

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

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie mécanique

Spécialité : Énergétique

Par

- ***KHENFOUF Fateh***
- ***HOURIA Imad***

Intitulé

***Étude statistique de la dureté d'un acier inoxydable sous
l'influence de la température du recuit thermique***

Soutenu le : 03/07/2022

Devant le Jury :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mr. DAOUD Salah</i>	<i>Prf</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mr. MEZOUAR Rabie</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mr. OKBA Fouad</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-SETIF</i>
<i>Mr. BENMAKHOLOUF Abdelfateh</i>	<i>MAB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous tenons à remercier **ALLAH**, le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos encadreurs, **Dr. MEZOUAR Rabie** et **Dr. OKBA Fouad**, pour leur patience, et surtout pour leur confiance, leurs remarques et leurs conseils, leur disponibilité et leur bienveillance.

Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, nous tenons aussi à remercier monsieur le chef de la Filière **Dr. BENTOUMI Mohamed**, ainsi que tout le personnel et les enseignants du département.

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous et pour leurs encouragements.

Dédicaces

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce mémoire de Master à :

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre, Cet source de tendresse, de patience et de générosité...À ma mère !

A Mon très cher Père : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

À tous les étudiants des années d'université, Option Energétique

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1. Recherche bibliographique	
1.1. Les aciers inoxydables	2
1.1.1. Historique de l'acier inoxydable.....	2
1.1.2. Définition d'aciers inoxydables	2
1.1.3. Pourquoi utiliser l'acier inoxydable ?	4
1.1.4. Types d'aciers inoxydables et sont application.....	5
1.1.4.1. Aciers inoxydables austénitiques.....	5
1.1.4.2. Aciers inoxydables martensitiques.....	6
1.1.4.3. Aciers inoxydables ferritiques.....	7
1.1.4.4. Aciers inoxydables austéno-ferritique (duplex).....	8
1.1.5. Principales caractéristiques des aciers inoxydables.....	10
1.1.5.1. Masse volumique.....	10
1.1.5.2. Résistance à la corrosion	10
1.1.5.3. Propriétés mécaniques.....	10
1.1.5.4. Propriétés de mise en forme.....	10
1.1.5.5. Propriétés thermiques.....	10
1.1.5.6. Propriétés physiques.....	10
1.1.5.7. Propriétés électrique	10
1.1.6. Utilisations des aciers inoxydables dans la vie	11
1.1.6.1. Les aciers inoxydables dans les Industries chimiques de transformation... ..	11
1.1.6.2. L'acier inoxydable dans les applications alimentaires.....	11
1.1.6.3. L'acier inoxydable pour une architecture durable.....	11
1.1.6.4. L'acier inoxydable dans les sculptures éternelles.....	11
1.1.6.5. L'acier inoxydable dans les transports.....	12
1.1.6.6. L'acier inoxydable dans le traitement de l'eau.....	12
1.1.6.7. L'acier inoxydable dans la production d'énergie et d'électricité.....	12
1.2. Les traitements thermiques.....	12
1.2.1. Définition de traitement thermique	12
1.2.2. Cycle d'un traitement thermique.....	13
1.2.3. Notion de base des traitements thermiques.....	13
1.2.4. But et rôle des traitements thermiques.....	14
1.2.5. Différents types de traitements thermiques.....	14
1.2.6. Principaux traitements thermiques de l'acier.....	15
1.3. Spectrométrie de fluorescence X-XRF.....	17
1.3.1. Définition.....	17
1.3.2. Principe de la spectrométrie.....	17
1.4. Le laminage.....	17
1.5. Méthodes d'essai mécanique.....	20
1.5.1. Essai de dureté.....	21

1.5.2. Essai de dureté Vickers (Hv).....	21
1.5.3 Principe de mesure de dureté Vickers.....	22
1.5.4. Calcul de la dureté Vickers (Hardness Vickers : Hv)	24
1.5.5 Duromètre	25

