiosité scientifique à la recherche sur le cordon de soudure des pipelines de pétrole.

Cette recherche et cette étude nécessitent de connaître l'impact de la chaleur sur le cordon de soudage en acier X70, que nous mettons dans le four à différentes températures et des temps variables, un teste métallographique par le microscope optique et le microscope électronique à balayage (MEB) ainsi que l'analyse des échantillons par la diffraction des rayons X (DRX) et la mesure la dureté a été appliqué sur l'ensemble des échantillons préparés.

L'augmentation de la température de traitement thermique affecte la microstructure du cordon de soudage de l'acier X70, une recristallisation à 550°C pendant 2 heures de maintien qui ce traduit par l'apparition des contraintes internes qui implique la réduction de la dureté.

Mots clés: l'acier X70, traitement thermique, cordon de soudure, DRX, dureté, grains, recristallisation

Abstract

The world race in scientific research in the fields of petroleum and how petroleum is transported to another place has inspired our scientific curiosity to research the weld seam of petroleum pipelines.

This research and study requires knowing the impact of heat on the X70 steel welding bead, which we put in the oven at different temperatures and varying times, a metallographic test by the optical microscope and the scanning electron microscope (SEM) as well as the analysis of the samples by X-ray diffraction (XRD) and the measurement of the hardness a was applied to all the samples prepared.

The increase in the heat treatment temperature affects the microstructure of the weld bead of X70 steel, a recrystallization at 550°C for 2 hours of maintenance which results in the appearance of internal stresses which implies the reduction of hardness.

Keywords: X70 steel, heat treatment, weld bead, DRX, hardness, grains, recrystallization

Chapitre I :Recherche Bibliographique

Figure I.1: Cycle d'un traitement thermique	7
Figure I.2: Chauffage des pièces	8
Figure I.3:: Diagramme d'équilibre Fe-C métastable ou à cémentite	10
Figure I.4 : Structure ferritique	11
Figure I.5: Structure cémentite	11
Figure I.6: Structure perlitique	12
Figure I.7: Structure austénitique	12
Figure I.8: Structure martensitique	13
Figure I.9: Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).....	17
Figure I.10: Principe de fonctionnement du procédé (GMAW).....	18
Figure I.11: Soudage avec fil fourré et gaz de protection	19
Figure I.12 : Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents Procédés ...	20
Figure I.13: Principe du procédé (GTAW).....	21
Figure I.14: Mécanisme du soudage par point	22
Figure I.15 : Principe du soudage par molette	23
Figure I.16 : Principe du soudage oxygaz.....	24
Figure I.17: principe du soudage par faisceau d'électrons	24
Figure I.18 : principe du soudage laser.....	25
Figure I.19 : Soudage par friction-malaxage	25
Figure I.20 : Préparation des bords en assemblage bout-à-bout	27
Figure I.21 : Assemblages en angles	28
Figure I.22 : Assemblage à bords relevés	28
Figure I.23 : Assemblage à recouvrement	29
Figure I.24 : Diffusion élastique : les photons X rebondissent en gardant la même énergie	30
Figure I.25 : Interférences des ondes diffractées - phénomène de diffraction.....	31
Figure I.26 : Loi de Bragg donnant les directions où les interférences sont constructives..	31
Figure I.27 : Cônes de diffraction et anneaux de Debye dans une chambre de Debye-Scherrer.....	33
Figure I.28 : Indexation des pics : association d'un pic de diffraction et d'un plan (hkl)	33

Figure I.29 : Modèles de fonctionnement des diffractomètres.....	34
Figure I.30 : Modèles de fonctionnement du diffractomètre de Bragg Brentano.....	34
Figure I.31 : Transitions électroniques responsables.....	35
Figure I.32 Tube de Coolidge de la production de rayons X	35
Figure I.33 : Principe de la mesure, caractéristique principale.....	36
Figure I.34 : Électron secondaire.....	37
Figure I.35 : Électron rétrodiffusé.....	38
Figure I.36: Rayon X.....	38
Figure I.37 : Schéma d'un canon à électrons	39
Figure I.38: Détecteur d'électrons secondaires.....	40
Figure I.39: Détecteur d'électrons rétrodiffusés.....	41
Figure I.40 : machine de dureté shore D	42
Figure I.41 : Définitions des différents domaines de dureté.....	43
Figure I.42: Principe de dureté brinell.....	44
Figure I.43: Principe de Dureté Vickers (HV).....	45
Figure I.44: Principe de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier).....	46
Figure 45: Schéma général d'un microscope optique	48

Chapitre II: Techniques expérimentales

Figure II.1 : présentation du cordon de soudure de l'acier X70.....	52
Figure II.2 : figure représente le découpage d'échantillon X70.....	53
Figure II.3 : La figure représente des échantillons obtenus par ciseaux hydraulique à plaques métallique BATIMITALES	53
Figure II.4 : four utiliser pour le traitement thermique (laboratoire de mécanique)..	54
Figure II.5 : tronçonneuse à disque électrique.....	55
Figure II.6 : Machine de polissage (laboratoire de mécanique) université de LAGHOUAT.....	56
Figure II.7 : Solution Nital (4 ml d'acide nitrique et 96 ml d'éthanol).....	56
Figure II.8 : Le microscope optique(laboratoire de mécanique) université de LAGHOUAT	57
Figure II.9 : Microscopie Electronique a Balayage (MEB) au Laboratoire de Recherche Universitaire.....	58
Figure II.10 : Diffractogramme à rayons X (plateforme de recherche scientifique de l'Université de Laghouat).....	59
Figure II.11 :un appareil de mesure de dureté EQUOTIP.....	60
Figure II.12 : dalle de granit	60
Figure II.13 : Essai de mesuré la dureté d'échantillons.....	61

Chapitre III : Résultats et Discussion

Figure III-1 : Observation microscopique l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70.....	62
Figure III-2 : Observation microscopique l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70.....	62
Figure III-3 : Observation microscopique l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70.....	63
Figure III-4: Observation microscopique l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X7.....	63
Figure III-5 : Observation par microscope électronique à balayage MEB de cordon de soudure de l'acier X70	64
Figure III-6 : Observation par microscope électronique à balayage MEB de cordon de soudure de l'acier X70.....	64
Figure III-7 : Observation par microscope électronique à balayage MEB de cordon de soudure de l'acier X70.....	65
Figure III-8 : Observation par microscope électronique à balayage MEB de cordon de soudure de l'acier X70.....	65
Figure III-9 : Diffractogramme de cordon de soudure X70 état brut (sans traitement thermique)	66
Figure III-10 : Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 450°C a un temps de maintien 2h)	67
Figure III-11 : Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 550°C a un temps de maintien 2h).	68
Figure III-12 : Diffractogramme de cordon de soudure X70(température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 2h)	69
Figure III-13 : Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 650°C a un temps de maintien 2h).	70
Figure III-14 : Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 1h).	71
Figure III-15 : Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 2h).	72

Figure III-16 : Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 3h).	72
Figure III-17: Diffractogramme de cordon de soudure X70(température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 4h).	73
Figure III-18: Diffractogramme de cordon de soudure X70(température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 5h).	74
Figure III-19 : Comparaison des diffractogramme de cordon de soudure X70	74
Figure III-20 : Comparaison des diffractogrammes de cordon de soudure X70	75
Figure III-21 : Présentation des résultats de mesure de dureté	75
Figure III-22 : Présentation des résultats de mesure de dureté.....	76

LISTE DES TABLEAUX

Pages :

Tableau II.1 : composition chimique de l'acier X70 (API)	52
Tableau III.1: Liste des pics du cordon de soudure X70 état brut (sans traitement thermique).....	66
Tableau III.2: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 450°C a un temps de maintien 2h)	67
Tableau III.3: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 550°C a un temps de maintien 2h.....	68
Tableau III.4: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 2h)	68
Tableau III.5: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 650°C a un temps de maintien 2h).....	69
Tableau III.6: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 1h)	70
Tableau III.7: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 2h)	71
Tableau III.8: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 3h)	72
Tableau III.9: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 4h)	73

Tableau III.10: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 5h).....74

Liste des abréviations :

HSLA : Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique.

API : Institut Américain du pétrole.

E : Module d'Young du matériau.

HR : Dureté Rockwell.

Hv : dureté Vickers.

MAG : métal active gaz.

TIG : Tungstène inerte gaz.

TTT: Transformation Temps Température

X : acier fortement alliée.

ZF : Zone fondue.

γ : Phase austénitique.

α : Phase ferritique.

Qi: énergie inter faciale des grains.

K: est une constante dépend du mature.

σ : limite élastique $\sigma = E/\epsilon$.

ϵ : déformation élastique

d:diametre moyen des grains.

n:ordre de diffraction (généralement égale à 1).

d_{hkl} : distance inter réticulaire entre les plans en diffraction.

Θ : angle d'incidence entre les plans en diffraction et le faisceau des rayons X.

ΔH : Enthalpie

ΔS : Entropie

SOMMAIRE

DÉDICACE	
REMERCIEMENT	
RÉSUMÉ	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	
INTRODUCTION:.....	1
CHAPITRE I : Recherche Bibliographique	
I. Les aciers:.....	2
I.1 Histoire de l'acier :	2
I.2. Définition de Les aciers :.....	3
I.3. Type d'acier :.....	3
I.4. Acier inoxydable:.....	4
I.5. Aciers haute limite élastique :.....	4
I.6. catégories et caractéristiques des aciers (HLE):.....	4
I.7 Effet traitements thermique:	6
I.8. Cycle d'un traitement thermique:.....	7
I.9. Diagramme d'équilibre:	9
I.10Influence de la composition chimique:	13
II. Le soudage :.....	15
II.1Introduction:	15
II.2Histoire de Soudage:.....	15
II.3Définitions de base:.....	16
II.4procédés de soudage:.....	16
II.5Types des assemblages soudés:.....	28
III. La diffraction de rayon X :	29
III.1Définition:	29
III.2Principes de la DRX:.....	29
III.3Production des rayons X pour la diffraction :.....	35
IV Microscope Electronique à Balayage (MEB) :.....	36
IV.1Définition:	36
IV.2Principe de la mesure, caractéristique principale:.....	36
IV.3Fonctionnement:.....	39
V. Essais de dureté:	42
V.1Généralités et définition:.....	42
V.2Machine d'essai:.....	42
V.3Domaines de la dureté:.....	42
V.4Essai de dureté Brinell (HB):.....	43
V.5Essai de Dureté Vickers (HV):.....	45
V.6Pénétrateur:	46
V.7L'essai se déroule en trois phases:	47
VI. Le microscope optique:	47

SOMMAIRE

VI.1Introduction:	47
VI.2Éclairage:	48
VI.3Grandissement-Grossisseme:	49
VI.4Limite de résolution:	49
VI.5Les objectifs de microscopes:	49
VI.6Les oculaires:	49
CHAPITRE II: Techniques expérimentales	
I. Introduction :	51
II. Présentation de l'entreprise:	51
III. Matériau utilisé:	51
IV. Préparation des échantillons:	52
IV.1Découpage grossier de la plaque pour échantillons:	52
IV.2Traitements thermiques:	54
IV.3Découpage de finition des éprouvettes:	55
IV.4Attaque chimique:	56
V. Observation microscope optique:	57
VI. Analyse par Microscopie Electronique à Balayage (MEB):	57
VII. Analyse par diffraction des rayons X:	58
VIII. Essais de dureté:	59
VIII.1Principe d'appareil:	59
CHAPITRE III: Résultats et Discussion	
III-1 Résultats d'observation par microscope optique :	62
III-2 Résultats d'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB):	64
III-3 Résultats de diffraction à rayons X:	65
III-4 Résultats de l'essai de dureté:	75
III-5 Discussion:	76
CONCLUSION:	78
LISTE DE RÉFÉRENCES:	79

Introduction:

Le développement technologique dans le domaine de la construction mécanique a connu une évolution galopante, surtout dans le domaine du stockage et transport du pétrole et gaz ainsi que la construction automobile, navale etc...

L'assemblage des composantes d'une structure mécanique dans la construction mécanique présente un élément clé ; parmi les techniques d'assemblage le soudage occupe une très large place dans la construction des structures destinées à l'industrie pétrolières, navale et autre.

La recherche et le suivie dans le domaine des matériaux est plus que nécessaire, car il nous permet d'étudier et d'analyser les propriétés mécaniques, physique, chimiques etc... des matériaux. Globalement le soudage présente un point faible du point de vue mécanique et électrochimique dans une telle construction. Notre étude consiste à faire une analyse microstructurale et morphologique du cordons de soudure de l'acier X 70 (API) qui occupe une grande place dans les la construction pétroliers et navales.

Dans ce cadre, nous avons fait l'étude et le suivie de la microstructure et la morphologie micrographique ainsi que la micro dureté du cordon de soudure de l'acier X70 (API) après avoir lui subir des traitements thermiques.

Dans notre étude, on commence par un premier chapitre dans lequel on présente l'acier X70 (API) et les différents types soudure qui lui sont appliquées, suivi d'un aperçu général sur les traitements thermiques et les analyses par DRX, microscopie à balayage et optique. Dans le deuxième chapitre, on développe le mode opératoires dans lequel on explique les différents étapes des techniques expérimentales réalisées sur l'analyse du cordon de soudure de l'acier X70, qui se base généralement sur les traitements thermiques, les analyses par DRX, MEB et MO et les différents opérations de préparation des éprouvettes. Et en fin on finalise notre étude par un chapitre dans lequel on présente l'essentielle de nos résultats obtenus suivie analyse et d'une discussion des résultats obtenus tout en clôturant cette étude par une conclusion générale.

Chapitre I

Recherche Bibliographique

I. Les aciers :

I.1 Histoire de l'acier :

L'Âge du fer se caractérise par l'adaptation du bas fourneau à la réduction du fer. Ce bas fourneau produit une loupe, un mélange hétérogène de fer, d'acier et de laitier, dont les meilleurs morceaux doivent être sélectionnés, puis cinglés pour en chasser le laitier.

En poussant le vent, on attise la combustion et la température de fusion du métal est atteinte. On extrait le métal par vidange du creuset : c'est la production au haut fourneau. On obtient alors de la fonte, le fer liquide se chargeant de carbone au contact du charbon de bois. En effet, deux phénomènes complémentaires se déroulent dans le creuset du haut fourneau : le fer se charge de carbone lorsqu'il arrive au contact du charbon de bois, ce qui abaisse son point de fusion. Puis ce métal fondu continue à s'enrichir en carbone, en dissolvant le charbon de bois. Les premières coulées de fonte ont été réalisées par les Chinois durant la période des Royaumes combattants (entre -453 et -221). Ceux-ci savent aussi brûler le carbone de la fonte, en le faisant réagir avec de l'air, pour obtenir de l'acier. Il s'agit du procédé indirect, car l'élaboration de l'acier se fait après l'obtention de la fonte. En Europe et en Asie, durant l'Antiquité, on produisait également de l'acier en décarburant le fer avec des gaz de combustion et du charbon de bois (acier de cémentation) .

Réaumur, en réalisant de très nombreuses expériences et en publiant les résultats de ses observations en 1722, fonde la sidérurgie moderne : il est le premier à théoriser le fait que l'acier est un état intermédiaire entre la fonte et le fer pur, mais les connaissances du temps ne lui permettent pas d'être scientifiquement précis. Il faut attendre 1786 pour que la métallurgie devienne scientifique : cette année-là, trois savants français de l'école de Lavoisier, Berthollet, Monge et Vandermonde présentent devant l'Académie royale des sciences un Mémoire sur le fer dans lequel ils définissent les trois types de produits ferreux : le fer, la fonte et l'acier. L'acier est alors obtenu à partir du fer, lui-même produit par affinage de la fonte issue du haut fourneau. L'acier est plus tenace que le fer et moins fragile que la fonte, mais chaque transformation intermédiaire pour l'obtenir augmente son coût.

La révolution industrielle apparaît grâce à la mise au point de nouvelles méthodes de fabrication et conversion de la fonte en acier. En 1856, le procédé Bessemer, est capable d'élaborer directement l'acier à partir de la fonte. Son amélioration par Thomas et Gilchrist permet sa généralisation. Ces découvertes, mènent à la fabrication en masse d'un acier de qualité (pour l'époque). Enfin, vers la seconde moitié du XIX siècle, Dimitri découvre les transformations polymorphes de l'acier et établit le diagramme binaire fer/carbone, faisant passer la métallurgie de l'état d'artisanat à celui de science. [1]

I.2 Définition de Les aciers :

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone).

Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments, incorporés volontairement ou non au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage: il est considéré alors comme un acier allié .[2]

I.3 Type d'acier :

Les aciers sont classés en fonction de deux critères : la composition chimique et le niveau de qualité (raffinement, pureté). On distinguera des aciers non alliés (<1%d'alliage), peu alliés (teneur de chaque élément d'alliage <5%) ou fortement alliés $\geq 5\%$. Ils sont en fonction de la garantie qui donne les propriétés d'usage, l'acier de base, de qualité ou les aciers spéciaux. Ces derniers sont placés dans les deux familles :

- les aciers d'usages courant : Charpente, rond à béton, de constructions mécaniques, à limite élastiques, (Peu ou non alliés).

- les aciers spéciaux : Aciers à outils, aciers inoxydables, réfractaires... (Peu ou très alliés). [3]

Il comprend ces quatre types :

I.3.1 Acier au carbone :

L'acier au carbone a un aspect mat et est connu pour être sensible à la corrosion.

Dans l'ensemble, on en distingue trois sous-types : acier à faible, moyenne et forte teneur en carbone, avec une faible teneur d'environ 0,30 % en carbone, moyenne 0,60 % et élevée 1,5 %. Le nom lui-même dérive du fait que les aciers contiennent une très petite quantité d'autres éléments d'alliage. Ils sont exceptionnellement résistants, c'est pourquoi ils sont souvent utilisés pour fabriquer des produits tels que des couteaux, des fils haute tension, des pièces de voiture et d'autres articles similaires.

Les aciers au carbone représentent environ 90 % de toute la production d'acier . [4]

I.3.2 Acier allié :

Les aciers alliés sont un mélange de différents métaux, tels que le nickel, le cuivre et l'aluminium. Ceux-ci ont tendance à être moins chers, plus résistants à la corrosion et sont préférés pour certaines pièces automobiles, pipelines, coques de navires et projets mécaniques. Les caractéristiques mécaniques des aciers alliés dépendent donc de la concentration des éléments qu'ils contiennent.[4]

I.3.3 Acier pour outils :

L'acier pour outils est connu pour être dur et résistant à la chaleur et aux rayures. Son nom vient du fait qu'ils sont très couramment utilisés pour fabriquer des outils métalliques, tels que des marteaux. Pour ceux-ci, ils sont composés d'éléments comme le cobalt, le molybdène et le tungstène, et c'est la raison pour laquelle l'acier pour outils présente des caractéristiques de durée dans le temps et de résistance à la chaleur très élevées.[4]

I.4 Acier inoxydable :

Enfin et surtout, les aciers inoxydables sont probablement le type le plus connu sur le marché. Ces aciers sont polis et contiennent généralement environ 10-20 % de chrome, qui est leur principal élément d'alliage. Cette combinaison permet à l'acier d'être résistant à la corrosion et facilement moulable en différentes formes. Grâce à leur manipulation facile, leur flexibilité et leur qualité, les aciers inoxydables peuvent être utilisés dans les équipements chirurgicaux, domestiques, l'argenterie et même comme revêtement externe pour les bâtiments commerciaux/industriels. [4]

I.5 Aciers haute limite élastique (HLE):

Les aciers HSLA, ont été développés dans une large gamme de limite d'élasticité, de niveau 315 à 700 MPa en laminé à chaud et de niveau 240 à 355 MPa en laminé à froid. Ce sont des aciers doux et extra doux auxquelles on ajoute de faibles quantités des éléments notamment (Nb, Ti, V, Al) afin de piéger le Carbone et l'Azote sous formes de carbures et nitrures, et pour cela sont dénommés les aciers micro-allié.[5] ; [7]

Les aciers (HLE) peuvent être divisés en six catégories:

- Aciers résistants à la corrosion.
- Aciers laminés à structure perlitique.
- Aciers à ferrite aciculaire.
- Aciers dual-phase.
- Aciers à forme d'inclusion contrôlée.
- Aciers à ferrite-perlitique.[6] [11]

I.6 catégories et caractéristiques des aciers (HLE):

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique incluent beaucoup de catégories standards et de propriétés industrielles conçues pour fournir des combinaisons spécifiques désirées des propriétés tels que la limite d'élasticité, la dureté, la formabilité, la soudabilité et la résistance à la corrosion atmosphérique.

Ces aciers ne sont pas considérés comme des aciers alliés, quoi que leurs propriétés désirées soient réalisées par l'utilisation de petites additions d'éléments d'alliage.

Les aciers (HLE) sont classifiés comme une catégorie d'acier séparée, qui est semblable à l'acier doux laminé avec des propriétés mécaniques augmentées obtenues par la petite addition judicieuse des éléments de micro alliage et peut-être, des techniques des traitements spéciales.

Les aciers (HLE) peuvent être divisés en six catégories. [7]

I.6.1 Aciers à ferrite aciculaire:

Une autre approche au développement des aciers HLE est d'obtenir une microstructure polygonale habituelle de ferrite, pendant la transformation de refroidissement des aciers à ultra bas carbone (<0.08%C) avec la trempabilité suffisante (par des additions de manganèse molybdène et/ou de bore). Le niobium peut également être employé pour le durcissement par précipitation et l'affinement des grains, dont la limite élastique dépend fortement de la taille Moyenne des grains- la différence principale entre la structure de la ferrite aciculaire (désignée également sous le nom de bainite à faible teneur en carbone) et celle de la ferrite polygonale est que l'ancien est caractérisé par une densité de dislocation élevée, et les grains fins fortement ovales qui ne sont pas exhibés en ferrite polygonale.

Les aciers de ferrite aciculaire peuvent être obtenus par trempe à l'eau ou huile, par le refroidissement à l'air forcé, bien sûr par addition des éléments appropriés pour la trempabilité. L'avantage (415 à 690 Mpa), de la résilience élevée. une application importante de ces aciers est le pipeline. Les propriétés d'un acier de ferrite aciculaire laminé sont récapitulées.

L'utilisation principale des aciers de ferrite aciculaire implique la canalisation d'hydrocarbures dans des conditions sévères. Cette application exige une combinaison de dureté élevée, de très bonne résistance et d'excellente résistance à la fissuration induite par l'hydrogène et la meilleure soudabilité.[9]

I.6.2 Aciers dual-phase:

Si les aciers dual-phase bénéficient de très bonnes propriétés mécaniques, leur limite d'élasticité élevée les rend par contre difficilement formables à froid. Dans le but de réduire la masse des véhicules, les chercheurs dans l'industrie automobile ont mis au point des aciers dont la limite d'élasticité reste moyenne (300 à 350 Mpa), mais la résistance à l'attraction, après consolidation est importante due à la déformation plastique, est comparable à celle des aciers micro alliés (650 à 700 Mpa); par ailleurs, leur allongement à la rupture demeure élevée (25 à 30%). Après leur mise en forme à froid, par écrouissage, leur limite d'élasticité est d'une moins 500 Mpa. Ces aciers, connus par le nom d'aciers dual-phase, font preuve d'une excellente formabilité à froid. Leur microstructure est composée de grains ferritiques, et des îlots de martensite dont la

proportion varie en fonction de la température inter critique. Ils contiennent peu de carbone (0.08 à 0.15%) et entre 1 et 1.5% de manganèse. La microstructure des aciers dual-phase peut être développée soit par un chauffage à l'intérieur d'un intervalle de température inter critiques (Gamma + alfa), ou par le contrôle du refroidissement à partir des conditions du laminage à chaud.

Pour la deuxième condition, il faut parfaitement Contrôler la température de fin de laminage pour que la microstructure soit composée de ferrite et d'austénite.[7] ;[8]

I.6.3 Aciers a forme d'inclusion contrôle :

Le contrôle de la forme des inclusions qui détermine la plasticité de ces derniers, s'exécute par des petites additions d'éléments de terre rare (Or, Ce.), de Zr, de Ca ou du Ti [5] [11]

I.6.4 Aciers a ferrito-perlitique :

Ce sont des aciers types C-Mn qui contiennent de faibles quantités d'éléments susceptibles de former des carbures et carbonitrures tels que le V et Nb .[12]

- Les divers types des aciers micro alliés ferrito-perlitique incluent :
- Les Aciers micro alliés au vanadium.
- Les Aciers micro alliés au niobium.
- Les Aciers micro alliés au niobium-molybdène.
- Les Aciers micro alliés au niobium-vanadium.
- Les Aciers micro alliés au vanadium-azote.
- Les Aciers micro alliés au titane.
- Les Aciers micro alliés au niobium-titane.[5]

I.7 Effet traitements thermique :

I.7.1 Introduction :

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

a. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi

donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément.

- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

b. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

c. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).[7] [13]

I.8 Cycle d'un traitement thermique :

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.1**) :

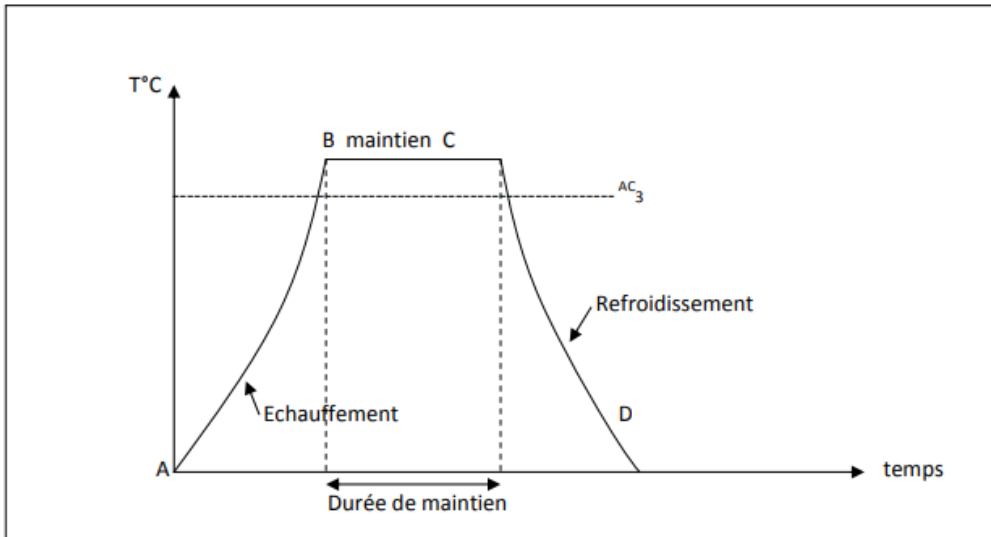


Figure I.1: Cycle d'un traitement thermique.[5]

-AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation

-BC : Maintient à une température définie.

- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :

- lente (dans le four, à l'air).
- Assez rapide (dans l'huile).
- Très rapide (dans l'eau).[5][14]

I.8.1 Chauffage des pièces :

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée.

Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. **Figure I.2** représente la courbe de chauffage pour le contour de la pièce et le cœur de la pièce , la courbe est simplifiée comme une droite .

Durant le chauffage, on distingue trois étapes :

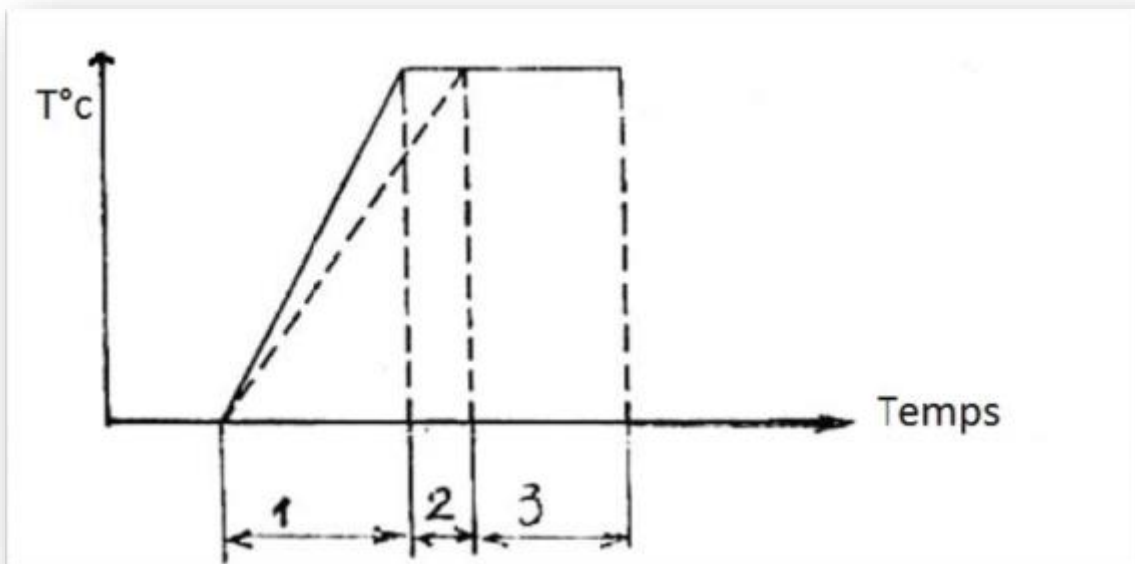


Figure I.2: Chauffage des pièces.[5]

1. Durée de préchauffage : C'est le temps de début de chauffage jusqu'à ce que la température nominale soit atteinte à la surface de la pièce.
- 2 . Durée de chauffage de pénétration ou d'égalisation : C'est le temps nécessaire pour atteindre la température nominale à la surface et au cœur de la pièce.
- 3 . Durée de maintien : C'est le temps nécessaire pour maintenir la pièce à une

Température, et à partir de la température atteinte dans le cœur.

Les facteurs principaux, qui influent sur le chauffage de la pièce sont le diamètre (épaisseur), conductivité, température du four, etc. En général le régime de chauffage pour les aciers est déterminé selon le diamètre de la pièce et les caractéristiques qui sont définis par le carbone équivalent.[7] [14]

I.8.2 Refroidissement des pièces :

Le point important pour la détermination du régime de refroidissement de la pièce est celui de l'état de structure souhaitée à obtenir. Bien sûr, on cherche toujours à refroidir rapidement pour avoir une productivité élevée, mais on doit prendre en considération les dangers de fissuration et d'étirage des pièces. La vitesse de refroidissement nécessaire à l'obtention d'un état de structure est déterminé e selon le diagramme TTT (Température, Transformation Temps). Le refroidissement s'effectue dans des bacs utilisant l'eau ou l'huile, dans les deux cas, le bain est maintenu à température constante. L'eau chaude se trouvant constamment remplacée par de l'eau froide arrivant par le bas du bac.[7][15]

I.9 Diagramme d'équilibre :

Le diagramme d'équilibre est une représentation graphique indiquant la composition des phases et la structure d'alliage Fe-C, élaboré sous la pression ordinaire supposant des vitesses de chauffage et de refroidissement extrêmement faibles.

Les domaines de solubilité du carbone sont désignés par γ et α respectivement, la solubilité étant très faible à l'état α contrairement à l'état γ qui est plus grande, ce qui explique l'étendue du domaine γ par rapport au domaine α qui est extrêmement réduit . Le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone. 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.

Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque région.[6]

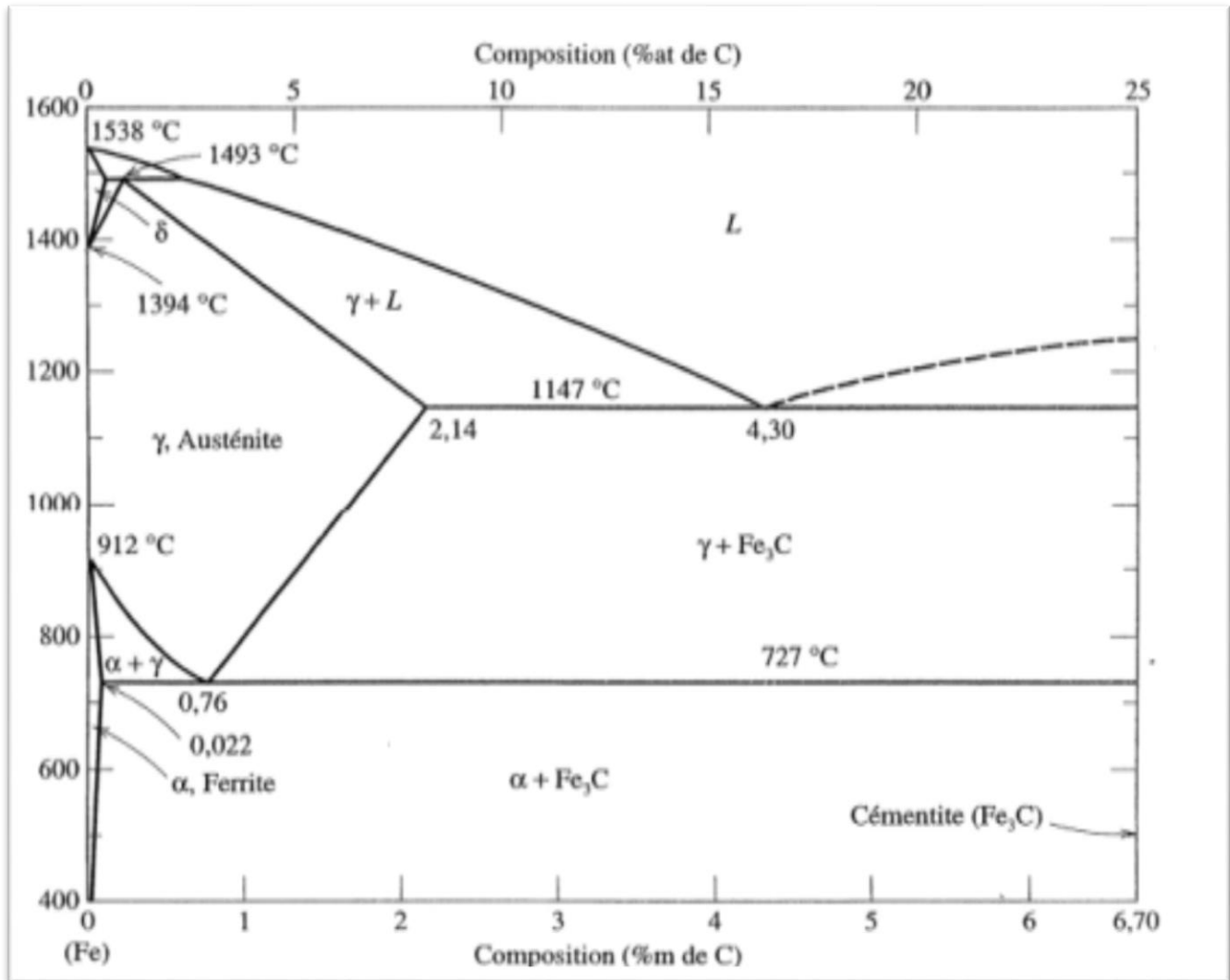


Figure I.3: Diagramme d'équilibre Fe-C métastable ou à cémentite[6]

Fer : %C < 0,008%, phase α . [16]

Aciers : %C < 2,14%, phase α et Fe_3C . [16]

En pratique : %C < 1%

- Pour un acier eutectoïde (%C = 0,76), l'austénite γ solide se transforme totalement en perlite ($\alpha + Fe_3C$) . [17]
- Pour un acier hypoeutectoïde (%C < 0,76), l'austénite γ solide se transforme en $\alpha + (\alpha + Fe_3C)$. [17]
- Pour un acier hypereutectoïde (%C > 0,76), l'austénite γ solide se transforme en perlite ($\alpha + Fe_3C$) + cémentite (Fe_3C) . [17]

Fontes : 2,14% < %C < 6,70%, phase α et Fe_3C . [16]

En général : $2,14\% < \%C < 4,5\%$.

I.9.1 Les principales phases de diagramme de phase :

I.9.1.1 ferritique :

Cette phase contient une très petite quantité de carbone. La ferrite est aussi connue sous le terme de ferrite α ou fer α . Cette phase contient un maximum de 0.02 % de carbone à 727°C (1341°F). Lorsque la température augmente jusqu'à 912°C (1674°F), la teneur en carbone dans la ferrite tend vers zéro. Aussi, lorsque la ferrite est refroidie à température ambiante, la quantité de carbone diminue. La formation de la ferrite commence dès qu'un acier ou une fonte est refroidie en dessous de 727°C (1341°F). La structure ferritique est cubique centrée et est à la fois ductile et tenace (**Figure I.4**).[6]

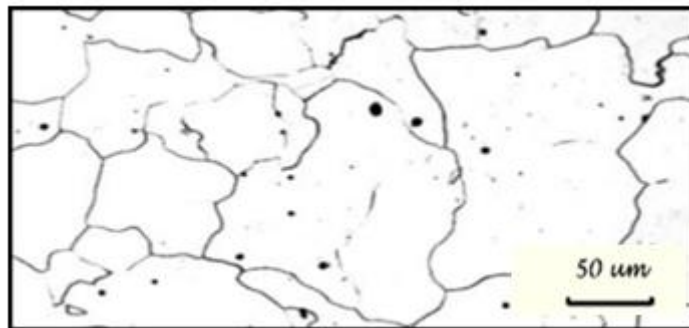


Figure I.4 : Structure ferritique [6]

I.9.1.2 La cémentite :

La cémentite pure a la formule moléculaire Fe_3C . Elle contient 6.69% de carbone, à cause de cette haute teneur en carbone, la cémentite pure n'est pas indiquée sur la **Figure I.5**. Comme mentionné auparavant, une concentration forte en carbone s'accompagne d'une augmentation de la dureté et de la fragilité. La cémentite, avec sa forte teneur en carbone, est dure et fragile. Cette phase est aussi connue sous le terme carbure de fer.[18]

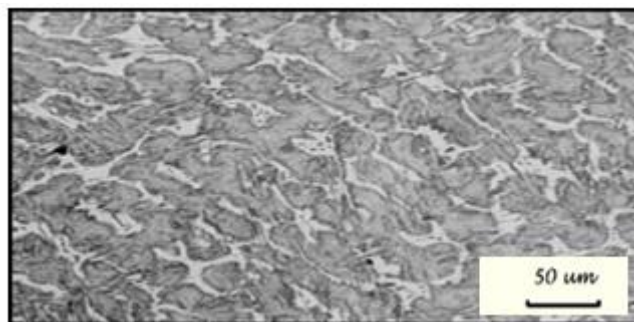


Figure I.5: Structure cémentite. [18]

I.9.1.3 La perlite :

La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite ($\alpha+Fe_3C$). Ces deux phases se trouvent en couches alternées dans la microstructure. La perlite pure se forme à 727°C (1341°F), et contient 0.76 % de carbone. Cette phase comporte toujours 0.76% de carbone. Pour un acier ou de la fonte contenant plus de 0.76 % de carbone, la perlite se forme avec de la cémentite (**Figure I.6**).[19]



Figure I.6: Structure perlitique[19]

I.9.1.4 L'austénite :

L'austénite est une solution solide présente au-dessus de 727°C (1341°F) et en dessous de 1538°C (2800°F), elle a une structure cubique face centrée (4 atomes par mailles). Le paramètre de maille de cette structure est de 3,58 Å (10–10m) et elle est compacte à 74 % (26 % de vide par maille). Le paramètre de maille est plus grand que celui de la ferrite (2,87 Å) qui a une structure cubique centrée (2 atomes par maille, compacte à 68 %). Quand le changement de phase commence, il y a un changement de coefficient directeur de la droite de dilatation (coefficient thermoélastique) qui entraîne un changement de volume jusqu'à la fin de la transformation vu que l'austénite à une structure plus compacte que la ferrite (**Figure I.7**).[6]



Figure I.7: Structure austénitique.[6]

I.9.1.5 La martensite :

La martensite est une phase obtenue à partir de l'austénite par refroidissement. En effet, à partir d'une maille d'austénite C.F.C (structure Cubique à Face Centrée), une maille de martensite quadratique centrée

est obtenue avec les atomes de carbones qui se placent entre les atomes de fer pour le modèle de Bain (Figure I.8). [6]

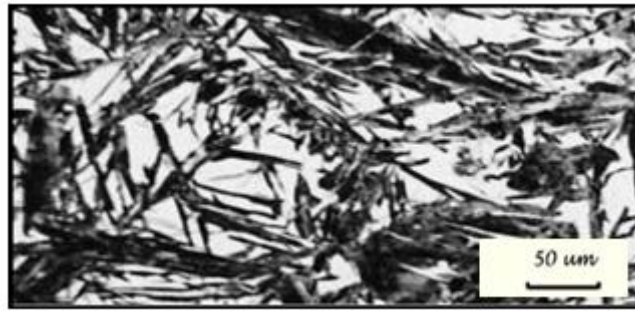


Figure I.8: Structure martensitique.[6]

I.9.1.6 Le point eutectoïde :

Est un point important sur le diagramme fer-carbone. Il se situe à 0.76% de carbone et 727°C (1341°F). Lorsque le refroidissement d'un acier passe par ce point, de la perlite se forme. [20]

Très peu d'aciers ont une composition eutectoïde exacte. La plupart d'entre eux contiennent moins de carbone que le mélange eutectoïde et sont désignés par aciers hypoeutectoïdes. La microstructure de ces aciers est une combinaison de ferrite et de perlite. Ceux ayant une teneur en carbone supérieure à celle de l'eutectoïde sont appelés aciers hypereutectoïdes. La microstructure d'un acier hypereutectoïdes est une combinaison de cémentite et de perlite.[18]

I.10 Influence de la composition chimique :

Les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) sont des aciers micro alliés au niobium, au vanadium, et au titane. Les autres éléments principaux entrant dans la composition chimique de ces aciers sont : le Carbone, le Manganèse, l'Aluminium, le Silicium, et le Molybdène. Ils sont également communément connus sous le nom des aciers à dispersives relativement aux éléments formant des phases d'insertion stable (Nb, V, Ti). Les principaux constituants structuraux de ces aciers sont : la ferrite, la perlite, et les phases secondaires qui des carbures, des nitrures et des carbonitrures des éléments dispersifs. Les HLE sont généralement laminés à chaud et s'emploient à l'état brut de laminage ou à l'état amélioré pour les constructions soudées et les pipelines. Selon la norme américaine API ils sont classés en plusieurs grades : X52, X60, X70, ...[1]

I.10.1 Influence des éléments de substitution :

I.10.1.1 Le manganèse :

Le manganèse intervient également dans tous les aciers comme désoxydant ; il augmente la trempabilité, permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable. Mais il participe à la formation de carbures et se

trouve dans la cémentite, où il remplace une partie du fer, les désoxydants : Mn, Si, Al, Ti, Nb, ...pour fixer l'oxygène dissous dans le métal liquide.[3] [22]

I.10.1.2 Silicium :

Il se rencontre à faible teneur dans les aciers, il est alors utilisé comme désoxydant. A plus forte teneur, il augmente la résistance à l'oxydation et confère certaines propriétés particulières (perméabilité meilleure). Il durcit l'acier, mais l'empêche de souder. Les aciers contenant le Si et le Mn sont appelés mangano-siliceux, ils ont la faculté de présenter après traitement thermique un taux élevé d'allongement élastique. Leur résilience est bien meilleure que celle des aciers au carbone, ils supportent une trempe énergétique sans risque d'éclatement moléculaire. L'effet durcissant du silicium en solution solide est aussi fort que celui du manganèse, de plus le silicium augmente la trempabilité que l'on doit contrôler pour améliorer la soudabilité (la teneur limite dans le cas des aciers à dispersoïdes au NbV est de l'ordre de 0.3%.[1]

I.10.1.3 Molybdène :

C'est un élément alpha gène qui tend à former des carbures et qui augmente largement la capacité de trempe des aciers. Il repousse vers la droite le domaine perlitique en affectant peu la position du domaine bainitique, le molybdène est donc particulièrement favorable à l'obtention des structures bainitique. A teneur équivalente, sa contribution est supérieure à celle du chrome.[1]

I.10.2 Influence des éléments formants des précipités :

I.10.2.1 L'aluminium :

C'est surtout un désoxydant, le rôle du nitrure d'aluminium, qui inhibe le grossissement du grain austénitique, est bien connu. L'aluminium comme le chrome, augmente la résistance à l'oxydation des aciers, il peut intervenir dans certains processus de durcissement (effet durcissant).[1]

I.10.2.2 Le vanadium :

Le vanadium facilement ré dissout peut se révéler plus souple d'emploi que le niobium ou le titane quand les cycles thermiques sont plafonnés en température spécialement en traitement thermique ou en formage à partir de basses températures ; mais en contrepartie, il ne permet pas de contrôler le grain par les effets de recristallisation ou de blocage des joints. Il faut également tenir compte d'une interaction vanadium aluminium en ce qui concerne la formation de nitrures ; la disponibilité de l'azote pour la formation de VN dépend des conditions de précipitation du nitrure d'aluminium qui peut se substituer à VN suivant les conditions d'équilibre et de cinétique ; si l'azote est sous la forme de NAl, le durcissement sera dû au carbure VC seul [21]

I.10.2.3 Le niobium :

Ce sont sans doute les précipités les plus fins qui sont obtenus d'où un durcissement global très intéressant ; le niobium est également très efficace pour le contrôle des grains en TTM (traitement thermomécanique).[3]

I.10.2.4 Le titane :

Élément d'addition bien connu pour désoxyder, dénitrurer ou fixer l'azote, le titane était réputé délicat à utiliser en raison de la formation de précipités grossiers, cubiques, très durs (surtout de nitrures mais aussi des oxycarbosulfures) et très néfastes pour la ductilité, la ténacité, la tenue en fatigue et l'usinabilité.

Les progrès de la métallurgie secondaire et l'emploi du vide ont permis de s'affranchir de ces inclusions et l'on peut ainsi utiliser le titane en micro alliage avec des précipitations fines. Comme indiqué dans les conditions générales, la présence de titane en solution puis la précipitation ont pour conséquence de retarder la recristallisation, de durcir la matrice en fixant l'azote et le carbone.[3][21]

II. Le soudage**II.1 Introduction :**

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.

II.2 Histoire de Soudage :

L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux :

- à l'âge de bronze on soudait à la poche.
- à l'âge de fer on soudait à la forge.

L'exemple le plus ancien consiste en des petites boîtes circulaires en or datant de l'âge du bronze Et assemblées par chauffage et martelage d'un joint constitué de deux surfaces se recouvrant. Il a été estimé que ces boîtes ont été fabriquées il y a plus de 2000 ans. Pendant l'âge du bronze, Les Égyptiens et les peuples de l'est méditerranéen ont appris à assembler par soudage des Pièces en fer. Plusieurs outils datant approximativement de 3000 ans ont été retrouvés.

Pendant le Moyen Âge, l'art des chaudronniers et forgerons s'est développé et plusieurs objets en fer ont été produits en utilisant la technique du martelage / soudage. Jusqu'au milieu du XIXe siècle, les procédés de soudage évoluent peu, c'est vers 1850 qu'on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.

- Fin XIXe siècle : mise en œuvre de nouveaux procédés :

-Le soudage oxyacétylénique.

-Le soudage aluminothermique.

-Le soudage à l'arc électrique.

-Le soudage par résistance.

Tous ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920.[23]

II.3 Définitions de base :

• **Soudage** : C'est l'opération de réunir de façon permanente deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage soit par chauffage, soit par pression, soit par la combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport. [6]

• **Soudure** : C'est le résultat de l'opération de soudage. [23]

❖ **Soudage homogène** : les deux parties à assembler sont de même constitution physico-chimique ou lorsque le métal d'apport est de constitution physico-chimique semblable à celle du matériau de base. [23]

❖ **Soudage hétérogène** : le métal d'apport présente une constitution physico-chimique différente de celle du matériau de base ou les métaux assemblés sans métal d'apport sont de nature différente. [23]

❖ **soudage autogène** : signifie la participation des bords des pièces assemblées à la composition du joint.[23]

II.4 procédés de soudage :

Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique. Dans la majorité des cas, elle est obtenue par fusion locale. Elle peut aussi être obtenue par diffusion, déformation, ... Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transférer l'énergie. [23]

II.4.1 Soudage à l'arc :

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder. Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques. [23]

II.4.1.1 soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) :

II.4.1.1.1 définition :

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée est le procédé de soudage le plus couramment employé pour les travaux d'entretien et de réparation. Dans ce procédé, on fait jaillir un arc électrique entre le bout de l'électrode et le métal à souder. L'électrode est constituée d'une âme métallique, recouverte de flux ou d'un revêtement (enrobage). L'électrode fond au fur et à mesure de l'opération de soudage.

Le flux protège de l'air ambiant les ions métalliques de l'arc et assure ainsi la stabilité de l'arc. A mesure que le flux fond, il dégage des fumées et dépose un laitier protecteur sur le métal en fusion.

Ce type de soudage est utilisé pour les travaux d'entretien et de réparation effectués sur l'acier doux, l'acier inoxydable, l'aluminium et les métaux non ferreux. Dans les ateliers de soudage, ce type de soudage est peu utilisé.

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée tend à être remplacé par le soudage MIG MAG.[23]

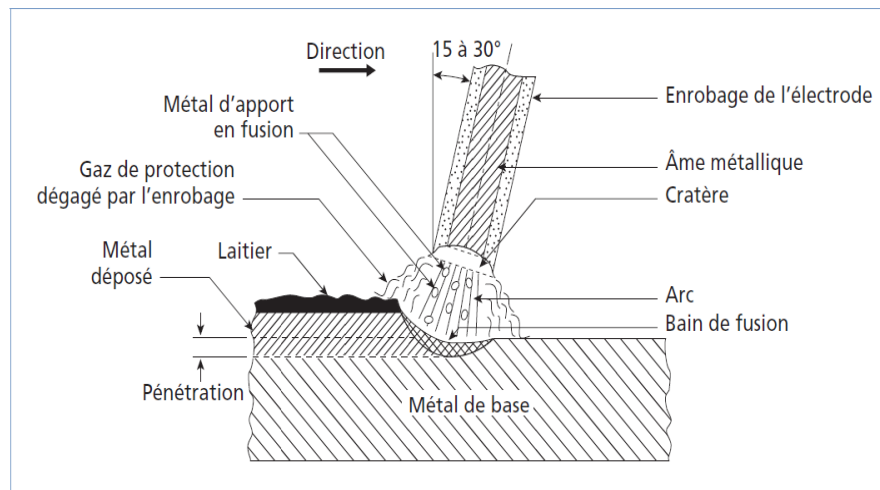


Figure I.9: Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)[24]

II.4.1.1.2 Avantages et inconvénients de soudage SMAW:

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux.

Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.

Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V.

II.4.1.2 Applications :

Le procédé de soudage SMAW est très populaire, entre autres dans certaines tâches spécialisées telles que, par exemple, des récipients et des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des ponts et des bâtiments ou des navires et des wagons.

Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier.[25]

II.4.1.3 Soudage MIG/MAG fil plein(GMAW) :

II.4.1.3.1 Définition :

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport (**Figure I.10**).

La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé. Comme pour le GTAW, le bain de fusion est protégé par un gaz de protection .

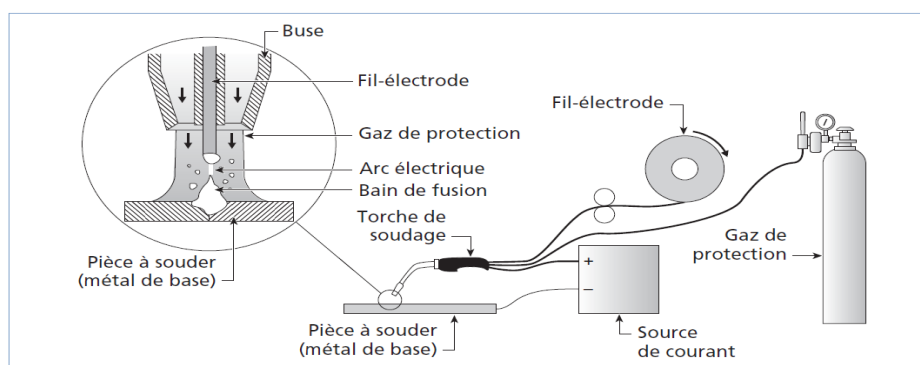


Figure I.10: Principe de fonctionnement du procédé (GMAW).[24]

Le fil-électrode est alimenté dans la torche par un dévidoir. Il peut être poussé ou tiré. Les dévidoirs sont à vitesse fixe ou variable.

On distingue deux catégories de GMAW, en fonction de la nature du gaz de protection utilisé :

1. Le procédé MIG (Métal Inert Gas) qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium)
2. Le procédé MAG (Métal Active Gas) qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif.

II.4.1.3.2 Avantages et inconvénients :

Le procédé de soudage GMAW soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium (où il tend à remplacer de plus en plus le GTAW) et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés.

Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé. Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup.

Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier.

La pénétration obtenue peut être profonde ; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée. La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible.

Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact ou de se figer dans le bain de fusion, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables. [23]

II.4.1.3.3 Applications :

Le soudage GMAW est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé. [23]

II.4.1.3.4 Soudage MAG fil fourré (FCAW):

II.4.1.3.5 Définition :

Le soudage à l'arc avec fil fourré de flux (MAG fil fourré) est appelé également soudage FCAW. Dans ce procédé, la tête de soudage d'un pistolet à souder déroule à vitesse constante un fil constitué d'un tube en métal fourré de flux.

Le flux aide à amorcer l'arc, forme un laitier et comprend des adjuvants destinés à renforcer la soudure. Le gaz de protection (CO_2 , mélange Argon – CO_2) dépend du fil fourré utilisé (possibilité d'une autoprotection par dégagement du gaz protecteur suite à la décomposition du flux) Ce type de soudage est utilisé surtout pour les travaux d'assemblage mécanique (charpente).

ou de maintenance générale. Ce procédé est principalement utilisé pour les aciers au carbone et aciers inoxydables.[23]

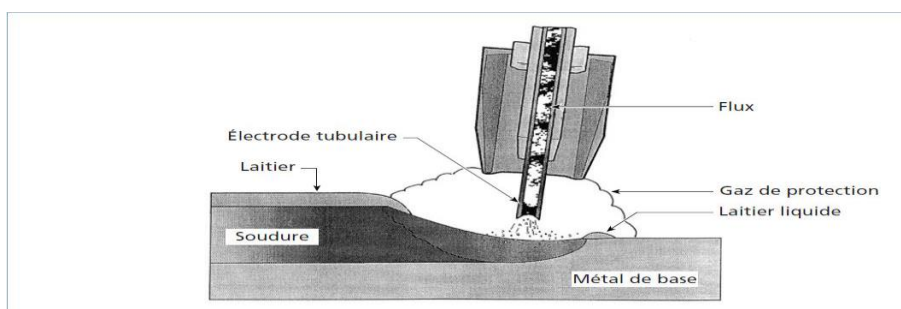


Figure I.11: Soudage avec fil fourré et gaz de protection.[24]

II.4.1.3.6 Avantages et inconvénients :

Ces procédés de soudage connaissent un essor certain, dû notamment à leur taux de dépôt supérieur aux autres procédés en fonction de l'intensité de courant utilisé . (**Figure I.12**)

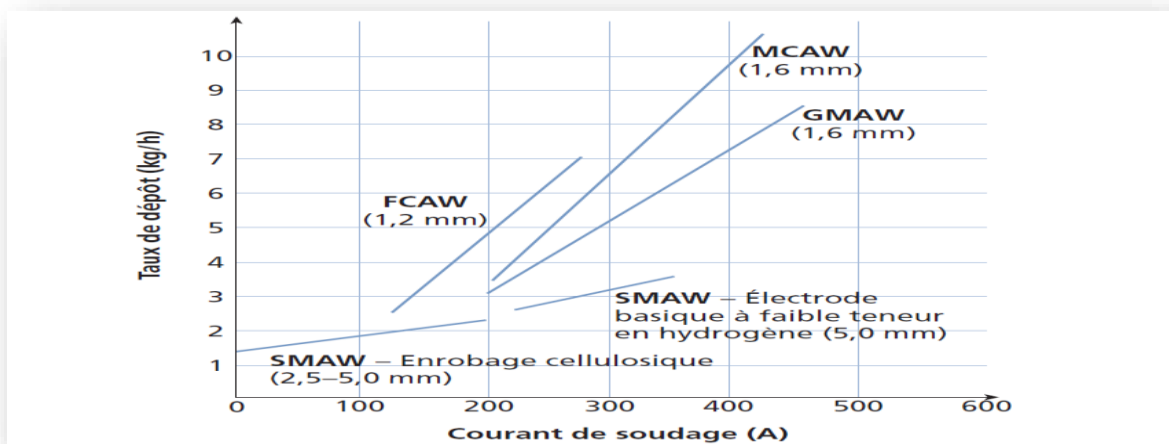


Figure I.12 : Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents Procédés.[23]

On emploie les procédés FCAW pour le soudage de l'acier doux ou faiblement allié ainsi que pour l'acier inoxydable. Ces procédés procurent une pénétration profonde et sont appropriés pour le soudage de fortes épaisseurs de métal (variant le plus souvent entre 5 et 50 mm).

II.4.1.3.7 Applications :

Ces procédés sont particulièrement utilisés dans l'industrie de la fabrication de ponts, de réservoirs, de turbines, de matériel agricole et de châssis de camions, de même que dans la construction navale, la chaudronnerie-tuyauterie, les travaux d'entretien, le rechargement, etc.[25]

II.4.1.4 SOUDAGE TIG (GTAW):

II.4.1.4.1 Définition :

Pour le soudage à l'électrode de tungstène (TIG), un arc électrique est amorcé entre la pièce à souder et l'électrode de tungstène. L'électrode demeure réfractaire à la fusion. La protection de l'arc est assurée par un débit continu de gaz, habituellement de l'Argon (ou aussi de l'Hélium ou encore un mélange Argon – Hélium). Cette protection empêche les gaz atmosphériques de pénétrer dans la zone de soudage. L'arc peut fusionner deux pièces de métal sans métal d'apport. En cas d'apport de métal, celui-ci est introduit sous forme de baguette.

Le soudage TIG sert couramment dans les travaux de soudage d'aluminium (soudage métaux nobles). Il peut également servir à souder les pièces en acier doux ou en acier inoxydable. [23]

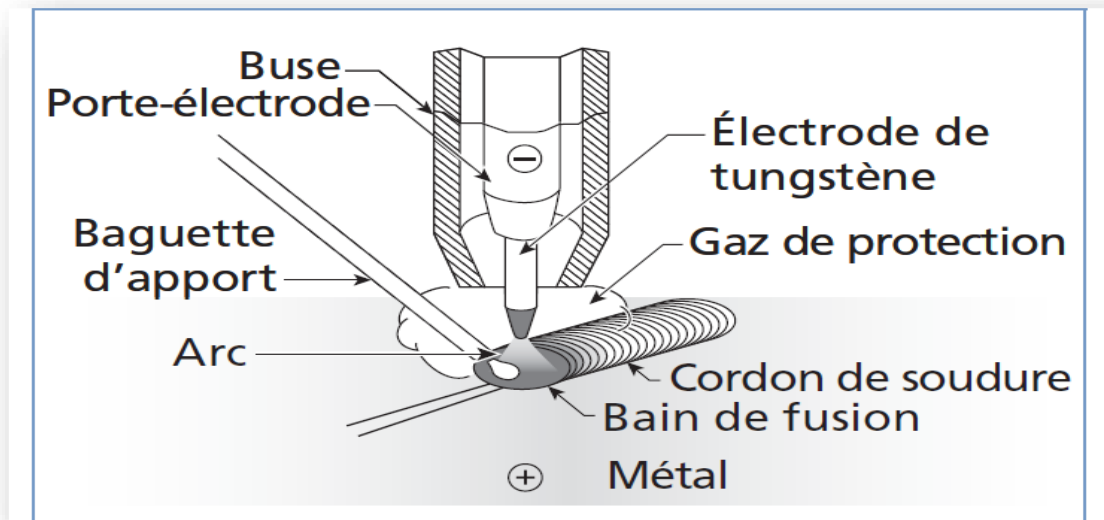


Figure I.13: Principe du procédé (GTAW).[26]

II.4.1.4.2 Avantages et inconvénients :

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages).

Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.

La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.

Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.

II.4.1.4.3 Applications :

On l'utilise surtout dans les secteurs de la construction aéronautique, pour le matériel de restauration, les blocs-moteur, les citernes, les carrosseries, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques (échangeurs d'air), les décorations et pour la fabrication ou la réparation de petites pièces. [23]

II.4.1.5 Le Soudage par point (RSW) :

II.4.1.5.1 Définition :

Dans ce procédé, la soudure résulte à la fois de la chaleur générée par le passage d'un courant électrique (effet Joule) et de la pression exercée aux points de contact des électrodes. Ces électrodes sont en général constituées de cuivre ou d'un alliage de cuivre et de béryllium. Aucun métal d'apport ou flux n'est utilisé.

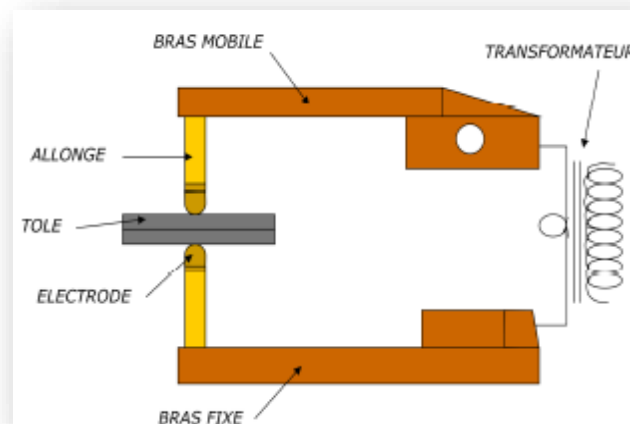


Figure I.14: Mécanisme du soudage par point.[27]

II.4.1.6 Le soudage par molette :

II.4.1.6.1 Définition :

Il existe de nombreuses variantes à cette technique de soudage tel que le soudage par molette qui est une variante du précédent, ici les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide.

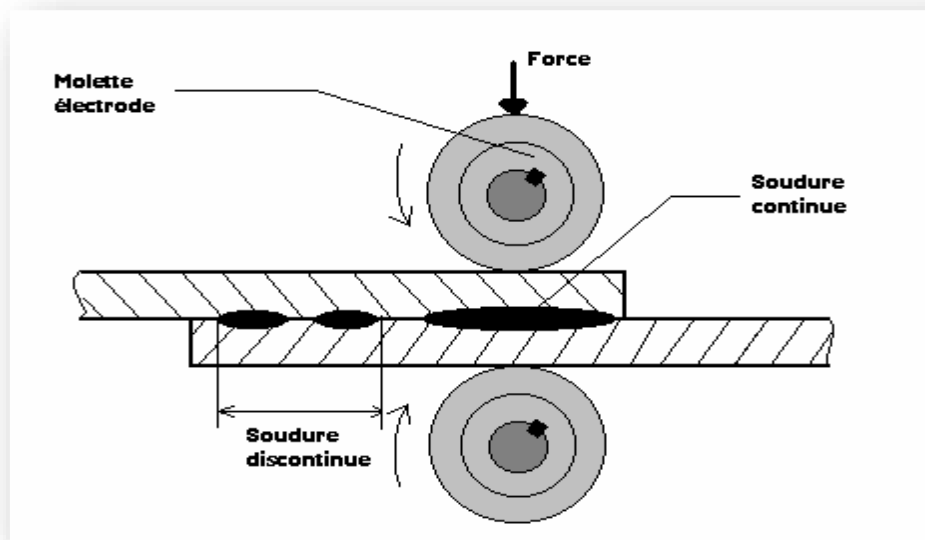


Figure I.15 : Principe du soudage par molette.[24]

II.4.1.6.2 Applications :

Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines : l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, nucléaire, électrique et électronique, les appareils ménagers, le mobilier métallique, les armatures en fils, le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, etc...[25]

II.4.1.7 Soudage oxygaz :

II.4.1.7.1 Définition :

Dans ce procédé, le soudage utilise la chaleur de combustion d'un gaz combustible (principalement acétylène ou propane) mélangé dans certaines proportions à un gaz comburant (O₂).

Le poste de soudage à la flamme comporte des bouteilles de gaz, des détendeurs, des tuyaux flexibles, chalumeau et l'électrode d'appoint introduite à la main.[23]

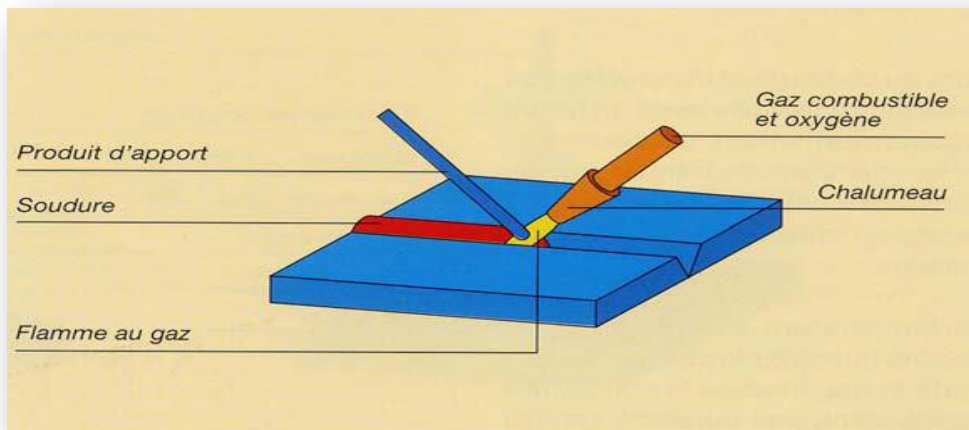


Figure I.16 :Principe du soudage oxygaz[24]

II.4.1.7.2 Application :

Travaux de réparation ou pour souder de la tôle légère.

II.4.2 Autres procédés :

II.4.2.1 Le soudage par faisceau d'électrons (soudage FE) :

apparaît en 1958 (**Figure I.17**). Il relève, avec le soudage laser, de la catégorie du soudage par faisceau à haute densité d'énergie. Grâce à l'utilisation de très hautes températures, il permet une pénétration étroite et profonde. Il présente néanmoins un inconvénient majeur : il faut en effet pouvoir disposer d'une chambre à vide pouvant contenir à la fois le canon à électrons et la pièce à souder. L'aéronautique et le nucléaire sont les premiers à le plébisciter.[23]

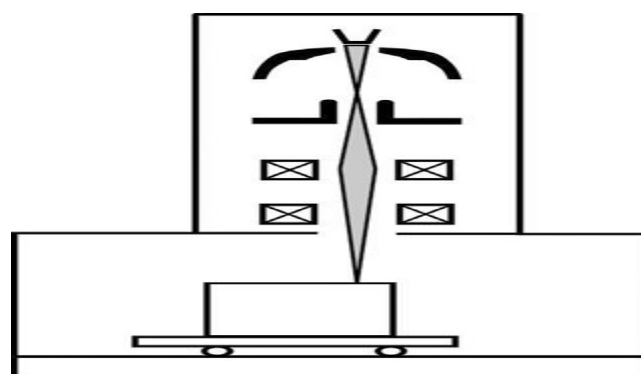


Figure I.17: principe du soudage par faisceau d'électrons[24]

II.4.2.2 Le soudage (et le coupage) laser :

ont des caractéristiques idéales à plus d'un titre (**Figure I.18**). Le faisceau laser permet une conduite plus concentrée de la chaleur, des déformations très faibles et de très grandes vitesses de soudage. Malheureusement, un laser puissant est encombrant et coûteux, et il faut trouver le moyen d'amener le

faisceau lumineux jusqu'au point de soudure. Pour y parvenir, un système de miroirs réfléchit le faisceau dans les lasers CO₂, et le rayon peut être transmis par fibre optique dans les lasers YAG, ce qui fait de ces derniers l'instrument idéal pour les robots soudeurs.[23]

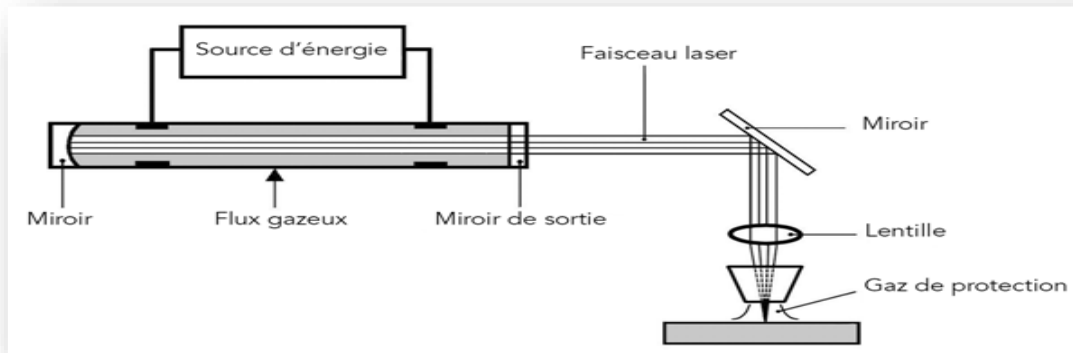


Figure I.18 : principe du soudage laser[24]

II.4.2.3 Le soudage par friction-malaxage :

a été breveté par TWI en 1992 (**Figure I.19**). Le procédé est parfaitement adapté à l'aluminium et donne un joint de bonne qualité sans fusion. Il n'exige pas de matériau d'apport, consomme peu d'énergie et a un faible impact environnemental. Sa simplicité et son efficacité en font l'une des plus brillantes innovations du XXe siècle dans le domaine du soudage.[23]

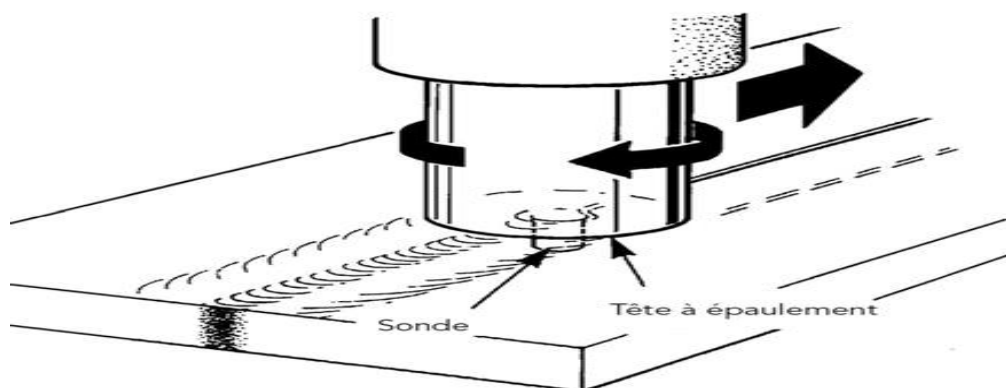
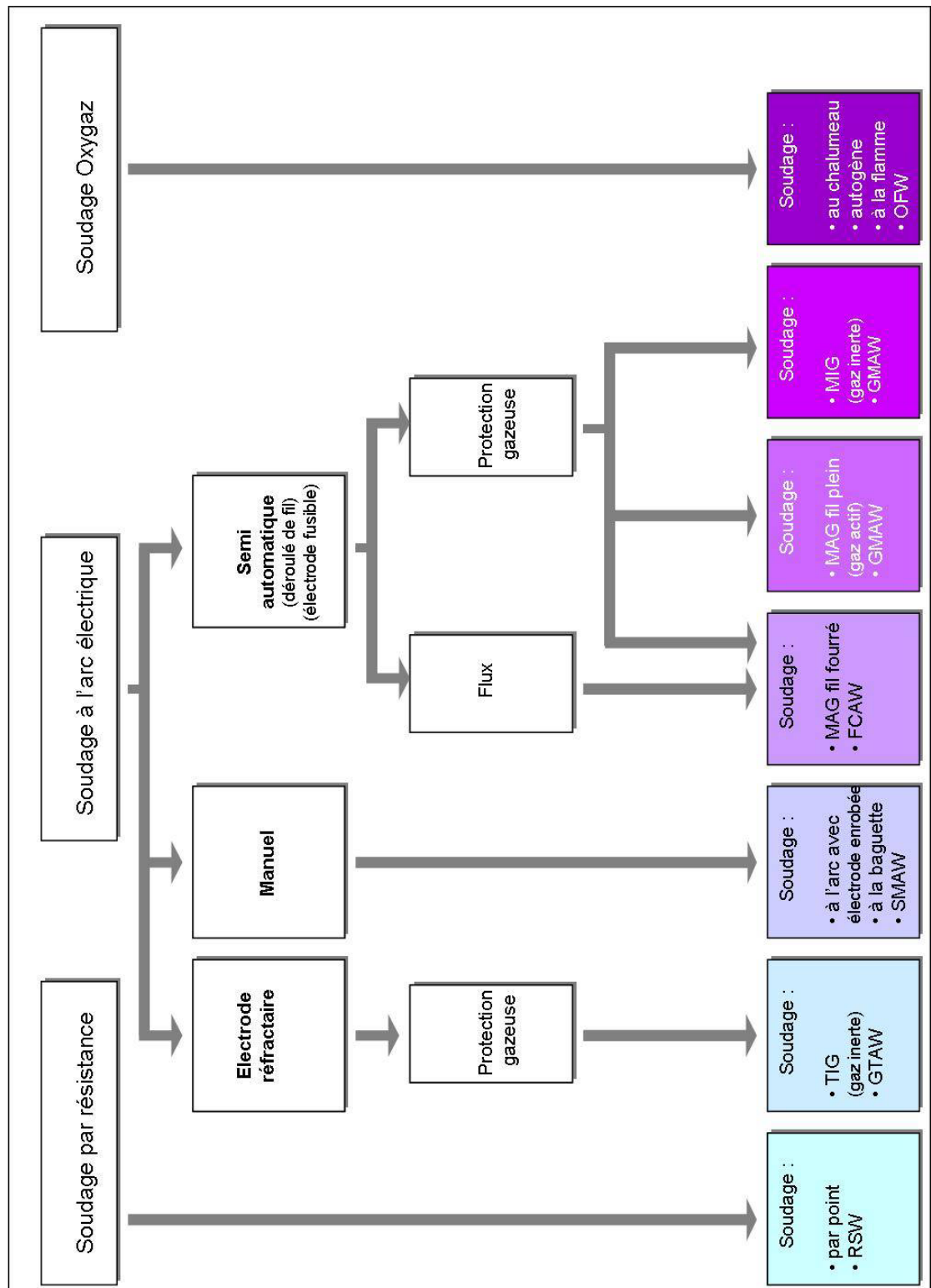


Figure I.19 : Soudage par friction-malaxage.[24]

Organigramme des procédés de soudage les plus répandus [23] :



II.5 Types des assemblages soudés:

La création d'une liaison métallique implique le rapprochement des surfaces à unir, ce qui permet de loger le métal d'apport entre eux et le soudage en pleine pénétration.

Il existe quatre principaux types d'assemblages différents, chacun ayant ses particularités qui répondent à différents besoins bien précis

II.5.1 Assemblage bout-à-bout :

La soudure bout-à-bout (**Figure I.20**) est la plus courante et la plus facile à utiliser, elle est composée de deux pièces plates ou de même section disposées de façon parallèle.

Elle assure une bonne continuité géométrique et un bon comportement aux différentes sollicitations. La préparation des bords (chanfreinage) est nécessaire pour les épaisseurs supérieures ou égales à 5 mm .[29]

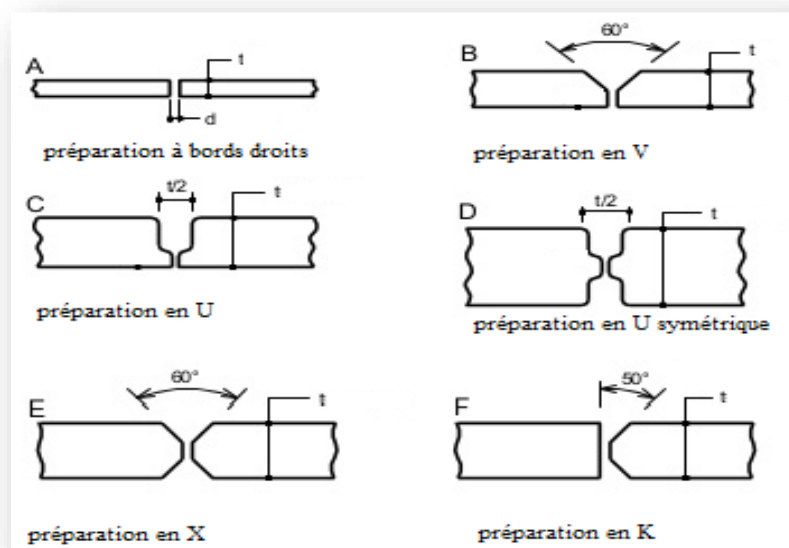


Figure I.20 :Préparation des bords en assemblage bout-à-bout.[30]

II.5.2 Assemblage en coin ou en angles :

Comme son nom l'indique, il est utilisé pour connecter deux pièces ensemble à un certain angle et le jeu entre eux doit être approprié pour éviter l'effondrement du bain de fusion.