Chapitre 2. Procédure expérimentale et discussion des résultats

2.1. Introduction.....	26
2.2. Description du matériau utilisé et préparation des échantillons.....	26
2.2.1. Laminage.....	27
2.2.2. Traitement thermique des échantillons.....	28
2.2.3. Essai de dureté	30
2.2.3.1. Essai de dureté Vickers.....	30
2.2.3.2. Définition Micro-Duromètre Q30 : Qpix Version T2.....	30
2.2.3.3. Les résultats des essais de dureté.....	32
2.3. Analyse statistique des résultats.....	32
2.3.1. Simulation et vérification de normalité.....	33
2.3.1.1. La densité de la loi normale.....	33
2.3.1.2. Les histogrammes et tableaux des valeurs.....	33
2.3.1.3. Vérification de normalité.....	37
2.3.1.4. Test de Jarque-Bera.....	38
2.3.1.4.1 Description	38
2.3.2 Étude de la dispersion des valeurs mesurées des trois échantillons.....	40
2.4. Influence de la température de recuit sur la dureté Vickers et la profondeur de Pénétration h.....	42
2.4.1. Calcul de la profondeur de pénétration h.....	42
2.4.2. Résultats et discussion.....	46
2.4.2.1 Influence de la température de recuit sur la dureté Vickers.....	46
2.4.2.2. Influence de la température de recuit sur la profondeur de pénétration <i>h</i>	47
2.5. Conclusion général.....	48
Référence bibliographique.....	49
Annexes	51

Liste des figures

Chapitre 1. Recherche bibliographique

Figure.1.1. Illustration du mécanisme de résistance à la corrosion.....	3
Figure.1.2. Les constituants de l'acier inoxydable et leurs rôles.....	4
Figure.1.3. Pourcentage des principaux éléments d'alliage.....	9
Figure .1. 4. Cycle d'un traitement thermique [12]	13
Figure.1.5. Classification des traitements thermiques [15, 16]	15
Figure.1.6. Principe de laminage.....	18
Figure.1.7. Écrouissage des grains nécessitant un recuit d'homogénéisation [20]	19
Figure.1.8. Présentation schématique du pénétrateur Vickers et de la forme empreinte.....	22
Figure .1.9. Procédure d'essai et mesure optique de l'empreinte laissée 1 diamant de forme pyramide, 2 éprouvette, F force d'essai, d ₁ et d ₂ diagonales.....	23
Figure.1.10. Exemple d'une empreinte Vickers correcte (400 X)	23
Figure.1. 11. Exemple d'une empreinte Vickers déformée (400 X)	23
Figure 1.12. Forme et dimensions de l'empreinte [25]	24

Chapitre 2. Procédure expérimentale et discussion des résultats.

Figure. 2.1. Échantillon avant laminage d'épaisseur 1mm.....	26
Figure. 2.2. Photo du laminoir utilisé (marque MES)	27
Figure. 2.3. Échantillons découpés après laminage.....	28
Figure. 2.4. Four pour traitement thermique, marque NABER-THERM gamme de température entre 30°C et 3000°C.....	28
Figure. 2.5. Photo d'échantillon à l'intérieur du four.....	29
Figure. 2.6. Échantillons après traitement thermique.....	29
Figure.2.7. Micro-Duromètre Q30, marque Qness, logiciel QpixT2 lecteur directe l'écran tactile (multi touche). Laboratoire IOMP à l'univ de Sétif.1.....	30
Figure.2.8. Micro-Duromètre avec forme de pénétrateur utilisé [29]	31
Figure.2.9. Micro-Duromètre au cours de l'exécution de la mesure en surface.....	31
Figure. 2.10. Densité de la loi normale centrée réduite N (0, 1). [30]	33
Figure.2.11. Histogramme et la fonction de densité correspondante pour échantillon non recuit.....	34
Figure.2.12. Histogramme et la fonction de densité correspondante pour échantillon recuit à 500°C.....	35
Figure.2.13. Histogramme et la fonction de densité correspondante pour échantillon recuit à 700°C.....	36
Figure. 2.14. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon non recuit.....	43
Figure.2.15. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon recuit à 400°C.....	43
Figure.2.16. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon recuit à 500°C.....	44
Figure.2.17. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon recuit à 600°C.....	44
Figure.2.18. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon recuit à700°C.....	45
Figure.2.19. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon recuit à 800°C.....	45
Figure. 2.20. Variation de H_v en fonction de la température de recuit T.....	46
Figure.2.21. Variation de la profondeur de pénétration h (μm) en fonction de la température de recuit T.....	47