Lorsque les deux pièces se croisent à un angle de 90° faisant en sorte que les bords se réunissent au centre d'une composante ou d'une plaque on parle d'un assemblage en T (**Figure I.21**).[29]

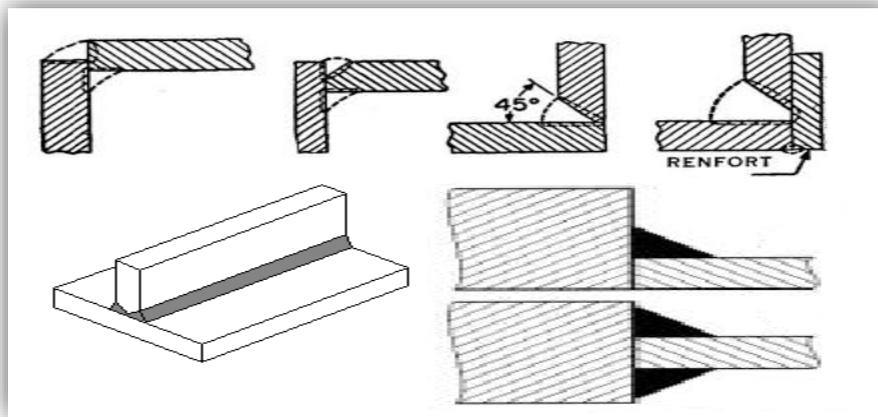


Figure I.21 :Assemblages en angles.

II.5.3 Assemblage à bords relevés :

Un type soudure à rainure, est fait de deux pièces placées côte à côte et soudés sur le même côté. Il s'agit du type de joint qui doit être remplacé le plus fréquemment en raison des résidus qui s'accumulent sur ses rebords. Il est souvent appliqué aux pièces de tôlerie qui ont des rebords incurvés ou formés de façon à ce qu'une soudure doive être faite pour réunir deux pièces adjacentes (**Figure I.22**).[29]

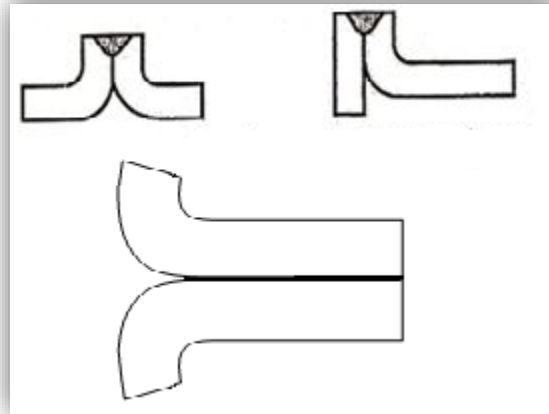


Figure I.22 : Assemblage à bords relevés.[29]

II.5.4 Assemblage par recouvrement :

Il se forme lorsque deux pièces sont placées une au-dessus de l'autre sur une certaine distance le long du bord (**Figure I.23**). Le soudage peut être fait sur une ou deux faces, en fonction du symbole de soudure ou des exigences du plan. C'est la méthode la plus utilisée pour joindre des pièces d'épaisseur différente.[29]

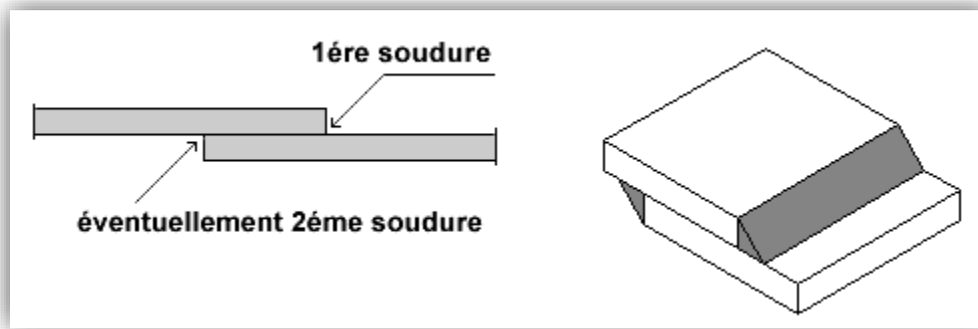


Figure I.23 : Assemblage à recouvrement[29]

III. La diffraction de rayon X :

III.1 Définition :

La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse chimique. Elle ne marche que sur la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés), mais pas sur la matière amorphe (liquides, polymères, verres). Par contre, elle permet de reconnaître des produits ayant la même composition chimique brute, mais une forme de cristallisation différente, par exemple de distinguer les différentes silices (qui ont toutes la même formule brute SiO_2 : quartz, cristobalite...), les différents aciers (acier ferritique, austénite...) ou les différentes alumines (qui ont toutes la même formule brute Al_2O_3 : corindon/alumine α , γ , δ , θ ...).[31]

III.2 Principes de la DRX :

La diffraction des rayons X sur monocristal permet d'étudier les structures cristallines. La diffraction sur poudres est principalement utilisée pour l'identification de phases.

C'est une méthode non destructive utilisée pour l'analyse qualitative et quantitative d'échantillons polycristallins. Cette technique est basée sur les interactions de la structure cristalline d'un échantillon avec des radiations de courte longueur d'onde.

Lorsque les rayons X entrent en contact avec la matière, plusieurs phénomènes peuvent se produire :

- L'absorption (transformation de l'énergie absorbée en chaleur par la vibration du réseau).
- La transmission, fraction de rayons X qui n'interagit pas avec l'échantillon (utilisée en imagerie).

- La fluorescence, émission d'un rayonnement X secondaire lors de l'excitation du matériau par le rayonnement X incident utilisé pour déterminer la composition chimique des matériaux.
- La diffusion, phénomène consistant en un changement de direction d'une particule ou en l'émission d'un photon à la suite d'une collision avec un électron d'une orbitale atomique. Cette diffusion peut impliquer ou non un changement d'énergie. S'il n'y a pas de changement d'énergie, on parle de diffusion élastique (ou diffusion Rayleigh). Dans le cas contraire on parlera de diffusion inélastique (ou diffusion Compton).

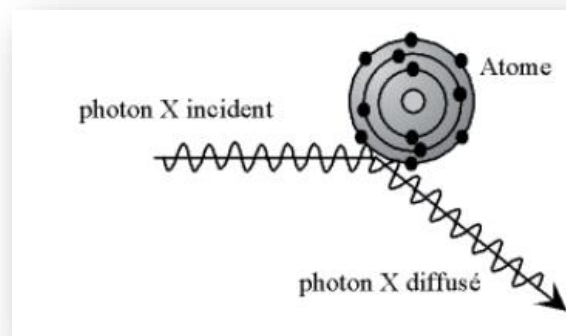


Figure I.24 : Diffusion élastique : les photons X rebondissent en gardant la même énergie

L'interaction rayons X – matière peut s'expliquer par les équations de Maxwell décrivant le couplage entre les champs électrique et magnétique de l'onde incidente et les charges des électrons et du noyau d'un atome. L'utilisation des rayons X pour l'étude de la matière présente plusieurs avantages, notamment, leurs longueurs d'onde sont du même ordre de grandeur que les distances interatomiques.

Lorsque les rayons X atteignent les plans réticulaires des réseaux cristallins, soit ils entrent en contact avec les nuages électroniques des atomes constituant ce plan, soit ils ne rencontrent pas d'obstacle et peuvent continuer jusqu'au plan suivant. Ces plans sont séparés par des distances caractéristiques qui dépendent de la nature du matériau analysé (distances réticulaires).

Les interférences des rayons vont être alternativement constructives ou destructives. Selon la direction de l'espace, le flux de photons sera plus ou moins important : ces variations selon les directions forment le phénomène de diffraction X.

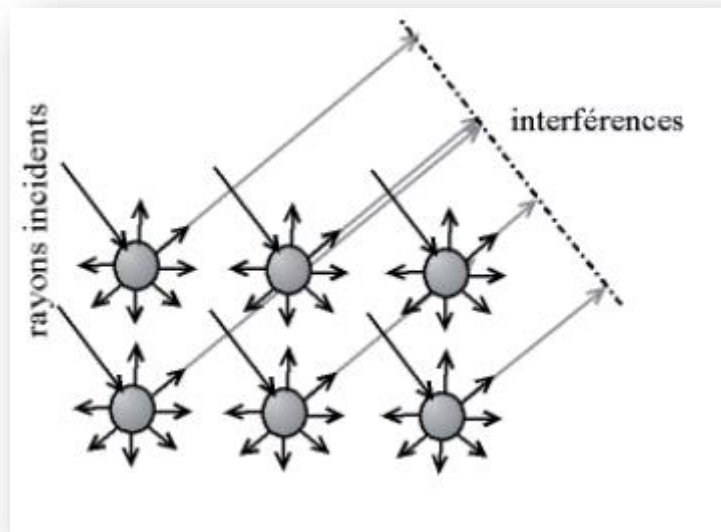


Figure I.25 : Interférences des ondes diffruées - phénomène de diffraction

Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées pics de diffraction, peuvent être déterminées par la loi de Bragg :

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

Où d est la distance interréticulaire, θ est l'angle d'incidence des rayons X, n est un entier et λ est la longueur d'onde des rayons X.

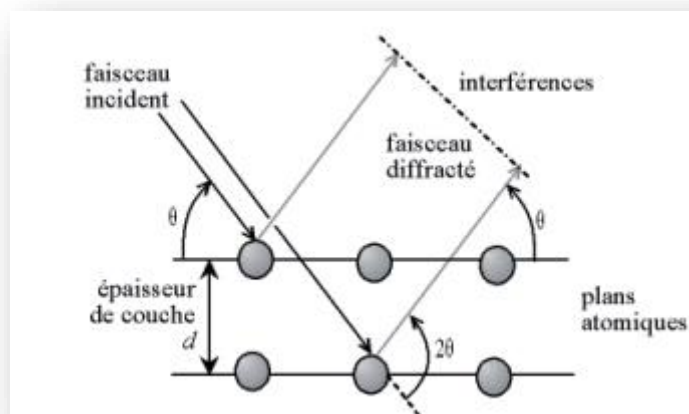


Figure I.26 : Loi de Bragg donnant les directions où les interférences sont constructives

Dans un même composé, plusieurs familles de plan peuvent être présentes. C'est pour cette raison qu'un balayage angulaire assez large est effectué. La variation de l'angle permet de déterminer les angles pour

lesquels n est entier dans l'équation de Bragg. L'angle étant ainsi connu et la longueur d'onde étant prédéterminée et constante, il est alors possible de déterminer la distance réticulaire.

L'intensité relative des pics de diffraction est calculée en divisant l'intensité absolue d'un pic par l'intensité absolue du pic le plus intense puis convertie en pourcentage. Les valeurs d'intensité absolue ne sont généralement pas utilisées car elles varient avec les paramètres instrumentaux et expérimentaux. L'aire sous les pics est proportionnelle au nombre d'atomes détectés correspondant au plan de ce pic et à la densité du nuage électronique de l'atome.

Le spectre de diffraction est spécifique et unique à une seule phase, même si des phases ont la même composition chimique. La position des pics ainsi que leurs intensités relatives sert à des comparaisons dans des bases de données menant ainsi à l'identification de la ou des phases présentes.

La première étape consiste à chercher des spectres compatibles dans des bases de données. Une comparaison est ensuite faite entre les résultats expérimentaux et le spectre de référence. La dernière étape consiste en l'identification des phases en acceptant ou non la comparaison.

La méthode de diffraction X sur poudre a été mise en place par P. Debye et P. Scherrer. Un faisceau monochromatique de rayons X est dirigé sur l'échantillon de poudre qui est composé d'un très grand nombre de petits monocristaux d'orientation aléatoire. En raison de leur grand nombre, il en existe toujours beaucoup pour lesquels une famille de plans réticulaires (hkl) respecte la relation de Bragg. L'intensité d'une raie (hkl) sera donc égale au nombre de cristaux en position de Bragg multiplié par l'intensité diffractée par un cristal élémentaire. Cette intensité est directement proportionnelle au facteur de structure F_{hkl} . Ce facteur est lié à la nature des atomes dans le plan et à leur position dans la maille cristalline. Pour plusieurs familles de plans, la diffraction permet d'obtenir un ensemble de cônes de diffraction dont le sommet est commun. L'ouverture du cône correspond à 2θ et l'axe est le faisceau incident. Il existe un cône pour chaque valeur de distance interréticulaire (d_{hkl}) et il est alors possible d'établir la liste des différents d_{hk} présents dans l'échantillon étudié. L'indexation de ces anneaux de diffraction est effectuée par un programme informatique permettant d'analyser ce spectre rapidement.

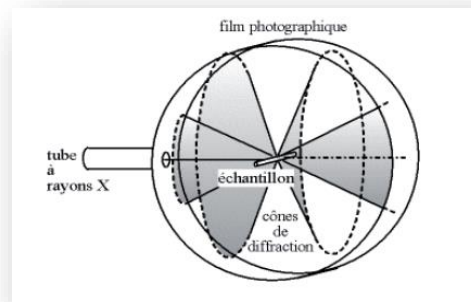


Figure I.27 : Cônes de diffraction et anneaux de Debye dans une chambre de Debye-Scherrer

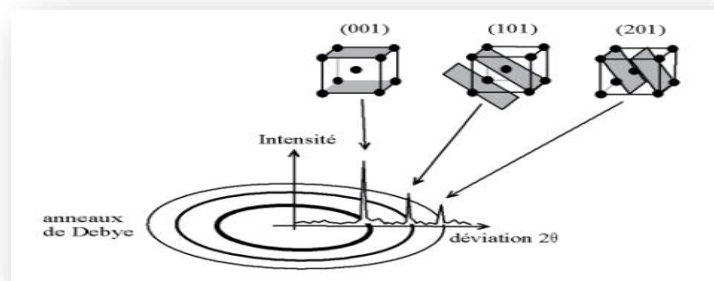


Figure I.28 : Indexation des pics : association d'un pic de diffraction et d'un plan (hkl)

Au fil du temps, différentes méthodes et différentes chambres ont été développées pour convenir à la diffraction sur poudre. Aujourd'hui, les diffractomètres automatiques sont généralement utilisés car l'usage en est plus simple. Différents montages sont disponibles, le plus commun étant le montage Bragg-Brentano :

- Type $\theta - \theta$, où le tube et le détecteur se déplacent simultanément selon un angle θ , l'échantillon restant fixe.
- Type $\theta - 2\theta$, où le tube reste fixe, l'échantillon et le détecteur se déplaçant respectivement d'un angle θ et d'un angle 2θ .

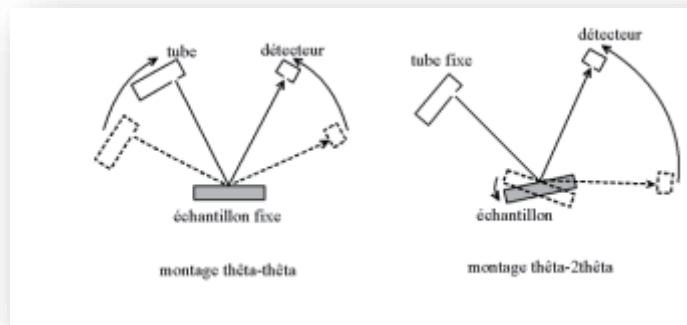


Figure I.29 : Modèles de fonctionnement des diffractomètres

La configuration standard d'un montage Bragg Brentano est la suivante :

- Un tube à rayons X (Cu, Co, Mo Mn suivant l'utilisation)
- Des fentes de Soller, des fentes de divergence et d'antidiffusion permettant de délimiter la divergence axiale ou verticale du faisceau de rayons X. Les fentes de divergence permettent de garder une surface irradiée constante à la surface de l'échantillon, alors que les fentes d'antidiffusion permettent de recevoir des intensités diffractées et de minimiser les radiations de diffusion.
- Un filtre ou un monochromateur qui permet d'éliminer le fond de fluorescence, le Bremsstrahlung, les raies $K\beta$ et de ne laisser passer que les raies $K\alpha$.
- Un détecteur

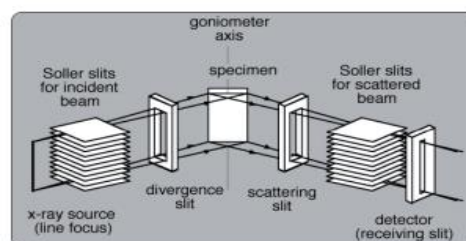


Figure I.30 : Modèles de fonctionnement du diffractomètre de Bragg Brentano

L'analyse de poudres polycristallines par diffraction des rayons X permet l'identification des différentes phases présentes dans l'échantillon et leurs quantifications respectives. D'autres informations peuvent aussi être déterminées par cette méthode, telles que les mesures de contrainte, de texture, de la taille des cristallites et la détermination de structure. Il est également possible de suivre la transformation de phases minéralogiques en fonction de la tempéra

ture, en installant un four et en employant un miroir de Göbel et des longues fentes de Soller (configuration faisceau parallèle).[32]

III.3 Production des rayons X pour la diffraction :

La production des rayons X se fait généralement suivant le même procédé que celui utilisé en imagerie médicale. Des électrons arrachés à un filament de tungstène chauffé électriquement sont accélérés sous l'effet d'un champ électrique intense (tension de 50 kV) pour bombarder une anode (ou anticathode) faite de matériaux différents selon les applications visées. Les rayons X sont émis par l'anode selon deux mécanismes détaillés .

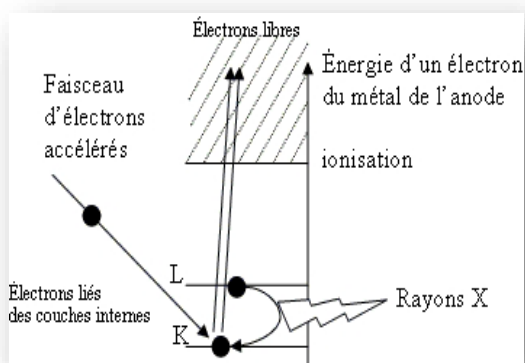


Figure I.31 : Transitions électroniques responsables

Figure I.32 Tube de Coolidge de la production de rayons X.

Les deux métaux couramment utilisés pour l'anode sont le cuivre, qui produit des rayons X de longueur d'onde $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ et le molybdène, $\lambda = 0,709 \text{ \AA}$

-Pour avoir une diffraction optimale, il faut utiliser un rayonnement de longueur d'onde du même ordre de grandeur que la taille du réseau, ici l'espace interatomique. C'est pourquoi les sources à base de molybdène sont adaptées à la résolution de structure sur monocristal de petites molécules. On utilise le cuivre dans le cas des macromolécules (comme une protéine) et pour les analyses de poudres car il permet une meilleure séparation des taches de diffraction.

-Une autre source de rayonnement X est le synchrotron. En effet toute particule chargée en mouvement émet un rayonnement électromagnétique continu (le rayonnement synchrotron) couvrant une large gamme de fréquence de l'ultraviolet lointain au rayon X. L'intensité du rayonnement synchrotron dépasse largement celle des autres sources. L'usage

d'un tel instrument est réservé aux cas les plus difficiles, pour mettre en évidence des détails très fins ou pour caractériser des cristaux aux dimensions très faibles (de l'ordre de la dizaine de micromètre).[33]

IV. Microscope Electronique à Balayage (MEB) :

IV.1 Définition :

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique permettant de visualiser la surface de structures massives, l'échantillon apparaissant en volume. Un microscope électronique à balayage utilise un faisceau d'électrons très fin qui balaie, point par point, la surface de l'échantillon à observer. Le principe du balayage consiste à parcourir la surface de l'échantillon par lignes successives et à transmettre le signal recueilli via un détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident.[34]

IV.2 Principe de la mesure, caractéristique principale :

L'échantillon à observer est balayé par un faisceau électronique, des électrons secondaires de très faible énergie sont produit. Ces électrons secondaires sont amplifiés, détectés puis interprétés pour reconstruire une image en fonction de l'intensité du courant électrique produit. Cette méthode réalise donc une topographie de l'échantillon à analyser, il fournit des images en noir et blanc où chaque nuance de gris est fonction de l'intensité du courant détecté.

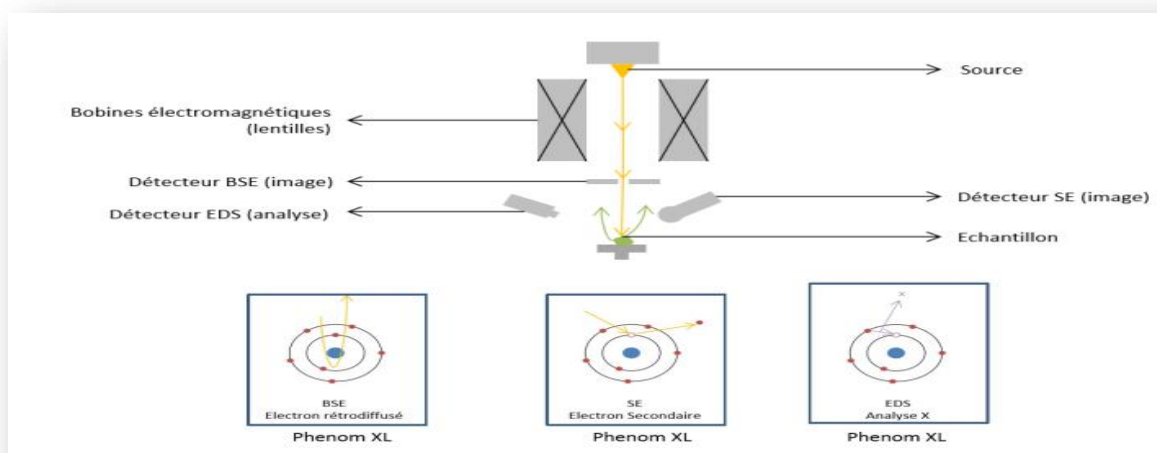


Figure I.33 : Principe de la mesure, caractéristique principale

La spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS) couplée au MEB permet la détermination de la composition chimique de la surface examinée.[35]

IV.2.1 Les électrons secondaires :

Les électrons secondaires sont créés par le passage d'un électron incident près d'un atome. L'électron incident peut transmettre une partie de son énergie à un électron peu lié de la bande de conduction provoquant ainsi une ionisation par éjection de ce dernier électron. L'énergie cinétique de ce dernier ne peut excéder 50 eV. Chaque électron incident peut créer plusieurs électrons secondaires.

De part leurs faibles énergies, seuls les électrons secondaires émis proche de la surface (< 10 nm) peuvent s'échapper de l'échantillon et être recueillis par le détecteur. La moindre variation topographique va modifier la quantité d'électrons secondaires collectés. [36]

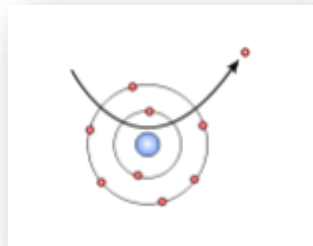


Figure I.34 : Électron secondaire

IV.2.2 Les électrons rétrodiffusés :

Les électrons rétrodiffusés sont causés par la collision entre un électron incident et un atome de l'échantillon. Ce sont des électrons primaires qui ont réagi de façon élastique avec des noyaux d'atomes de l'échantillon. Ils sont dispersés dans toutes les directions avec une faible perte d'énergie.

Du fait de leur forte énergie, les électrons rétrodiffusés récupérés peuvent provenir d'une plus grande profondeur que celle des électrons secondaires. Ils ont une sensibilité topographique nettement inférieure.

Du fait de leur origine, la quantité d'électrons rétrodiffusés croît avec le numéro atomique des atomes constitutifs de la cible. [36]

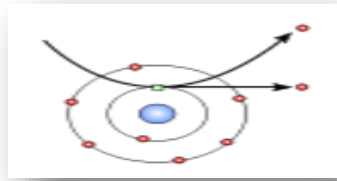


Figure I.35 : Électron rétrodiffusé

IV.2.3 Les Rayons X (ou photons X) :

L'émission d'un photon X permet à un atome ionisé sous l'impact du faisceau d'électrons, de revenir à l'état fondamental. Quand un électron d'une couche interne d'un atome a été éjecté, un électron d'une couche plus externe va combler la lacune. La différence d'énergies entre ces deux couches va provoquer l'émission d'un photon X.

Les photons X possèdent une énergie caractéristique propre à chaque élément qui les a émis. Ces photons sont recueillis et classés suivant leurs

Figure I.35 : Rayon Xénergies (EDS) ou leurs longueurs d'onde (WDS) pour donner des informations sur la composition de l'échantillon. Ils sont très pénétrants et sont émis d'une poire d'interaction de l'ordre du micron cube.[36]

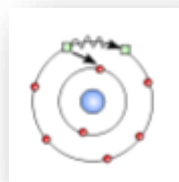


Figure I.36: Rayon X

IV.2.4 Électrons Auger :

Lorsqu'un atome est bombardé par un électron primaire, un électron d'une couche profonde peut être éjecté et l'atome entre dans un état excité. La désexcitation peut se produire de deux façons différentes : en émettant un photon X (transition radiative) ou en émettant un électron Auger (effet Auger). Lors de la désexcitation, un électron d'une couche supérieure vient combler la lacune créée par l'électron initialement

éjecté. Durant cette transition, l'électron périphérique perd une certaine quantité d'énergie qui peut être émise sous forme de photon X ou peut alors être transmise à un électron d'une orbite plus externe et donc moins énergétique. Cet électron périphérique se retrouve à son tour éjecté et peut être récupéré par un détecteur.

Les électrons Auger possèdent une très faible énergie et sont caractéristiques de l'atome qui les a émis. Ils permettent ainsi d'obtenir des informations sur la composition de l'échantillon et plus particulièrement de la surface de l'échantillon ainsi que sur le type de liaison chimique.[36]

IV.3 Fonctionnement:

IV.3.1 Le canon à électrons :

Le canon sert à produire les électrons primaires. Comme dans la majorité des cas le microscope XL 30 utilise une triode thermoélectronique.

La cathode est un filament de tungstène en forme de V. Il est chauffé à environ 2700°K et il a une durée de vie de 40 à 120 heures. Le filament est entouré d'un cylindre : le wehnelt et en dessous se trouve l'anode percée comme le wehnelt d'une ouverture pour laisser passer le faisceau électronique. L'anode est à la masse, le filament est à une haute tension (pour le XL 30 entre 1 KV et 30 KV) ; le potentiel du wehnelt diffère de celui du filament de quelques centaines de volts. Il sert à régler l'intensité du faisceau électronique et il ramène les électrons émis sur l'axe optique formant le "cross-over" qui joue le rôle de source virtuelle d'électrons. Les électrons sont ensuite accélérés vers l'anode.[36]

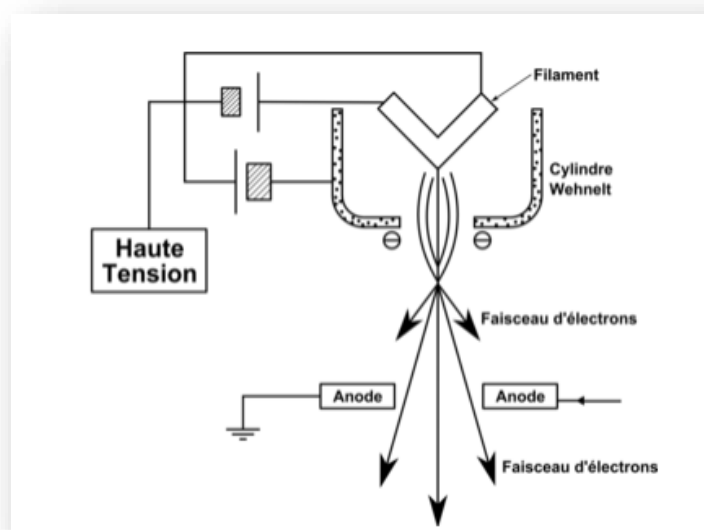


Figure I.37 : Schéma d'un canon à électrons

IV.3.2 La colonne électronique :

La colonne électronique est essentiellement constituée de trois lentilles électromagnétiques. Ces lentilles sont destinées à focaliser le faisceau primaire en un spot ponctuel. Les meilleures performances sont obtenues lorsqu'on peut focaliser un courant intense dans une tache aussi petite que possible. Les paramètres importants sont la brillance du faisceau (qui dépend du canon) et les propriétés optiques de la dernière lentille focalisante (l'objectif).

Dans la colonne électronique se trouvent aussi les bobines de déflexion qui permettent le balayage de l'échantillon par le faisceau. [36]

IV.3.3 Le détecteur d'électrons secondaires :

La détection des électrons secondaires s'effectue grâce à un détecteur dont on doit le principe à Everhart et Thornley (1960). Ce détecteur utilise un des meilleurs systèmes d'amplification de courant : le photomultiplicateur.

Les électrons secondaires sont attirés par le collecteur (+ 300V) et sont ensuite accélérés vers le scintillateur (10 kV) qui absorbe les électrons et émet des photons. Ceux-ci arrivent dans le photomultiplicateur à travers un guide de lumière. Dans le photomultiplicateur, les photons sont convertis en électrons qui vont très vite se multiplier grâce à une succession de dynodes.

Le gain de ce détecteur est de l'ordre de 10^6 . [36]

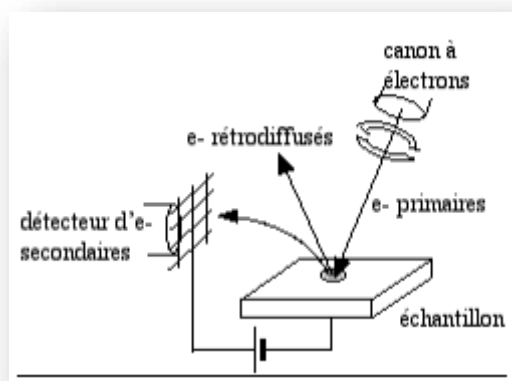


Figure I.38: Détecteur d'électrons secondaires

IV.3.4 Le détecteur d'électrons rétrodiffusés :

Le détecteur d'électrons rétrodiffusés est constitué de diodes silicium. Il comporte deux secteurs sensibles de même surface ($A=B$). Cela permet 2 modes de fonctionnement : $A+B$: mode composition

Les images obtenues d'un échantillon poli mettent en évidence les phases qui le constituent.

A-B : mode topographique

Les signaux provenant de la composition s'annulent et il reste ceux venant de la topographie qui s'ajoutent.

[36]

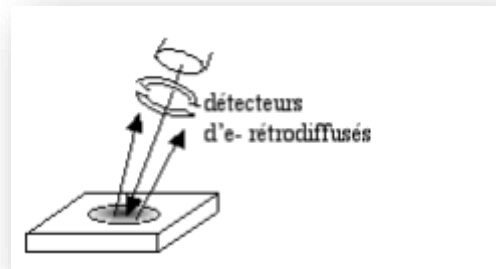


Figure I.39: Détecteur d'électrons rétrodiffusés

IV.3.5 Le détecteur de rayons X (EDS) :

Le détecteur de rayons X est un détecteur en énergie. Il s'agit d'une diode silicium dopé au lithium.

Chaque photon qui arrive dans la diode va provoquer en sortie une impulsion de tension proportionnelle à l'énergie de ce photon X.

Le spectre X obtenu est un histogramme du nombre des impulsions en fonction de leur hauteur (c'est-à-dire de l'énergie des photons X). [36]

IV.3.6 La formation de l'image :

Dans un microscope électronique à balayage, l'image est obtenue séquentiellement point par point en déplaçant le faisceau d'électrons primaires sur la surface de l'échantillon. L'image est alors reconstruite en utilisant le signal généré par les différents détecteurs pour moduler la brillance d'un tube cathodique.

Le rapport entre le format de l'écran et celui de la zone balayée sur l'échantillon détermine le grandissement.

Le microscope électronique à balayage (MEB) est un appareil d'analyses, pouvant fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide. [36]

V. Essais de dureté :

V.1 Généralités et définition :

Les essais de dureté sont d'une grande utilité pour les métallurgistes à cause de leur simplicité et de leur caractère peu destructif mais il faut bien noter n'est pas une propriété simple des matériaux métallique. La dureté caractérise la résistance à la déformation et les valeurs obtenues permettent certains classements. Cependant, le processus opératoire doit être précis pour assurer la reproductivité et la fidélité des résultats. C'est ce qui explique le grand nombre de normes dans ces domaines, pour les essais proprement dits, les machines d'essais et les étalons.[37]

V.2 Machine d'essai :

Les machines d'essais de dureté universelles actuelles utilisent une technologie novatrice pour des essais de haute précision dans un large domaine d'application, et plus particulièrement pour l'assurance qualité, les essais sur chaînes de production et essai en laboratoire.

L'utilisation simple permet une prise en main très rapide de la machine d'essai de dureté. Les déroulements d'essai-configurable individuellement, peuvent être aisément chargés ou sauvegardés. Une analyse, automatique, complètement intégrée de l'image pour une précision élevée et fiabilité de la mesure de pénétration et de plus proposée en option.[37]

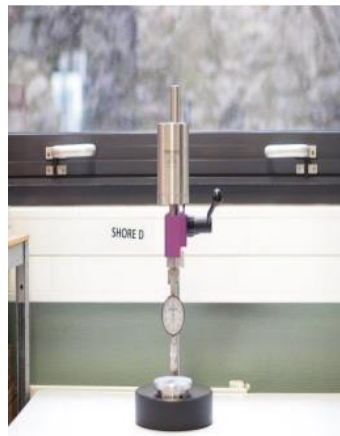


Figure I.40 : machine de dureté shore D.[37]

V.3 Domaines de la dureté :

La détermination des propriétés mécaniques des couches minces et de la surface des matériaux est souvent délicate. Les raisons principales en sont les hétérogénéités de la matière.

L'essai de dureté consiste à mesurer l'effet occasionné par le contact, sous une pression donnée, d'un matériau de géométrie définie (indenteur) et de la surface d'un échantillon. De nouvelles techniques ont élargi le champ d'application de l'essai de dureté. Ainsi les

fabricants proposent maintenant des appareils permettant de mesurer quelques caractéristiques supplémentaires (module Young, module de Coulomb, coefficient de Poisson, viscosité, forces d'adhésion (entre la pointe et le substrat) ou encore ténacité et énergie de rupture, etc.) à partir de l'enregistrement de la courbe force-déplacement.

Plusieurs domaines de dureté peuvent être définis en fonction de la charge appliquée Bückle a introduit en 1965 la notion de la macrodureté pour des charges supérieures à 3÷5 kgf et celle de microdureté pour des charges inférieures à 100÷200 gf. Le domaine intermédiaire étant celui de la dureté sous charge réduite. Dans les années 80, est apparu le domaine de nanodureté qui correspond à des charges appliquées inférieures à 1gf.[38]

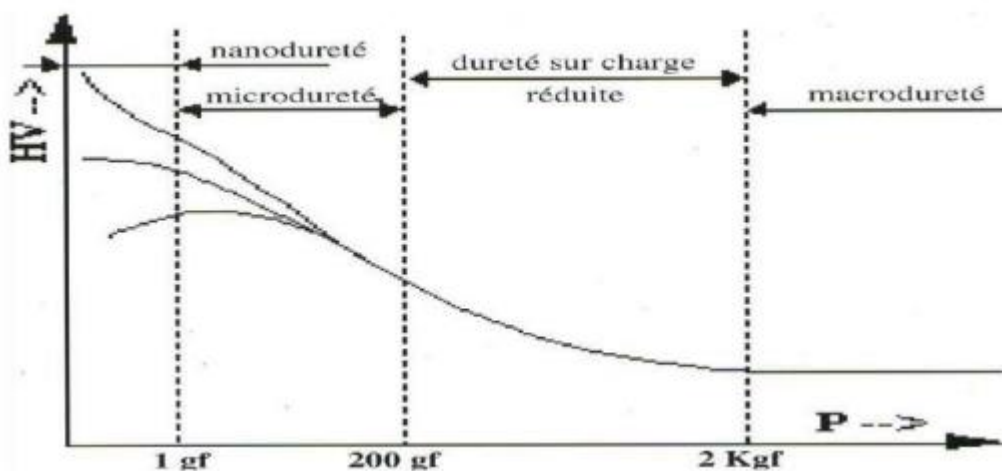


Figure I.41 : Définitions des différents domaines de dureté

V.4 Essai de dureté Brinell (HB):

Johan August BRINELL (1849–1925), ingénieur métallurgiste suédois, travaillait sur la transformation des aciers en fonction de la température. Il avait besoin d'un test rapide non destructif pour déterminer la dureté des différents aciers testés. Il met au point son test de dureté BRINELL basé sur un indenteur bille, pour alliages métalliques peu durs. 10 L'essai consiste à imprimer dans la pièce une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D sous une charge F et à mesurer le diamètre d de l'empreinte.

Dureté Brinell

Les formules permettant d'obtenir une valeur sur l'échelle de Brinell sont les suivantes :

$HB \cong 0,0649 \cdot \frac{F}{D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	<p>HB = Dureté Brinell. F = Force appliquée [N] D = Diamètre de la bille. [mm] d = Diamètre de l'empreinte laissée par la bille. [mm]</p>
$HB = \frac{2 \cdot F}{g \cdot \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	<p>HB = Dureté Brinell. F = Force appliquée [N] D = Diamètre de la bille. [mm] d = Diamètre de l'empreinte laissée par la bille. [mm] g = <u>Accélération terrestre</u>. [$m \cdot s^{-2}$] (9,80665)</p>

V.4.1 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.[38]

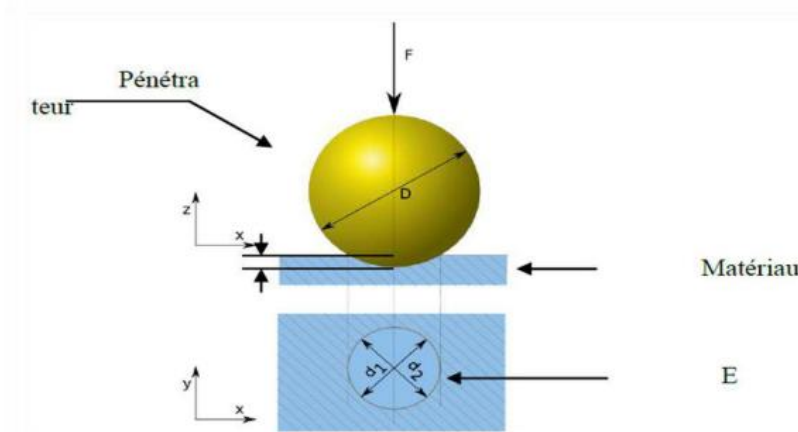


Figure I.42: Principe de dureté brinell

La force F étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte d'en mm et la dureté Brinell HB est exprimée en kgf /mm² selon la relation suivante.

F = Force appliquée [N]

D = Diamètre de la bille. [mm]

d = Diamètre de l'empreinte laissée par la bille. [mm]

V.5 Essai de Dureté Vickers (HV) :

SMITH et SANDLAND, ingénieurs chez VICKERS Ltd GB ont besoin de tester des matériaux trop durs pour le test BRINELL. En 1925, ils conçoivent une pyramide diamant. Cette pyramide de diamant à base carrée a un angle au sommet de 136° . Après l'indentation, on mesure la moyenne des diagonales d_1 et d_2 de l'empreinte en microscopie optique.[38]

$$\text{Dureté Vickers HV} = 0,189 \cdot F/d^2$$

HV = Dureté Vickers

F = Force appliquée [N]

d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]

L'essai VICKERS est adapté pour les alliages durs et les céramiques.

V.5.1 Principe :

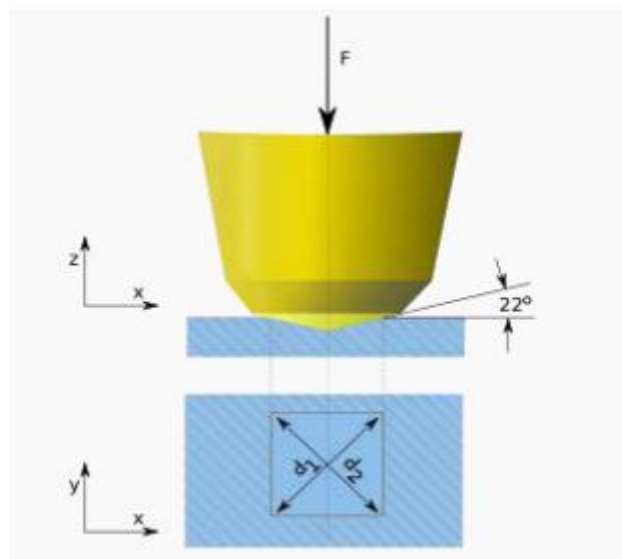


Figure I.43: Principe de Dureté Vickers (HV)

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées. [38]

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2}$$

HV = Dureté Vickers.
 F = Force appliquée [N]
 d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]
 g = Accélération terrestre. [m·s⁻²] (9,80665)

Le degré de dureté, noté Hv, est ensuite lu sur un abaque (une table) ; il y a un abaque par force d'appui.

Essai de dureté Rockwell (HR) :

Stanley ROCKWELL travaille comme métallurgiste dans une usine de roulements à billes. Il vérifie les traitements thermiques par des tests de dureté. L'essai BRINNEL donne une indentation trop grosse. L'essai VICKERS est trop long. En 1922, ROCKWELL conçoit un nouveau système avec différents pénétrateurs, adapté aux métaux et aux plastiques avec une large gamme de matériaux testés. [38]

V.6 Pénétrateur :

-soit bille en acier de diamètre 1,59 mm = Rockwell b pour les matériaux mous comme les alliages de cuivre.

-soit cône en diamant d'angle au sommet 120° et dont l'extrémité est une calotte sphérique de rayon 0,1mm = Rockwell c, pour les matériaux plus durs comme l'acier.

-Précharge F_0 faible de 10 daN = niveau de référence

-Surcharge F_1 de 60 à 150 daN

-Charge $F_2 = F_0$ à nouveau de 10 daN

On mesure la profondeur de l'empreinte = différence des 2 positions

V.6.1 Principe :

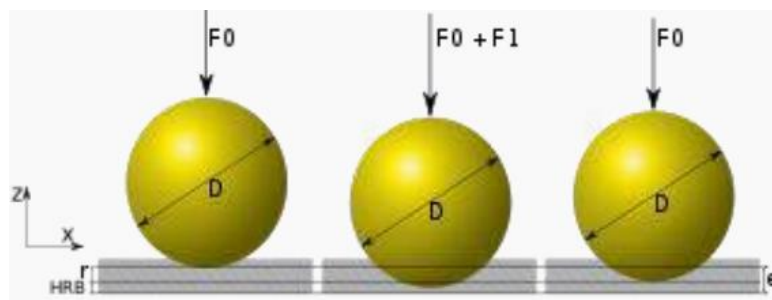


Figure I.44: Principe de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier)

Les essais de dureté Rockwell sont des essais de pénétration. Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant ou d'une bille en acier trempé polie.

Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge.

V.7 L'essai se déroule en trois phases :

- application sur le pénétrateur d'une charge initiale $F_0 = 98 \text{ N}$ (soit 10 kgf). Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale I . Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesurer la dureté Rockwell.
- application d'une force supplémentaire F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de P .
- relâchement de la force F_1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

La valeur de r étant l'enfoncement rémanent obtenu en appliquant puis en relâchant la force F_1

La valeur de dureté est alors donnée par la formule suivante :

- Échelle **B**, **E** et **F**. [38]

$$HRB = 130 - r$$

Échelle C

$$HRC = 100 - r$$

Une unité de dureté Rockwell correspondant à une pénétration de 0,002 mm . [38]

VI. Le microscope optique :

VI.1 Introduction :

Le microscope est un instrument de base de caractérisation optique qui permet l'observation visuelle de petits objets ou détail d'objets proches de l'observateur, usuellement indiscernables à l'œil nu. Ainsi, à l'instar de la loupe, une des propriétés principales de cet appareil est son grossissement, c'est-à-dire son aptitude à fournir une image grossie angulairement de l'objet étudié. Cependant, ce paramètre ne suffit pas à lui seul à caractériser les performances du dispositif. Il faut en effet que cette propriété s'applique à tous les détails de l'objet, y compris les plus fins. La seconde propriété clé du microscope est donc son pouvoir de séparation,

qui implique de travailler avec des optiques de grandes ouvertures numériques limitées par la diffraction. Les bons microscopes sont donc obligatoirement des systèmes optiques et mécaniques complexes de haute qualité, relativement fragiles et de prix élevé. Bien que la microscopie optique soit une science ancienne (XVI^{ème} siècle), elle n'en demeure pas moins une technologie de pointe toujours active. Vous retrouverez incorporé dans beaucoup d'outils de caractérisation (profil mètre, microscope à force atomique, masqueur-aligneur, testeur sous pointes,...) un système de microscopie optique permettant le positionnement des échantillons à analyser. Le plus souvent le microscope associé à ces outils dispose d'une visualisation sur moniteur.[37]

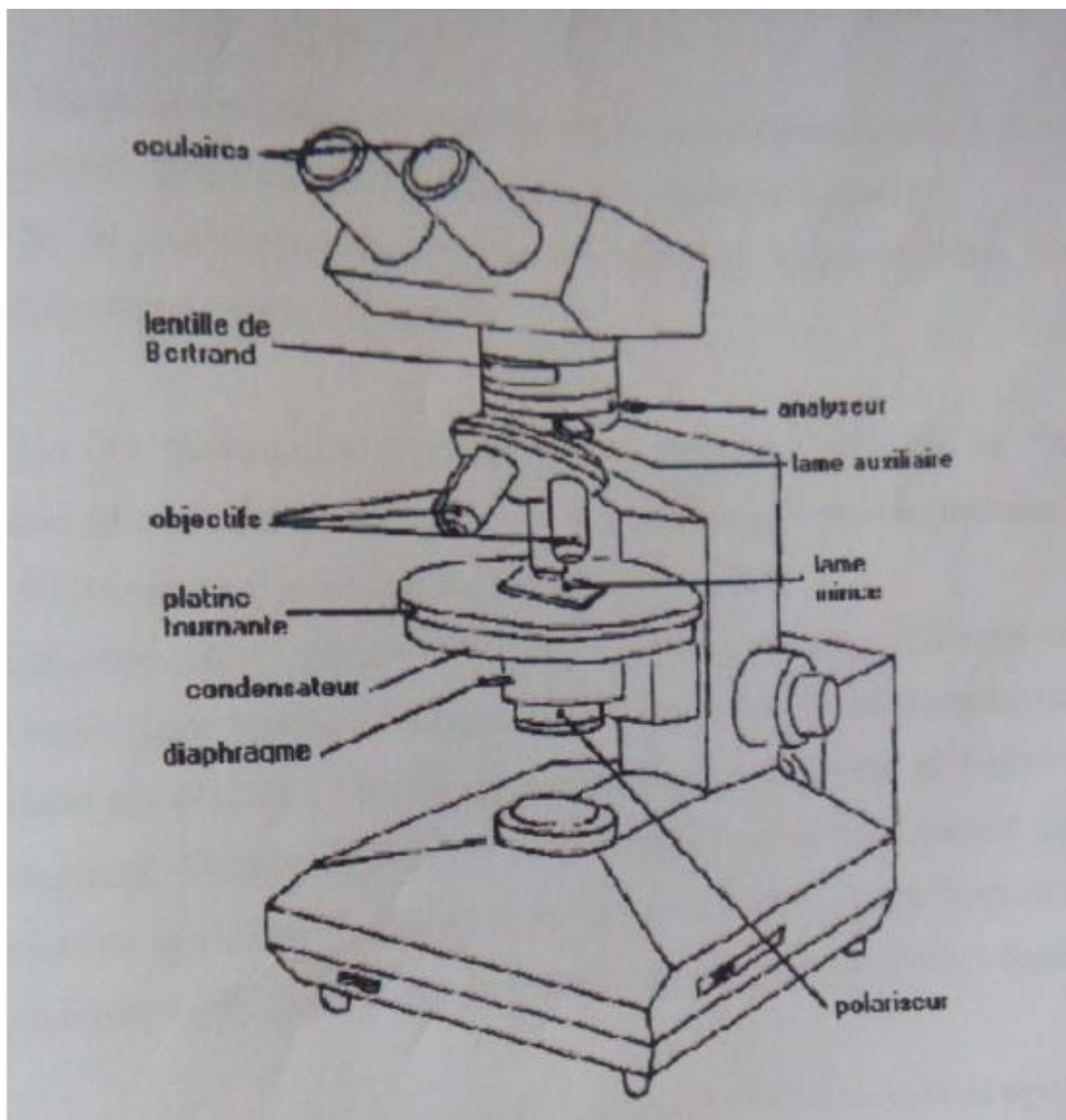


Figure 45: Schéma général d'un microscope optique.

VI.2 Éclairage :

Une observation de qualité d'un objet ne peut se concevoir que si celui-ci est bien éclairé. Les propriétés d'un bon éclairage en microscopie sont les suivantes :

- Uniformité de l'éclairement (pour voir l'objet et non les défauts de l'éclairage)
- Limitation de la zone éclairée au champ vu dans le microscope (pour limiter la lumière parasite)
- Contrôle de l'ouverture numérique (ou autrement dite de la cohérence partielle) de l'éclairage
- Contrôle souple de la luminosité de l'éclairage (confort de l'utilisation)
- Contrôle de la température de couleur de l'éclairage (reproductibilité des couleurs, important de photographie couleur).

On distingue les microscopes à réflexion (la lumière est réfléchiée par l'objet) et les microscopes à transmission (la lumière traverse l'objet). Pour tous les microscopes, le dispositif le plus courant d'éclairage est le condenseur de Köhler.[37]

VI.3 Grandissement-Grossissement :

Il convient de rappeler comment on distingue le grandissement du grossissement.

- Le grandissement est le rapport de la hauteur de l'image, non accessible car sur la rétine, sur la hauteur de l'objet (utilisé pour caractériser l'objectif de microscope).
- Le grossissement est le rapport de l'angle sous lequel on observe l'image virtuelle de l'objet à travers le microscope sur l'angle sous lequel on observait l'objet s'il n'y avait pas d'optique (utilisé pour caractériser l'oculaire).[37]

VI.4 Limite de résolution :

La nature ondulatoire de la lumière relie cette dernière propriété à l'ouverture numérique (O.N.) de l'objectif. Pour un objectif limité par la diffraction (et non par ces défauts ou aberration), la limite de résolution est de l'ordre de (λ / a) ou λ est la longueur d'onde de travail est a son O.N. on utilise donc en microscopies des objectifs de très forte O.N limité par la diffraction. De tels objectifs, qui nécessitent de nombreuses lentilles très précisément positionnées les unes par rapport aux autres, sont relativement fragiles et coûteux. Par ailleurs, pour obtenir les résolutions les plus élevées, il est intéressant de travailler dans un objet d'indice supérieur à 1.[37]

VI.5 Les objectifs de microscopes :

L'ouverture numérique (ON, NA) est une caractéristique essentielle d'un objet, $ON = n \sin \alpha$ ou n est l'indice de milieu, le plus souvent il s'agit de l'indice de l'air. C'est elle qui est directement responsable de la luminosité et de la résolution d'un objectif. Elle dépend directement de l'indice de réfraction du milieu et de l'angle formé par trois points particuliers sont : le centre de la lentille. Deux autres caractéristiques de l'objectif dépendent de l'ouverture numérique : ce sont la distance de travail et la profondeur de champ.[37]

VI.6 Les oculaires :

L'oculaire permet de définir le champ d'observation. Il est caractérisé par son grossissement et son indice de champs qui correspond au diamètre de la zone circulaire observable (de 12 à 25 mm pour les oculaires dits à grand champ).