Liste des tableaux

Chapitre 1. Recherche bibliographique

Tableau.1.1. Composition chimique de l'acier inoxydable austénitique.....	6
Tableau.1.2. Composition chimique de l'acier inoxydable martensitique.....	7
Tableau.1.3. Composition chimique de l'acier inoxydable ferritique.....	8
Tableau.1.4. Composition chimique de l'acier inoxydable duplex.....	9
Tableau 1.5. Les différentes méthodes d'essai mécanique	20

Chapitre 2. Procédure expérimentale et discussion des résultats.

Tableau. 2.1. Composition chimique de l'acier inoxydable, en utilisant deux essais.....	26
Tableau.2.2. Valeur moyennes des éléments constituant la composition chimique de l'acier utilisé.....	27
Tableau .2.3. Valeurs statistiques de l'échantillon de référence (non recuit)	34
Tableau .2.4. Valeurs statistiques de l'échantillon 02 recuit à 500°C pour une Durée de 4h	35
Tableau .2.5. Valeurs statistiques de l'échantillon 03 recuit à 700°C pour une Durée de 4h	36
Tableau.2.6. Valeurs de (γ_1 , γ_2 , χ_{cal}^2) des trois échantillons étudiés.....	39
Tableau.2.7. Valeurs de (χ_{cal}^2 et χ_{tab}^2) pour échantillon de référence (non recuit)	40
Tableau.2.8. Valeurs de (χ_{cal}^2 et χ_{tab}^2) pour échantillon recuit à 500°C.....	40
Tableau.2.9. Valeurs de (χ_{cal}^2 et χ_{tab}^2) pour échantillon recuit à 700°C.....	40
Tableau. 2.10. Valeurs calculées théoriquement de coefficient de variation.....	41
Tableau .2.11. Valeurs de la profondeur de pénétration h des échantillons non recuit et recuit de 400 à 800°C)	46

Résumé : Le but de ce travail est l'étude statistique de la dureté d'un acier inoxydable sous l'influence de la température du recuit thermique. A travers cette étude, nous avons abordé, en première partie, la question de savoir ce que c'est l'acier inoxydable, à quoi il est sert, le rôle des traitements thermiques.....etc. Ensuite, nous avons mesuré les paramètres nécessaires au calcul de la dureté, en l'occurrence les diagonales de l'empreinte faite par l'essai de dureté et ceci pour chaque échantillon séparément. Nous avons, en deuxième partie, fait une analyse statistique des résultats obtenus pour vérifier si nos données réelles suivent une loi normale ou non. Nous avons également étudié l'effet de la température de recuit sur la dureté Vickers et sur la profondeur de pénétration. L'interprétation des résultats obtenus montre que la distribution de la dureté suit la loi Normal. En outre, on observe une diminution de la dureté en fonction de l'augmentation la température de recuit. Cette évolution de la dureté peut s'expliquer par la modification de la structure du matériau, en particulier l'augmentation de la taille des grains, la diminution de la densité des défauts ...etc. entraînant ainsi des variations de la micro-dureté sur la surface.

Les mots clé : Dureté, Acier inoxydable, Traitement thermique, Laminage, Loi Normal.