Le diamètre observé dans l'oculaire est alors égal à l'indice/Gobi (mm).

Exemple : microscope avec un objectif 63x/1.4 et un oculaire 10x/25

Le grossissement est donc égal à 630. Pour un oculaire grand champ, le diamètre observé est alors égal à $(25/63)=0.397$ mm ou $397\mu\text{m}$. [37]

Chapitre II

Techniques expérimentales

I. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les différentes méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation de cordon de soudure de l'acier X70, une préparation des échantillons et mise en œuvre des différents procédés d'analyse mécanique (traitement thermique, dureté , microscope optique, diffraction des rayons X et microscope électronique à balayage), afin de contribuer à une caractérisation du cordon de soudure de l'acier X70, l'opération de soudage a été réalisée au niveau de DML SONATRACH de Laghouat.

II. Présentation de l'entreprise :

(DML) Direction de la Maintenance de Laghouat, qui est une filiale de la société nationale Sonatrach, spécialisée dans :

Maintenance préventive et corrective des machines tournantes principales de TRC ainsi que les pipelines (Turbines à gaz, Moteurs électriques, Pompes, Compresseurs, Alternateurs,...) et de leurs accessoires.

- Rénovation de sous-ensembles et réparation d'éléments nobles de machines tournantes (Rotors, Directrices, Corps de pompes...).
- Réalisation et/ou suivi des actions de maintenance améliorative des machines (Rétrofits de contrôle-commande, Amélioration matériaux ou conception ...).
- Contrôle et étalonnage des soupapes de sûreté.
- Étude et réalisation des piquages en charge et des opérations Stopple sur les canalisations et ouvrages concentrés.
- Analyse des défaillances.

III. Matériau utilisé :

Le matériau utilisé dans notre étude est le cordon de soudure de l'acier X70 dont sa longueur est de 70 cm et son épaisseur est 1.8 cm. Ce matériau est largement utilisé dans l'industrie du transport et stockage du pétrole et du gaz ainsi que dans l'industrie automobile et autres telles que la construction navale et ferroviaire.



Figure II.1 : présentation du cordon de soudure de l'acier X70.

Le matériau utilisé dont la composition chimique est donnée dans le tableau suivant :

Élément	C	Si	Mn	P	S
Pourcentage massique (%)	0.093	0.18	1.53	0.024	0.004

Tableau II.1 : composition chimique de l'acier X70 (API)

IV. Préparation des échantillons :

IV.1 Découpage grossier de la plaque pour échantillons:

L'opération de découpage de la plaque, soudée en deux parties dont le cordon de soudure est situé au milieu, a été réalisée en plusieurs étapes, à fin de préparer une série d'éprouvettes localisées surtout dans la partie du cordon de soudure, dans le but de procéder aux différentes phases de la mise en œuvre des techniques expérimentales.

- Première étape :

L'ensemble des éprouvettes à étudier doivent être tirées uniquement du cordon de soudure. Dans cette perspective, une opération de découpage a été réalisé à l'atelier de mécanique de l'université de LAGHOUAT (département de mécanique), afin de séparer le cordon de soudure du reste de la plaque (métal de base et zone thermiquement affectée). L'exécution de cette opération a été réalisé avec soient, en utilisant une tronçonneuse électrique dotée d'un moyen de refroidissement du disque de découpage, à l'eau afin d'éviter le sur-échauffement du cordon de

soudure, dont le but de ne pas créer de changement de microstructure les propriétés mécaniques de ce dernier.



Figure II.2 : figure représente le découpage d'échantillon X70

- Deuxième étape :

Vue la section du cordon de soudure de notre acier est d'environ ($3 \times 1.8 \text{ cm}^2$), une série d'éprouvettes (11 échantillons) ont été tirées à partir du cordon de soudure par une opération de cisaillement au niveau de la société BATIMETAL (LAGHOUAT), en utilisant une guillotine hydraulique. Cette opération sera suivie par l'abrasion des zones déformées mécaniquement par le découpage afin de ne laisser que les zones non affectées par la déformation.

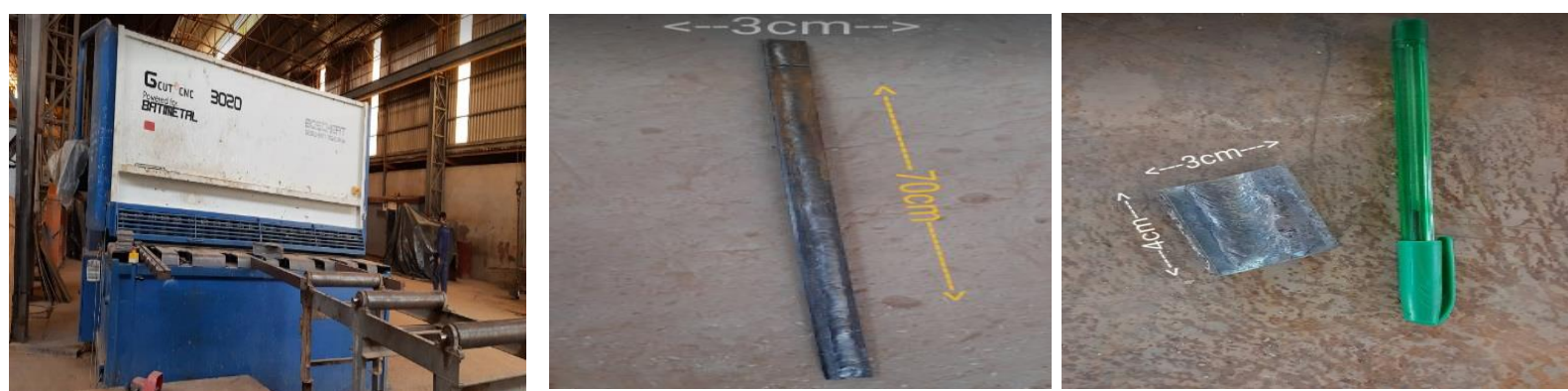


Figure II.3: La figure représente des échantillons obtenus par ciseaux hydraulique à plaques métallique BATIMITALES.

IV.2 Traitements thermiques :

L'analyse de la morphologie et la microstructure du cordon de soudure de l'acier X70 sera exécuté après réalisation des traitements thermiques sur l'ensemble des éprouvettes tirés à partir uniquement du cordon de soudure. Dans notre étude on va appliquer deux différents protocoles de traitement thermique: le premier protocole consiste à fixer la température du traitement thermique à 600 °C et on fait varier le temps de maintien (1h, 2h, 3h, 4h, 5h) ; alors que pour le deuxième protocole on change la température de traitement thermique (450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C) tout en fixant le temps de maintien (2h). Ces deux protocoles sont réalisés, dans le laboratoire des sciences de matériaux de l'université de LAGHOUAT (département de mécanique), en utilisant un four qui peut atteindre 1100 °C avec une stabilité au tour de la consigne de température de ± 5 °C.



Figure II.4 : four utiliser pour le traitement thermique (laboratoire de mécanique).

Dans le but de ne pas subir aux éprouvettes de trempe à l'air, lors du refroidissement et d'avoir une stabilité thermodynamique au matériau, les échantillons sont mis dans un récipient qui contient une poudre de plâtre, dont la conductivité thermique est très faible afin d'avoir un refroidissement très long les échantillons.

IV.3 Découpage de finition des éprouvettes :

Cette opération consiste à avoir des éprouvettes dont la cotation est exigée par le MEB et la DRX. Le découpage des bordures des éprouvettes est réalisé minutieusement par une opération de meulage par meule électrique, tout en évitant le moindre échauffement des éprouvettes et ceci par refroidissement à l'eau en continue. Comme le découpage par la tronçonneuse à main n'assure pas le parallélisme des faces des éprouvettes, exigé par l'observation par le MEB, une opération de fraisage à pas fin (0.1 mm) est avérai imposée. Par la suite cette opération de fraisage est suivie par un polissage qui assure la planéité et le parallélisme de deux faces opposées.



Figure II.5 : tronçonneuse à disque électrique

Afin d'obtenir des résultats fiables par le MEB et la microscopie optique un prétraitement des échantillons a été fait, qui consiste en un polissage des surfaces des échantillons au papier abrasif en carbure de silicium de granulométrie de plus en plus fine (grade 180-400-800-1200 et en fin avec de la poudre d'alumine de $\frac{1}{4}$ μm sur un disque de tissu en feutre) sous jet d'eau. Les échantillons sont ensuite rincés soigneusement à l'eau distillée puis séchés à l'air comprimé.



Figure II.6 : Machine de polissage
(laboratoire de mécanique) université de LAGHOUAT

IV.4 Attaque chimique :

Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance pour mettre en évidence la morphologie structurale. Cette opération donne une différence de marche entre les différentes phases, vu que la vitesse d'arrachement des molécules par la solution d'attaque se diffèrent d'une phase à une autre car elle est directement liée à l'orientation cristallographique de chaque phase par rapport aux familles des plans cristallographiques de la surface à observer. Le réactif chimique utilisé dans notre cas (X70 acier micro allié) est le Nital dont la composition est 4 % (4 ml d'acide nitrique et 96 ml d'éthanol), une fois étalée sur la surface de l'échantillon, à un temps de maintien respecté; cette opération doit être suivie d'un rinçage à l'eau distillée.

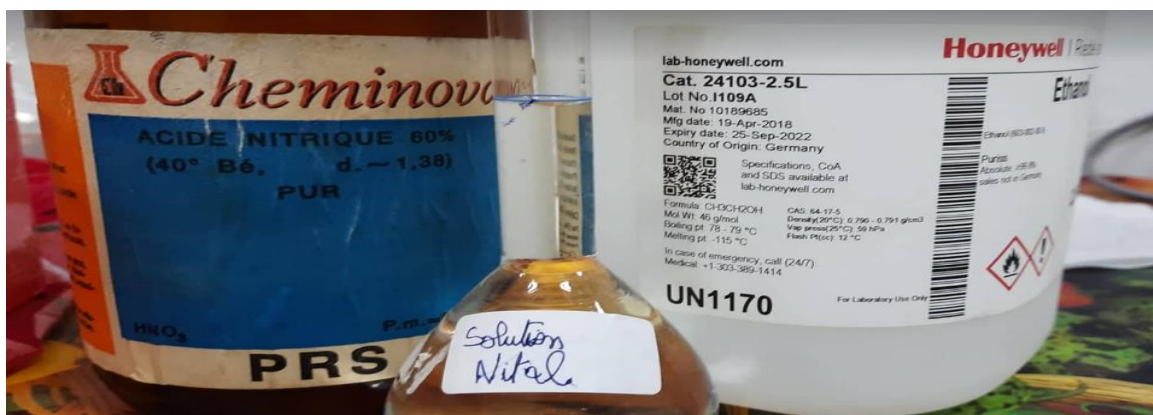


Figure II.7 : Solution Nital (4 ml d'acide nitrique et 96 ml d'éthanol).

V. Observation microscope optique:

L'examen métallographique a été effectué au niveau du laboratoire de mécanique en utilisant l'appareillage numérique d'acquisition des images. Le microscope optique est doté par d'une caméra numérique reliée à un micro-ordinateur, équipée par un logiciel installé pour l'acquisition des images. Pour l'observation de l'évolution de la microstructure d'échantillons après chaque traitement thermique, on réalise un balayage de la surface de ces échantillons tout en commençant par grossissement le plus petit.



Figure II.8 : Le microscope optique(laboratoire de mécanique) université de LAGHOUAT.

VI. Analyse par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) :

La microscopie électronique à balayage a été réalisée au niveau au laboratoire de recherche de génie des procédés (université de Laghouat) ; le microscope électronique à balayage utilisé est de marque (BRUKRE). Vue la contrainte de la quantité de travail au niveau du microscope (MEB) et l'espace de temps qui nous a été alloué, nous étions obligés des faire l'observation que pour 4 échantillons dont ils ont subis le traitements thermique pendant 2 heures à 450°C, 550°C, 600°Cet 650°C.

Le microscope électronique à balayage a permis de faire une analyse plus fine de la microstructure, ainsi que une analyse qualitative de la chimie des précipités et des différentes zones, grâce aux électrons rétrodiffusés et aux RX, et une observation des surfaces grâce aux électrons secondaires (fractographie).

C'est une technique basée sur le principe des interactions électrons- matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.



Figure II.9 : Microscopie Electronique a Balayage (MEB) au Laboratoire de Recherche Universitaire

VII. Analyse par diffraction des rayons X :

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques de longueur d'onde comprise entre 0,1 Å et 10 Å. Les rayons X utilisés en radiocristallographie ont des longueurs d'onde voisines de 1 Å, ordre de grandeur des distances interatomiques dans les cristaux métalliques. Quand un faisceau de rayons X tombe sur un matériau métallique, une partie du faisceau pénètre dans le matériau ; elle est, pour une part, transmise (si l'échantillon est suffisamment mince) et, pour l'autre part, absorbée. L'autre partie du faisceau est diffusée, c'est-à-dire réémise sous forme d'un rayonnement X de même longueur d'onde que le rayonnement incident, dans des directions différentes de celles du faisceau incident. Ce dernier phénomène est à la base de la diffraction des rayons X par les familles des plans cristallographiques qui sont en position de diffraction (loi de BRAGG $n\lambda = 2 d_{hkl} \sin\Theta$).

n : ordre de diffraction (généralement égale à 1).

d_{hkl} : distance inter réticulaire entre les plans en diffraction.

Θ : angle d'incidence entre les plans en diffraction et le faisceau des rayons X.

L'objectif de l'analyse des éprouvettes par diffraction des rayons X consiste à mettre en évidence les différentes phases co-existantes dans le matériau. Cette technique nous a permis de faire suivre l'évolution microstructurale de notre matériau en fonction des différents traitements thermiques.



Figure II.10: Diffractogramme à rayons X (plateforme de recherche scientifique de l'Université de Laghouat).

VIII. Essais de dureté :

VIII.1 Principe d'appareil :

- Le principe d'un appareil de mesure de dureté EQUOTIP repose sur la méthode dynamique (rebondissement). Un corps ferromagnétique de frappe doté d'une pointe de test en métal très dur est projeté au moyen d'un système à ressort sur la surface de la pièce à mesurer. Lorsque le corps de frappe heurte la surface, une déformation de la surface entraînant une perte d'énergie cinétique se produit. Cette perte d'énergie est détectée par une comparaison des vitesses v_i et v_r (Vitesse de sortie et vitesse d'arrivée) lorsque le corps de frappe se trouve à une distance précise de la surface pour la phase d'impact et la phase de rebond. La perte d'énergie est directement liée à la dureté de la surface.
- Large plage d'échelles de dureté : Les mesures sont automatiquement converties dans toutes les échelles de dureté courantes (HV, HB, HRC, HRB, HRA, HS) selon les besoins.

Gamme de blocs de référence : Vaste gamme de blocs de référence pour la mesure précise de dureté, disponibles pour chaque

instrument de frappe avec différents niveaux de dureté pour une vérification régulière de vos sondes.



Figure II.11 :un appareil de mesure de dureté EQUOTIP

- Dans ce travail en est utilisé dalle de granit pour éviter l'absorption des chocs ; Nous posons les échantillons sur une dalle de granit dont la dureté est très élevé par rapport à notre matériau après en faire le essaie de dureté.

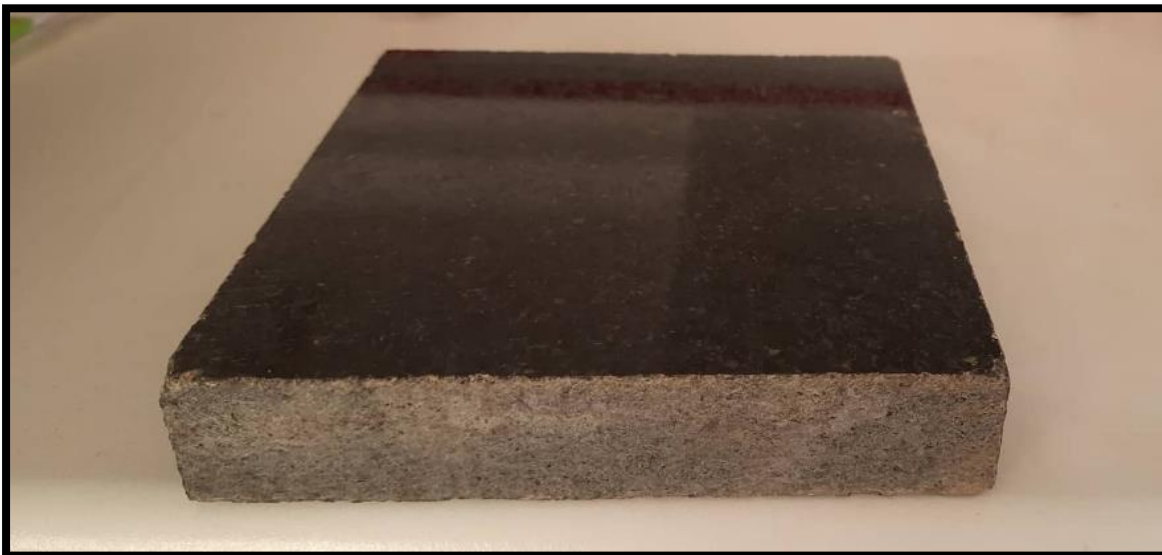


Figure II.12 : dalle de granit .

- Afin d'obtenir de bons et précis résultats ; Nous avons mesuré la dureté d'échantillon en huit fois à l'aide d'un appareil de mesure EQUOTIP de la dureté Afin d'obtenir de bons et précis résultats.

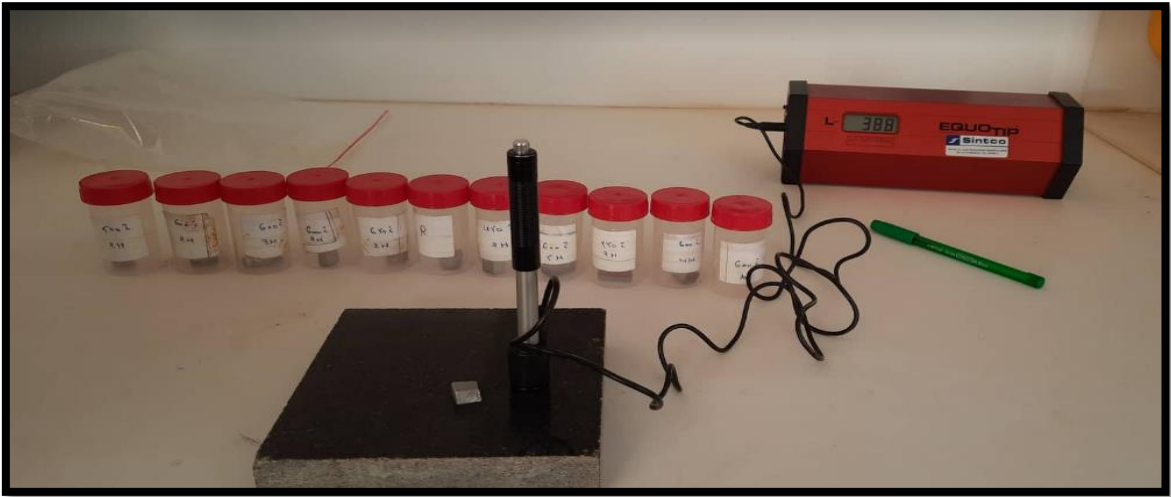


Figure II.13: essai de mesuré la dureté d'échantillons.

Chapitre III

Résultats et Discussion

III-1 Résultats d'observation par microscope optique :

Une observation microscopique à été réalisé sur différentes échantillons de cordon de l'aciers X70 selon le protocole de traitement thermique cité, après triage entre les différents résultats ces derniers seront présenter comme suites:

- La figure III.1 nous permet de voir la morphologie de l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70 traité thermiquement à 450°C et un maintien 2 heure de temps:



Figure III.1 : Observation microscopique l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70 (traitement thermiquement à 450°C et un maintien 2 heure de temps).

- La figure III.2 nous permet de voir la morphologie de l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70 traité thermiquement à 550°C et un maintien 2 heure de temps:

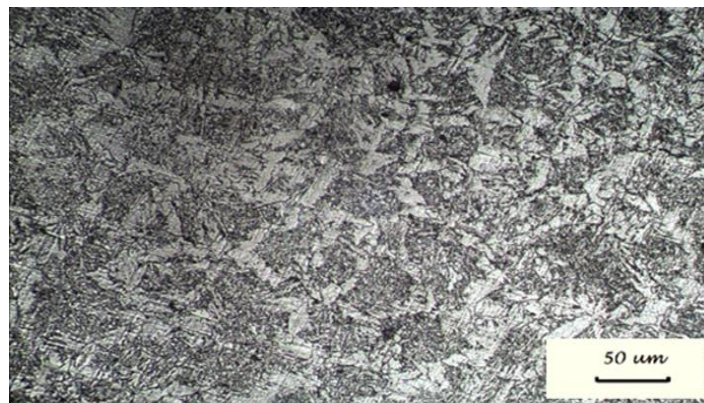


Figure III.2 : Observation microscopique l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70 (traitement thermiquement à 550°C et un maintien 2 heure de temps)

- La figure III.3 nous permet de voir la morphologie de l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70 traité thermiquement à 600°C et un maintien 2 heure de temps:

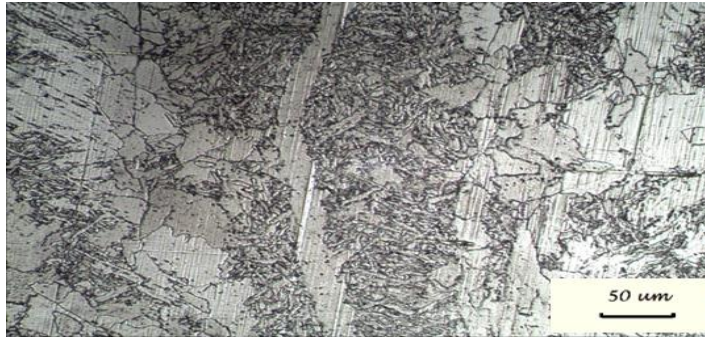


Figure III.3 : Observation microscopique l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70 (traitement thermiquement à 600°C et un maintien 2 heure de temps).

La figure III.4 nous permet de voir la morphologie de l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70 traité thermiquement à 650°C et un maintien 2 heure de temps :

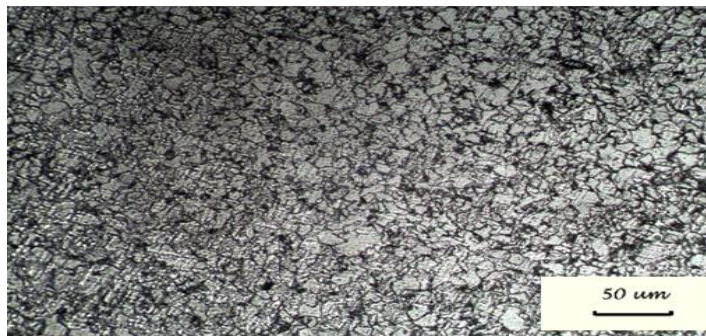


Figure III.4: Observation microscopique l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X70 (traitement thermiquement à 650°C et un maintien 2 heure de temps).

L'observation par microscopie optique de l'échantillon traité thermiquement à 450 °C pendant 2h montre une homogénéité structurale avec une variation morphologique (avec des tailles des grains qui différents, ainsi qu'une certain orientation tout en gardant la présence ce de la ferrite (α) et le perlite ($\alpha+Fe_3C$) ; Cette morphologie est bien illustrée par la micrographie de la figure (Figure III-1).

La figure III.2 montre par microscope optique la morphologie du cordon de soudure de l'acier X70 traité thermiquement à 550 °C pendant un maintien de 2 heures ; cette morphologie présente une certaine homogénéité structural avec un affinement de la taille des grains tout en gardant quelques orientations la figure (Figure III-6) Montrez bien la stabilité structurale; donc la présence de ($\alpha+Fe_3C$).

Un traitement thermique à 650°C pendant 2h et illustré par la figure III-4 , montre la micrographie par microscope optique tout on observons une bonne morphologique avec affinement des grains par rapport à celui de traitement thermique 550°C pendant 2h et on remarque l'absence de la texture des grains la réduction des taille des grains est très apparente par rapport aux autres traitement thermique(450°C,550°C à2h) ;Cette morphologie est confirmé par micrographie par MEB.

La figure III.4 de l'échantillon de cordon de soudure de l'acier X 70(API) qui a subi un traitement thermique à 650°C à 2h montre bien que la microstructure reste toujours stable donc présence de la matrice ferrite et la cementite (α +perlite) avec une recristallisation et un affinement des grains .

III-2 Résultats d'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) :

L'observation microscopique réalisé sur les différents échantillons de cordon de l'acier X70 par MEB seront présentés selon le protocole de traitement thermique cité, les résultats seront présentés comme suites (figures III.5,6,7et8) :

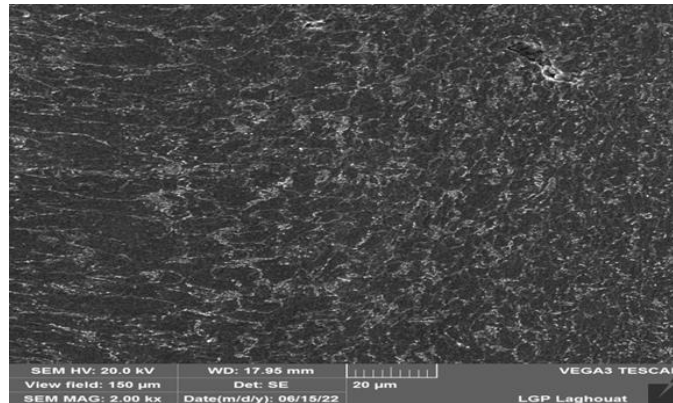


Figure III.5 : Observation par microscope électronique à balayage MEB de cordon de soudure de l'acier X70 (traitement thermiquement à 450°C et un maintien 2 heure de temps).

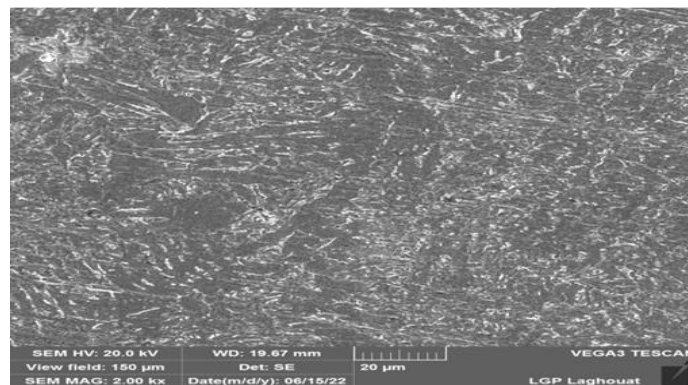


Figure III.6 : Observation par microscope électronique à balayage MEB de cordon de soudure de l'acier X70 (traitement thermiquement à 550°C et un maintien 2 heure de temps).

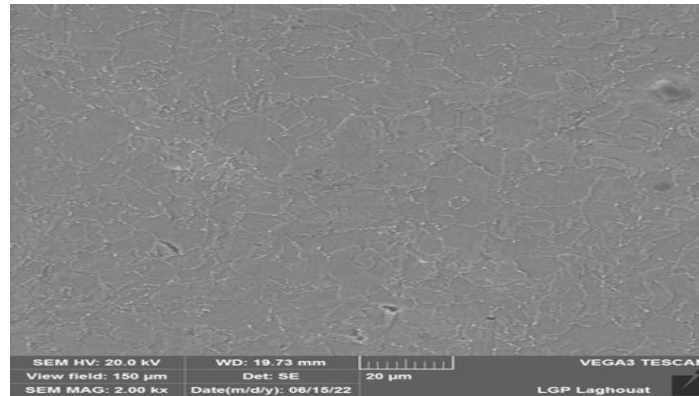


Figure III.7 : Observation par microscope électronique à balayage MEB de cordon de soudure de l'acier X70 (traitement thermiquement à 600°C et un maintien 2 heure de temps).

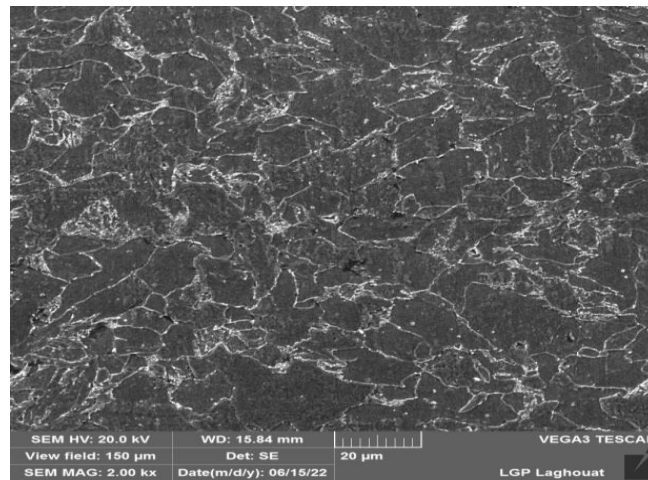


Figure III.8 : Observation par microscope électronique à balayage MEB de cordon de soudure de l'acier X70 (traitement thermiquement à 650°C et un maintien 2 heure de temps).

L'observation par MEB montre bien l'homogénéité morphologique et structurale, avec une certaine orientation des quelques de grains par rapport à d'autre ; cette orientation qui forme une certaine texture des grains orienté.

III-3 Résultats de diffraction à rayons X:

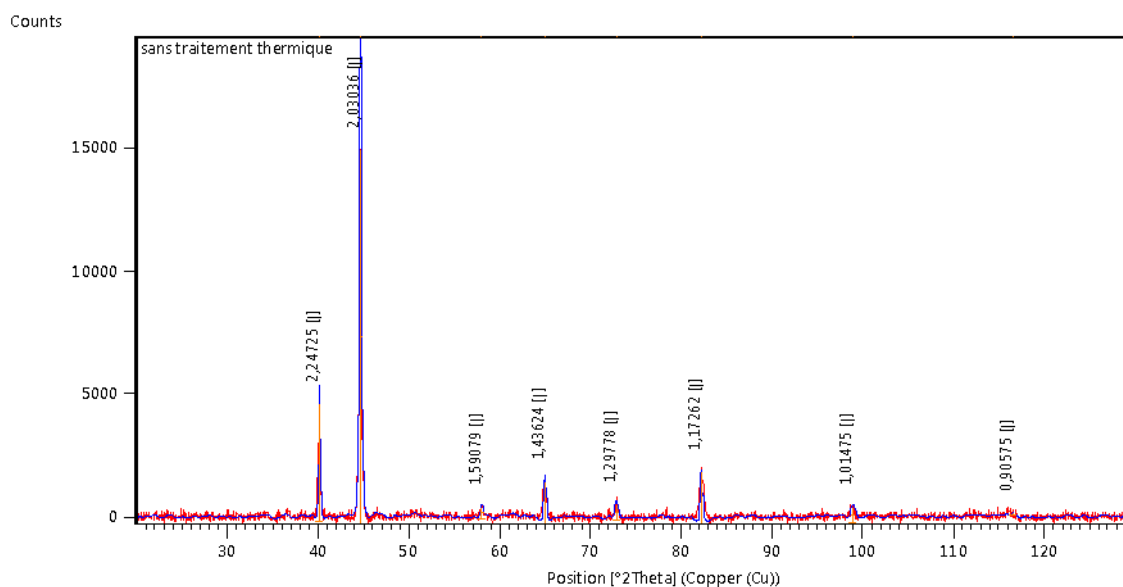
Les résultats de diffraction à rayons X sont présenter comme suite :

-Etat brut (sana traitement thermique) :

Le Diffractogramme du cordon de soudure de l'acier X70 de l'état brut nous permet de connaitre les différents pics diffracté et les différentes distances interarticulaires d_{hkl} , on remarque bien sept pics diffracté a différentes angles de diffraction dont le pic le plus intense et a $44,6309^\circ$ avec une distance interarticulaire de $2,03036\text{\AA}$ et intensité 15284,27cts .

Tableau III.1: Liste des pics du cordon de soudure X70 état brut (sans traitement thermique)

Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
40,1266	4750,93	0,1535	2,24725	31,08
44,6309	15284,27	0,2558	2,03036	100,00
57,9759	455,74	0,3070	1,59079	2,98
64,9285	1695,26	0,2558	1,43624	11,09
72,8889	627,52	0,4093	1,29778	4,11
82,2110	2118,28	0,2047	1,17262	13,86
98,8809	593,71	0,5117	1,01475	3,88
116,5231	112,73	0,0900	0,90575	0,74

**Figure III.9 :** Diffractogramme de cordon de soudure X70 état brut (sans traitement thermique) .**-1^{er} protocole : température fixe et temps de maintien varie :**

Les résultats des différents diffractogrammes et les listes des pics nous donne les différents angles de diffraction ainsi que les distances interarticulaire, on remarque bien la variation des différentes angles de diffraction selon chaque traitements thermiques appliquer qui explique l'effet de température de traitement sur les paramètres (la distance interarticulaire , décalage des pics),cas du traitement thermique de 450C²H le premier pic diffracté à l'angle de 44,9430° avec une distance interarticulaire de 2,01531 \AA si on le compare à celui de l'état brut (sans traitement thermique) l'angle de diffraction 2Theta 44,6309° avec une distance de 2,03036 \AA et intensité de 15284,27cts .

Tableau III.2: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 450°C a un temps de maintien 2h) :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
29,7694	682,00	0,0900	2,99874	3,13
39,9951	6958,00	0,0900	2,25247	31,97
40,3250	6890,00	0,0900	2,23480	31,66
44,9430	21762,00	0,0900	2,01531	100,00
51,5403	750,00	0,0900	1,77177	3,45
57,8076	1023,00	0,0900	1,59370	4,70
64,7347	2251,00	0,0900	1,43888	10,34
72,9813	1501,00	0,0900	1,29529	6,90
82,2174	4025,00	0,0900	1,17158	18,50
88,4848	955,00	0,0900	1,10406	4,39
97,7209	819,00	0,0900	1,02282	3,76
116,5231	1023,00	0,0900	0,90575	4,70

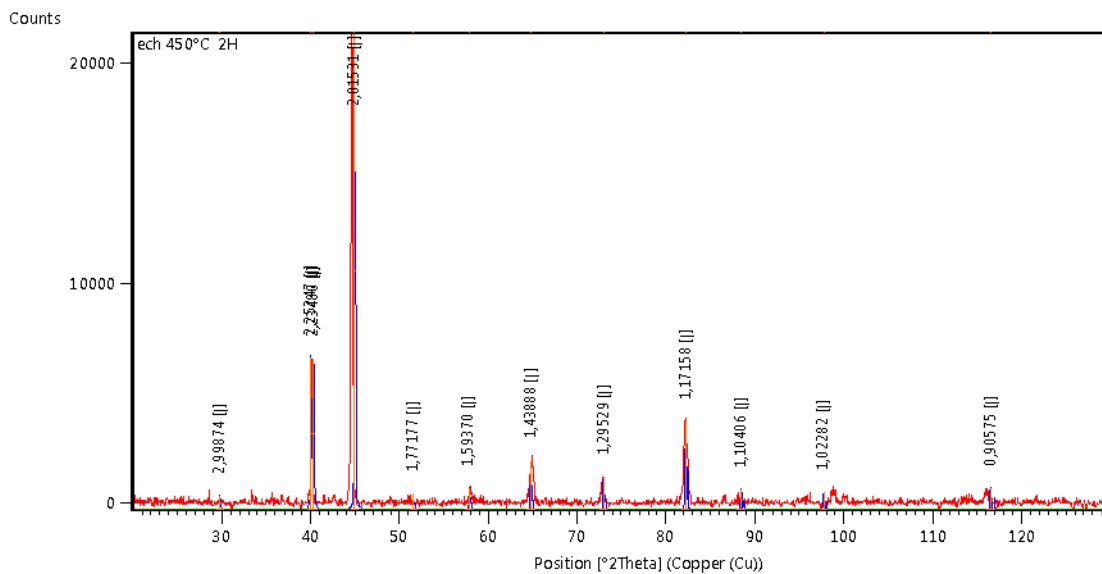
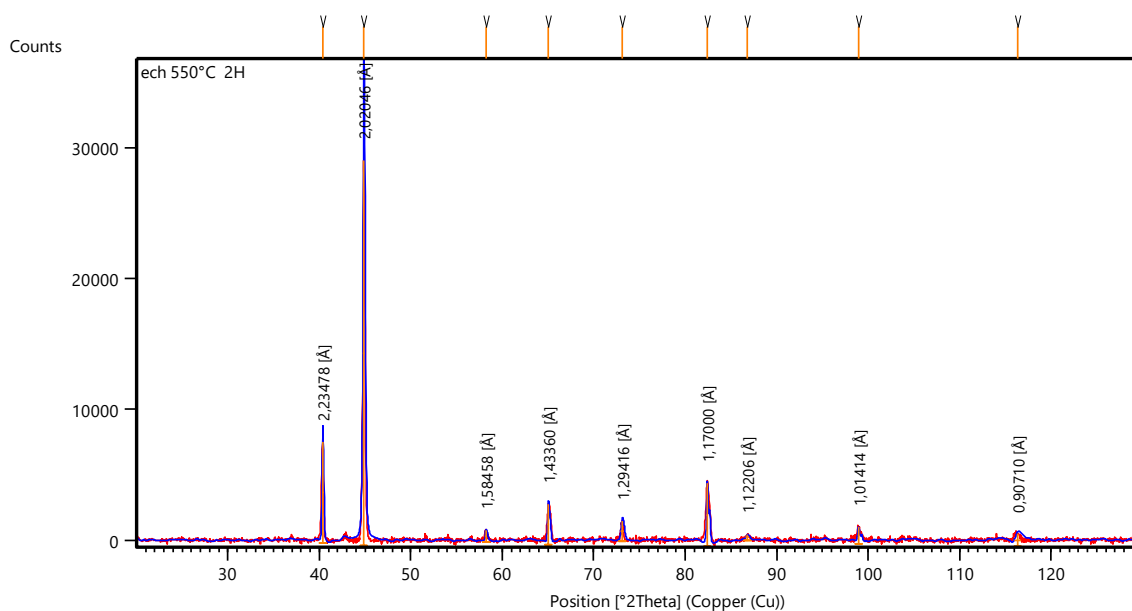


Figure III.10 : Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 450°C a un temps de maintien 2h).

Tableau III.3: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 550°C a un temps de maintien 2h)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
40,3601	7759,85	0,1535	2,23478	26,38
44,8614	29414,42	0,2303	2,02046	100,00
58,2246	931,31	0,2047	1,58458	3,17
65,0629	3072,23	0,2047	1,43360	10,44
73,1259	1544,12	0,3070	1,29416	5,25
82,4348	4767,82	0,2047	1,17000	16,21
86,7975	458,04	0,3070	1,12206	1,56
98,9615	1290,64	0,2558	1,01414	4,39
116,4008	1081,80	0,7164	0,90710	3,68

**Figure III.11 :** Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 550°C a un temps de maintien 2h).**Tableau III.4:** Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 2h) :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
40,1158	8329,63	0,1279	2,24783	31,89
44,6112	26121,30	0,1535	2,03121	100,00
57,9281	1369,92	0,2047	1,59199	5,24
64,8620	4146,01	0,3582	1,43756	15,87
72,9251	1652,56	0,2047	1,29722	6,33
82,2507	4934,00	0,2047	1,17216	18,89
86,5875	336,76	0,6140	1,12424	1,29
98,7941	1053,80	0,2047	1,01541	4,03
116,1357	1388,20	0,4093	0,90840	5,31

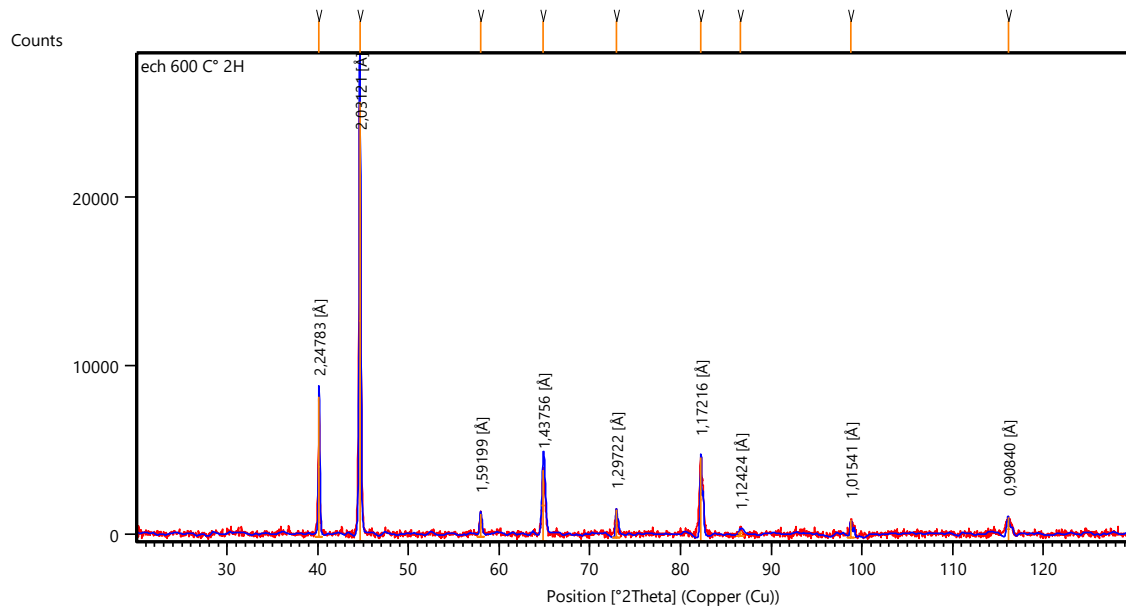


Figure III.12 : Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 2h).

Tableau III.5: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 650°C a un temps de maintien 2h) :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
40,6991	5732,59	0,1791	2,21695	24,45
45,1798	23447,41	0,3838	2,00696	100,00
58,4318	647,16	0,5117	1,57946	2,76
65,4607	2504,00	0,3582	1,42585	10,68
73,4741	1206,83	0,3582	1,28888	5,15
82,8004	4516,39	0,3582	1,16577	19,26
87,0984	507,14	0,3070	1,11896	2,16
99,2221	1251,45	0,5117	1,01218	5,34
116,6223	1558,71	0,3582	0,90601	6,65

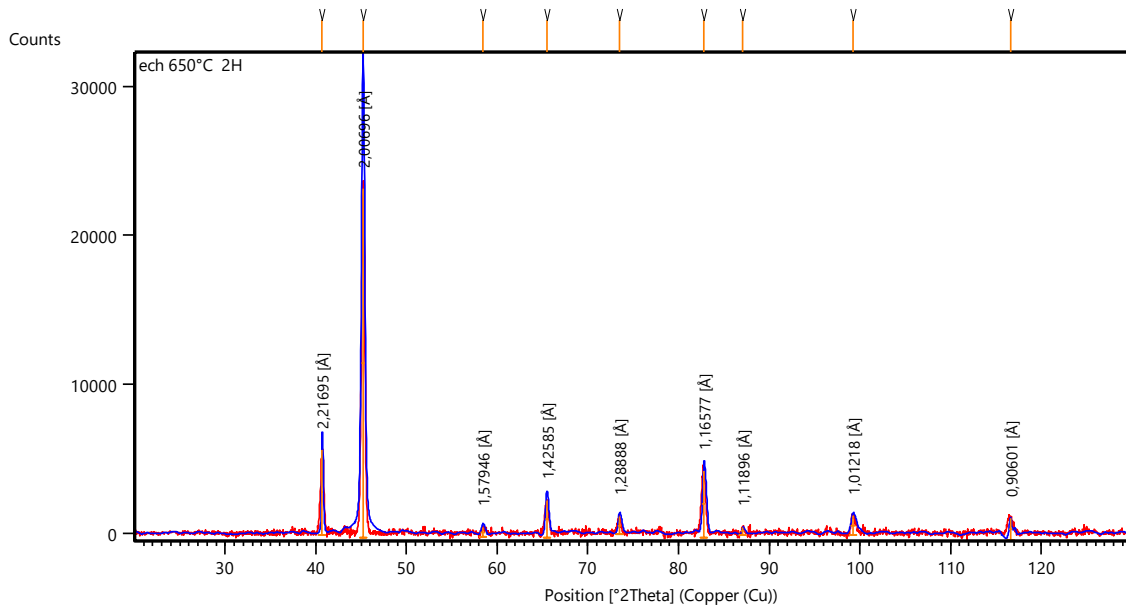


Figure III.13 : Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 650°C a un temps de maintien 2h)

- 2^{ème} protocole : température varie et temps de maintien fixe :

Tableau III.6: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 1h) :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
40,4904	2037,02	0,1791	2,22790	26,75
44,9855	7613,79	0,2303	2,01517	100,00
58,2453	443,61	0,3070	1,58407	5,83
65,1555	1527,93	0,3070	1,43179	20,07
73,1490	533,80	0,4093	1,29381	7,01
82,4869	1783,94	0,5628	1,16940	23,43
99,0368	254,80	0,6140	1,01357	3,35
116,2916	479,83	0,8187	0,90763	6,30

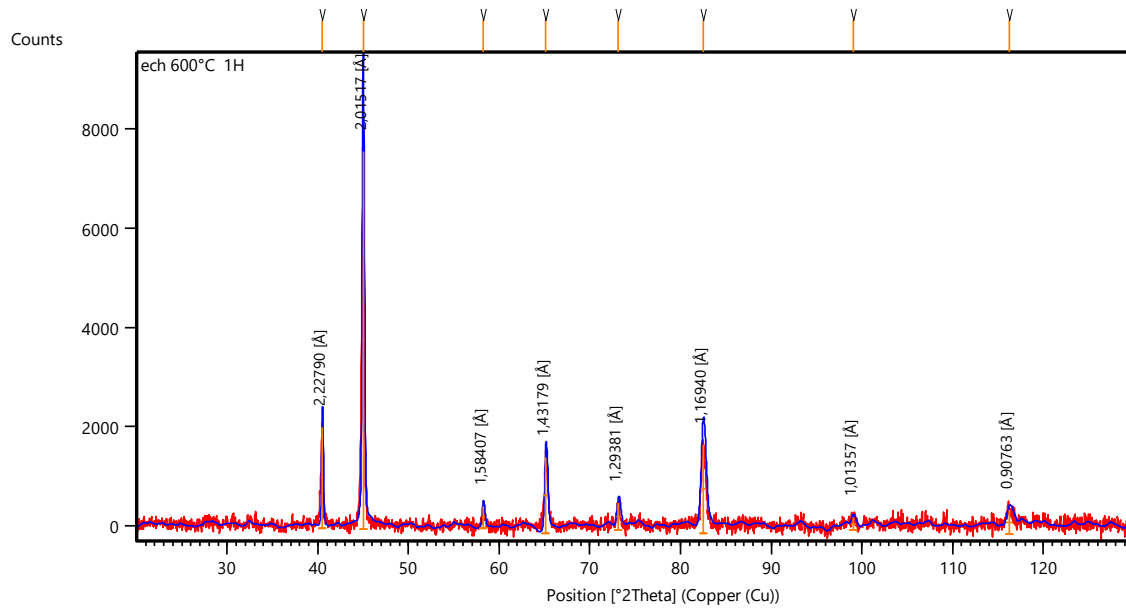


Figure III-14 : Diffractogramme de cordon de soudure X70
(température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 1h).

Tableau III.7: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 2h) :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
40,1158	8329,63	0,1279	2,24783	31,89
44,6112	26121,30	0,1535	2,03121	100,00
57,9281	1369,92	0,2047	1,59199	5,24
64,8620	4146,01	0,3582	1,43756	15,87
72,9251	1652,56	0,2047	1,29722	6,33
82,2507	4934,00	0,2047	1,17216	18,89
86,5875	336,76	0,6140	1,12424	1,29
98,7941	1053,80	0,2047	1,01541	4,03
116,1357	1388,20	0,4093	0,90840	5,31

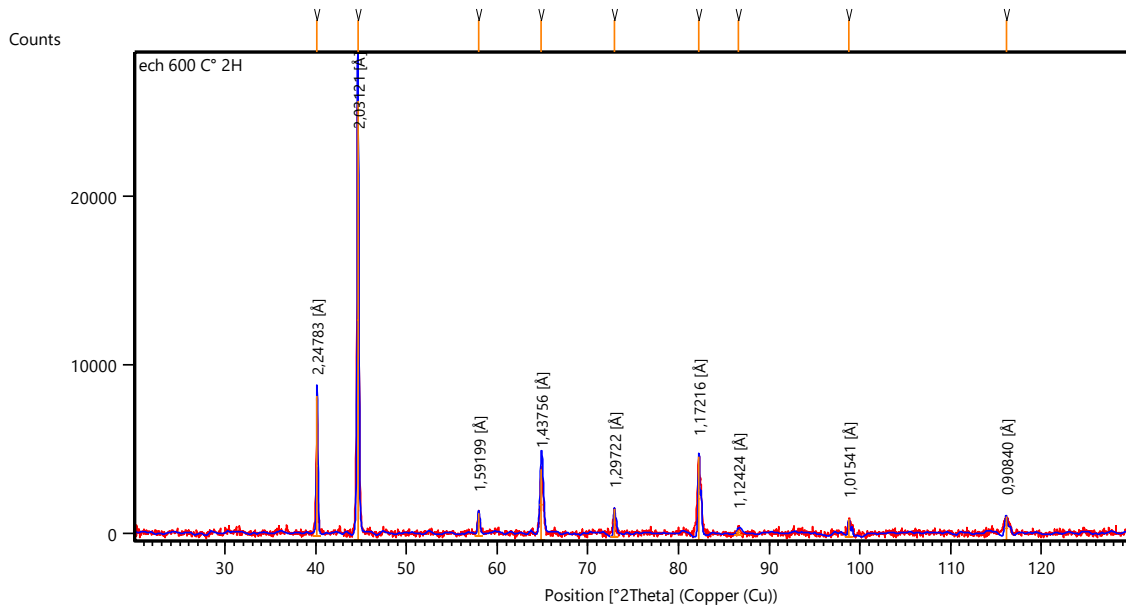


Figure III.15 : Diffractogramme de cordon de soudure X70

(température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 2h).

Tableau III.8: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 3h) :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
40,3949	4883,73	0,1279	2,23294	25,91
45,0002	18849,04	0,2814	2,01455	100,00
58,2254	530,77	0,8187	1,58457	2,82
65,3335	1856,86	0,3582	1,42832	9,85
73,2543	929,08	0,4093	1,29221	4,93
82,6521	3560,35	0,5117	1,16748	18,89
99,0757	836,93	0,5117	1,01328	4,44
116,3039	925,89	0,8187	0,90757	4,91

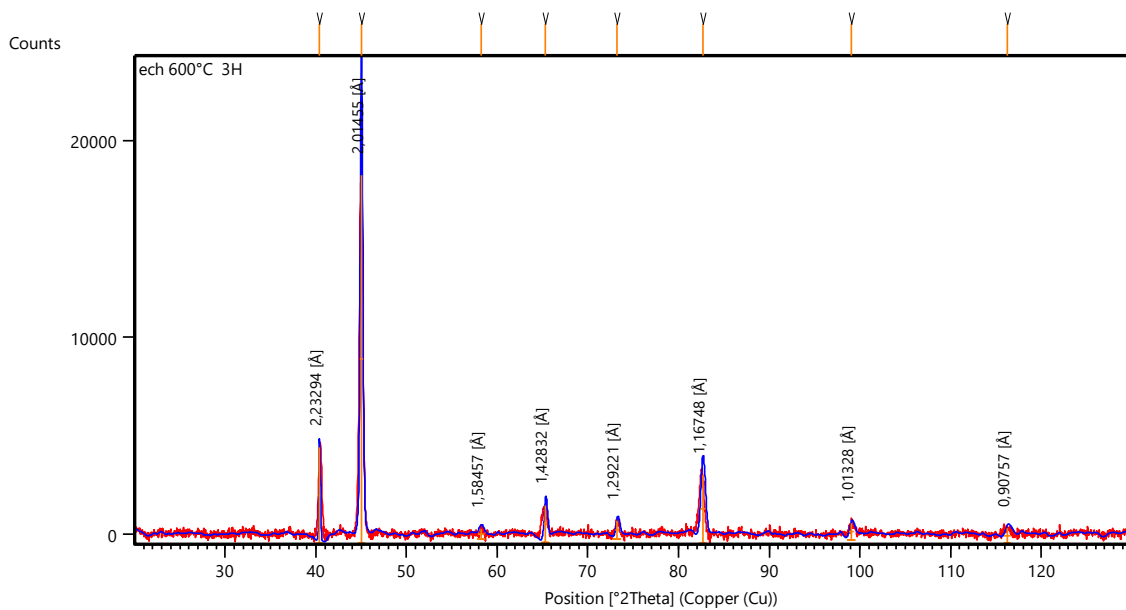


Figure III.16 : Diffractogramme de cordon de soudure X70

(température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 3h).

Tableau III.9: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 4h) :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
40,1523	8473,20	0,1535	2,24587	28,92
44,6536	29298,05	0,2303	2,02938	100,00
57,9881	991,74	0,3070	1,59048	3,39
64,8488	3062,19	0,4093	1,43781	10,45
72,9550	1259,50	0,2558	1,29677	4,30
82,2509	4648,21	0,2047	1,17215	15,87
98,8691	794,57	0,4093	1,01484	2,71
116,1259	1248,20	0,4093	0,90845	4,26

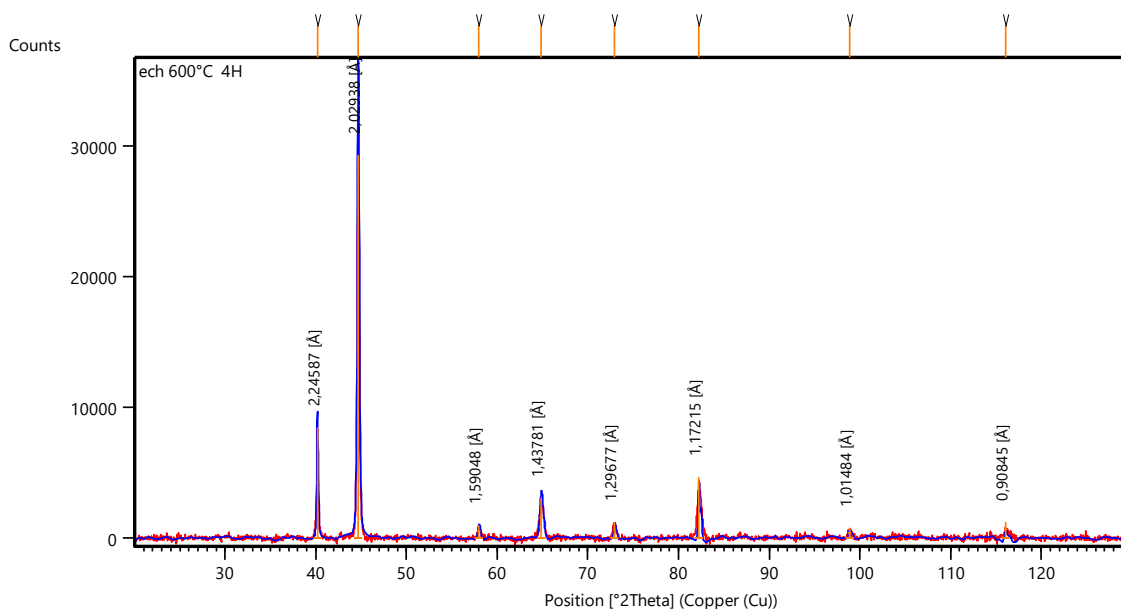


Figure III.17: Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 4h).

Tableau III.10: Liste des pics du cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 5h) :

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
40,1679	8931,42	0,1023	2,24503	30,27
44,6574	29503,95	0,1535	2,02921	100,00
58,0165	2055,03	0,2047	1,58977	6,97
64,9176	6557,15	0,1791	1,43646	22,22
72,9027	1864,63	0,1535	1,29757	6,32
82,2465	5592,39	0,1535	1,17221	18,95
98,9421	740,25	0,5117	1,01429	2,51
116,2155	1996,25	0,4093	0,90801	6,77

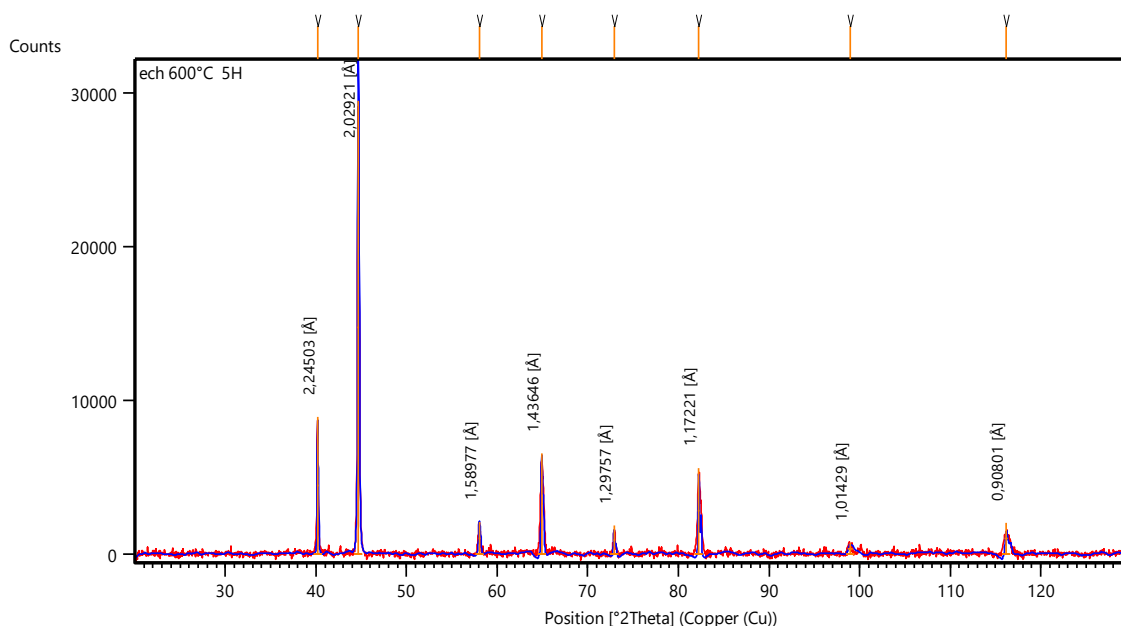


Figure III.18: Diffractogramme de cordon de soudure X70 (température de traitement thermique 600°C a un temps de maintien 5h).

Comparaison entre les différents diffractogrammes :

Une comparaison des différents diffractogrammes selon les différentes traitement thermique appliquer au cordon de soudure de l’acier X70, On remarque le décalage des pics et une variation des intensités des pics diffracter par rapport à l’état brut, cette variation nous informe sur la quantité des différentes densité des plans diffracter ainsi que le décalage de pics des pics qui s’explique par dissipation des contrainte interne l’hors du formation ou dissolution des différentes phases durant le traitement thermique appliquer .

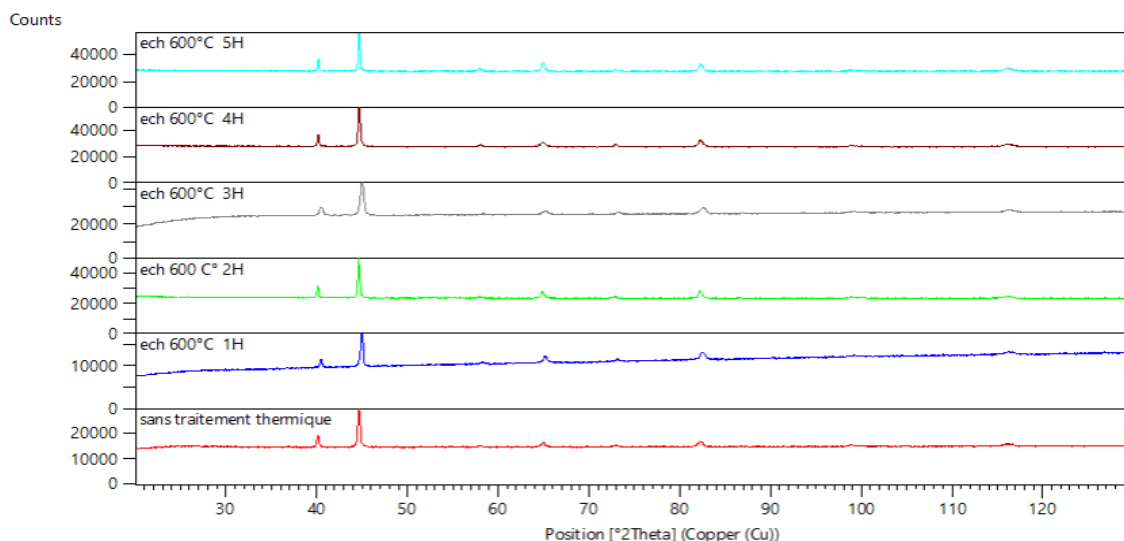


Figure III.19 : Comparaison des diffractogramme de cordon de soudure X70

(Température de traitement thermique fixe 600°C a un temps de maintien varier 1, 2, 3,4 et 5heures).

On comparant les différents diffractogrammes de diffraction des rayons X du cordon de soudure X70 selon le deuxième protocole de traitement thermique cité au par avons, la présence de décalage des pics et la variation des intensités des pics diffracter des différents diffractogrammes ainsi que l'apparition de nouveaux pics.

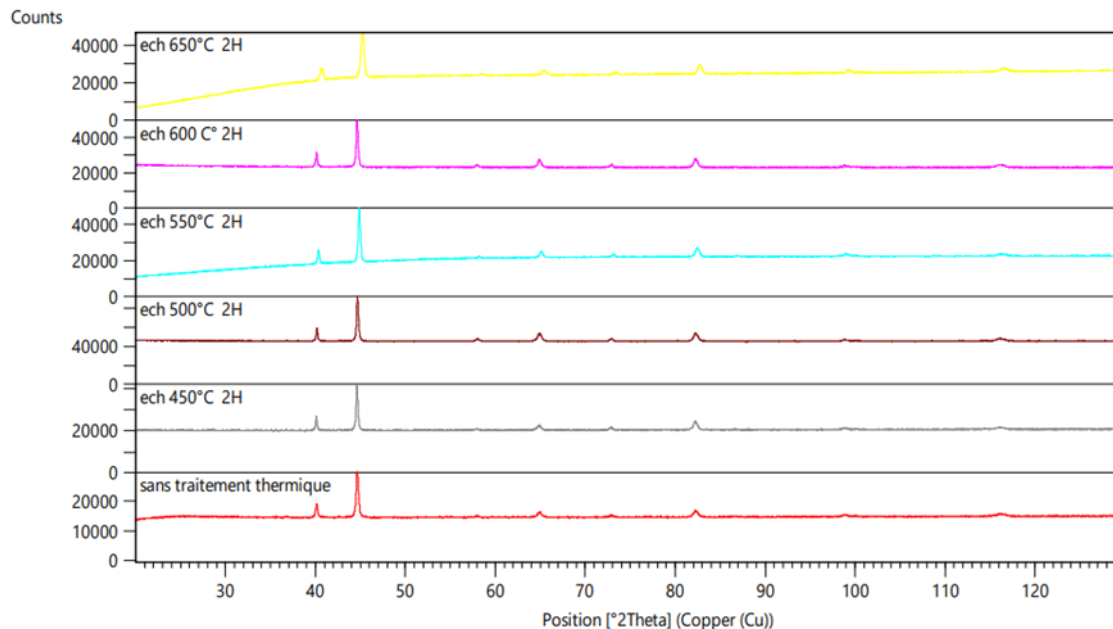


Figure III.20 : Comparaison des diffractogrammes de cordon de soudure X70 (Temps de traitement thermique fixe 2heures a un temps de maintien varier 450°C, 500°C, 550°C, 600°C et 650°Cheures).

III-4 Résultats de l'essai de dureté :

Après avoir terminé le processus de mesure de la dureté, les résultats de mesure de dureté seront présenté on deux courbes selon les traitements thermiques appliqués (protocole 1 et 2) comme suite :

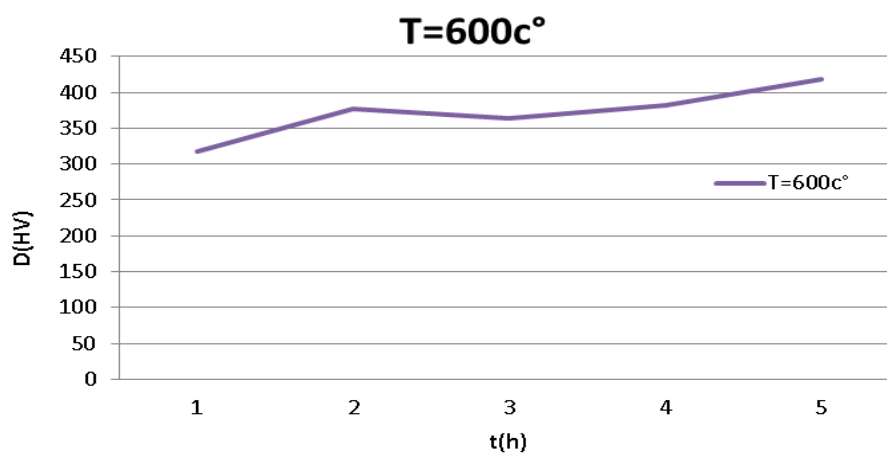


Figure III.21 : Présentation des résultats de mesure de dureté (Temps de traitement thermique fixe 2heures a un temps de maintien varier 450°C, 500°C, 550°C, 600°C et 650°Cheures).

La courbe de la figure III-19 présente la dureté de cordon de soudure de l'acier X70, à une durée de maintien constante de 2h et une température de traitement thermique variables (450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C).

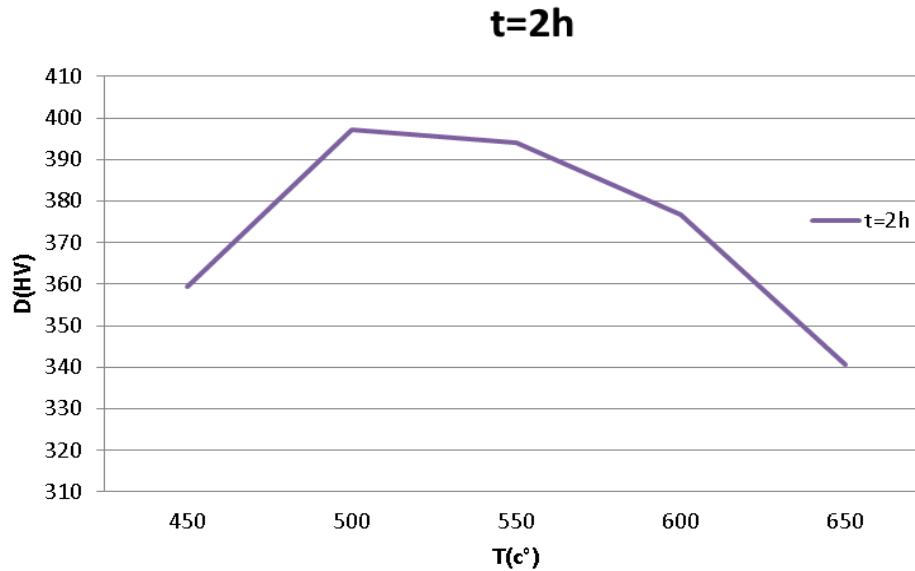


Figure III.22 : Présentation des résultats de mesure de dureté

(Température de traitement thermique fixe 600°C à un temps de maintien varier 1, 2, 3,4 et 5heures)

La figure III-19 montre bien une augmentation légère de la dureté Vickers (318.28 HV à 418.10 HV) Ce qui montre que l'effet du temps de maintien 600°C n'affecte pas fortement sur la micro dureté par contre on remarque que à 650°C de température de traitement thermique une réduction de la micro dureté de 397.25 HV jusqu'à 340.61 HV.

III-5 Discussion :

La variation de la morphologie structural en fonction du traitement thermique pendant 2h présente un affinement des grains qui est dus à l'effet thermodynamique de la microstructure ce qui influe sur la recristallisation des grains qui ont subi un historique inconnu lors du refroidissement (solidification du cordon de soudure hors équilibre thermodynamique).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S + \sum Q_i \quad (1)$$

Q_i : énergie inter faciale en les différents grains cet apport énergétique affecte la variation de ΔG dans le sens d'équilibre thermodynamique.

Cette apport énergétique affecte aussi les contraintes internes (dislocation) donc réduction de contrainte interne donc ce phénomène affecte la dureté dans le sens réduction, d'autre part l'affinement des grains, par leur taille augmenter le module Young. Donc on a affaire un phénomène antagoniste.

$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (2)$$

K: est une constante dépend du matériau.

σ_0 : limite élastique $\sigma_0 = E/\epsilon$.

d: diamètre moyen des grains.

La variation de l'angle des pics de diffraction s'explique bien la présence de contrainte interne (dislocation).

CONCLUSION

L'analyse par microscopie optique de la morphologie, la micrographie par microscope électronique à balayage et l'analyse par diffraction des rayons x de la microstructure du cordon de soudure (la Zone fondu ZF) de l'acier X70, suite à l'application d'un protocole des traitements thermiques préalablement définie, ont montré une nette variation de la morphologie selon la température et le temps de maintien (affinement des grains et recristallisation a 650°C et un maintien de 2heur de temp).

Le dépouillement de l'ensemble des diffractogrammes, nous informe bien sur les angles de diffractions de rayons X, les distance inter réticulaires pour chaque pic, le décalage des pics et la formation ou et la dissolution des différentes phases qui peuvent coexister, suite un traitement thermique définie.

L'apport énergétique sous forme de traitements thermiques contrôlés conduit à des systèmes thermodynamiquement stables le long de la formation ou la dissolution des phases qui s'accompagne avec la dissipation des contraintes internes initialement introduites par l'effet du refroidissement rapide à l'air du cordon de soudure. La dissipation des contraintes internes (dislocations dans les grains ou inter granulaire) qui s'accompagne avec la formation et /ou la dissolution des phases conduit à une légère fluctuation des mesures de dureté de l'acier X70.

En perspective, on envisage l'étude approfondie du point de vue thermodynamique sur la relation entre la formation et/ou dissolutions des phases qui peuvent exister d'une part et la dissipation des contraintes internes d'autre part ; suivie d'une étude électrochimique qui peut révéler le rôle des carbures et des nitrures sur la résistance à la corrosion.

Référence :

- [1] **BOUCHELLIGA HOCINE** , " Identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l'acier X70 D'ALFAPIPE ", Mémoire de Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016.
- [2] **ACHOURI, Abdelfatah et DOUIBI, MOHAMED ZAKARIA** ;" Caractérisation Microstructurale et Mécanique d'un Acier Pipeline HLE de Catégorie X70 API 5L dans les Zones d'un Cordon de Soudure ; 2017. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie. Amar Laskri. Annaba.
- [3] **HAISSAM ABOUBAKEURE EL SEDIK** ; "Etude expérimentale de comportement à la corrosion d'un acier X70 dans une solution basique "; Mémoire de Master ; Université Amar Thelidji- Laghouat ;2018
- [4] <https://www.weerg.com/fr/fr/blog/quels-sont-les-4-types-dacier> ; SEP/24/2020 5:20:00 PM .
- [5] **DEBABI ADIL FETITA MOHAMMED NADIR**; "Etude des caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure après application d'un traitement thermique" ; Mémoire de Master ; UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ; 2017 / 2018.
- [6] **ABASSI IMANE** ; " Etude microstructurale d'un joint soudé par procédé SMAW d'acier X70" Mémoire de Master ; Université Mohamed Khider de Biskra ;2019 – 2020.
- [7] **KAF MOUSSA TAKIEDINNE ET ZAZA AHMED** ;" Effet de la relaxation sur du cordon de soudure de l'acier HSLA" ; Mémoire de Master ; Université Amar Thelidji – Laghouat ; 2020/2021.
- [8] **M.K. GRAF, F.K.LORENZ**. Relation entre la microstructure et les propriétés mécaniques des aciers de tuyaux de grand diamètre traités thermomécaniquement.
- [9] maregrumbach, aciers microalliés technique del'ingénieur, M4 525.
- [10] P.S.Rothman, W.T.Toung, Pipelines, Édition Robert Baboian, 2005.
- [11] Jean Marie Dorlot, Jacques Masounave. Des matériaux . 2eme édition, école polytechnique de montréal.
- [12] "Aciers de construction à haute résistance et aciers faiblement alliés à haute résistance", metalshandbook, dixième édition, 1990.
- [13] **MANDIJ.BARNETT**, "acier dur pour tôles de jauge lourdes laminées, compte rendu de la conférence internationale sur la technologie et l'application des aciers HSLA", octobre 1983.
- [14] **BENSAADA SAID** "traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes", Université de Biskra, 07 November 2019.
- [15] **ARFAOUI ALI, CHAKER MED AMIR**, "Matériaux Métalliques", ISET Kasserine 2010.

- [16] **L.HATTALI**, Cours " M2104 –Mise en œuvre et comportement des matériaux ", Université Paris Sud IUT Cachan, 2013.
- [17] **N.GUELAI ET F.BOUTARFIF**, "Comportements mécaniques Des aciers faiblement alliés avant et après cémentation ", Mémoire de Master, Université de Tébessa, 2016.
- [18] **F. BOUNAB**, " Évolutions microstructurales lors des traitements thermiques imposés à un acier faiblement allié (53mnsi4) ", Mémoire de Master, Université de Biskra, 2013.
- [19] **A. ACHOURI**, "Caractérisations mécaniques et structurales d'un acier de construction des pipelines (API 5LX60) ", Mémoire de Master, Université de Biskra, 2017.
- [20] **N.HICHER**, " Étudedes propriétés microstructurales et mécaniques d'un acier (BS2) soudé ";Mémoire de Master ;Université de Biskra, 2019.
- [21] **M. GRUMBACH**, Technique de l'ingénieur, « Aciers microalliés », M4 525.
- [22] **J.PAUL BAILON, J.MARIE DORLOT** ``Des matériaux`` édition 200-2001.
- [23] **MOSTEFA Abdellatif** ; "Etude comparative des différents procédés de soudage sur l'effet de fissuration a froid dans la ZAT "; Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE ; 2017/2018.
- [24] **H. GRANJON** ; Bases métallurgiques du soudage, Eyroles, Paris (1977)
- [25] Symap ; Guide soudage/chapitre_1 (Les matériels de soudage et de coupage thermique les plus courants)
- [26] **H.P.LIEURADE**, Spécial mécano soudage, CETIM Informations N°118, Septembre 1990.
- [27] **F.ROSSILLON**. "Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR dual phase soudé par point". Thèse de Doctorat, Université balaise pascal. 2007
- [28] Document réalisé par le groupe Toxicologie d'Annecy Santé au Travail Actualisé en 2009
- [29] **BELABED ABDELMADJID** ; "Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles" ; Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen ; 2016-2017
- [30] **Régis BLONDEAU**. "Métallurgie et mécanique du soudage". Edition LAVOISIER ,PARIS .pp31
- [31] **BENREDOUANE ANISSA DALILA** ; "Etude de l'activité pouzzolanique de la zéolithe X synthétisée à partir d'aluminosilicates naturels" ; UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN – MOHAMED BOUDIAF ; 2012

[32] **SERNA, FREDERIC, LAGNEAU, Jean,** et **CARPENTIER, Jean-Marc.** La diffraction des rayons X: une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques. *Chim. Nouv*, 2014, p. 1-12.

[33] **ARONICA, CHRISTOPHE ET JEANNEAU,** Erwann. Diffraction des rayons X-Techniques et études des structures cristallines. *Culturesciences-Physique-Ressources scientifiques pour l'enseignement des sciences physiques*, 2009.

[34] <https://www6.jouy.inrae.fr/mima2/Equipements/Microscopie-Electronique/Microscopie-Electronique-a-Balayage> ; 01 Juillet 2016.

[35] <https://lgc.cnrs.fr/wp-content/uploads/2019/05/MEB-cor.pdf>

[36] <http://mssmat.centralesupelec.fr/en/Moyens-microscopie-principes-meb#:~:text=Les%20%C3%A9lectrons%20secondaires%20sont%20cr%C3%A9s,%C3%A9jection%20de%20ce%20dernier%20%C3%A9lectron.> 05/18/2022 21:17

[37] **BENMOUSSA RYMA** ; "Caractérisation mécanique de l'acier 100Cr6" ; Mémoire de Master ; ANNABA- MOKHTAR BADJI UNIVERSITE ; 2018.

[38] **MAZOUZI AIMEN** ; "caracterisation mecanique d'un acier a50 pour la fabrication de l'anneau d'attelage a ferroviaire" ; memoire de master ; universite MOKHTAR BADJI ANNABA ;2016.