المخلص: الهدف من هذا العمل هو الدراسة الإحصائية لصلابة الفولاذ المقاوم للصدأ تحت تأثير درجة حرارة التلدين الحراري. من خلال هذه الدراسة، تناولنا، في الجزء الأول، مسألة ماهية الفولاذ المقاوم للصدأ، ولماذا يتم استخدامه ، ودور المعالجات الحرارية... إلخ. بعد ذلك، قمنا بقياس المعاملات اللازمة لحساب الصلابة، في هذه الحالة الأقطار للمسافة البادئة التي تم إجراؤها بواسطة اختبار الصلابة وهذا لكل عينة على حدة. في الجزء الثاني، قمنا بإجراء تحليل إحصائي للنتائج التي تم الحصول عليها للتحقق مما إذا كانت بياناتنا الحقيقية تتبع التوزيع الطبيعي أم لا. درسنا أيضاً تأثير درجة حرارة التلدين على صلابة فيكرز وعلى عمق الاختراق. يوضح تفسير النتائج التي تم الحصول عليها أن توزيع الصلابة يتبع القانون العادي. بالإضافة إلى ذلك ، لوحظ انخفاض في الصلابة مع زيادة درجة حرارة التلدين. يمكن تفسير هذا التطور في الصلابة من خلال تعديل بنية المادة ، ولا سيما الزيادة في حجم الحبوب ، وتقليل كثافة العيوب ، ... إلخ، مما يتضمن اختلافات في الصلابة الدقيقة على السطح.

الكلمات المفتاحية: الصلابة ، الفولاذ المقاوم للصدأ ، المعالجة الحرارية ، الدرفلة ، القانون العادي.

Abstract: The aim of this work is the statistical study of the hardness of a stainless steel under the influence of the thermal annealing temperature. Through this study, we have addressed, in the first part, the question of what stainless steel is, what it is used for, the role of heat treatments.....etc. Then, we measured the parameters needed to calculate the hardness, in this case the diagonals of the indentation made by the hardness test and this for each sample separately. We have, in the second part, made a statistical analysis of the results obtained to check if our real data follow a normal law or not. We also studied the effect of the annealing temperature on the Vickers hardness and on the depth of penetration. The interpretation of the results obtained shows that the distribution of hardness follows the Normal law. In addition, a decrease in hardness is observed as the annealing temperature increases. This evolution of the hardness can be explained by the modification of the structure of the material, in particular the increase in the size of the grains, the reduction in the density of the defects.... etc. Thus involving variations of the micro-hardness on the surface.

Key words: Hardness, Stainless Steel, Heat Treatment, Rolling, Normal Law.

Introduction Générale

Introduction générale

Les aciers inoxydables jouent aujourd'hui un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie...etc. et ceci grâce à leur remarquable résistance à l'oxydation, qui leur rend moins sujet à la corrosion. En plus de leur inoxydabilité, ils doivent aussi, selon leur domaine d'utilisation, satisfaire à des caractéristiques mécaniques spécifiques : (dureté, ductilité, ténacité, ...).

La dureté de l'acier inoxydable est l'une des caractéristiques mécaniques nécessaire et indispensable que doit posséder l'acier, c'est une qualité physique indiquant la résistance au toucher, à la pression, au choc et à l'usure de l'acier.

La problématique de cette étude concerne l'étude de l'effet de la température sur la dureté de l'acier. En effet, des objets ou des structures en acier sont parfois exposés à des températures plus élevées (surchauffe à l'usinage, dégivrage, etc.). L'objectif est donc de déterminer l'évolution de la micro dureté en fonction de la température en faisant une étude statistique. Pour répondre à ce problème, nous avons traité notre sujet en deux chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique des aciers inoxydables : Les aciers inoxydables constituent la base d'un grand nombre de produits. Ces matériaux présentent un nombre considérable d'avantages au concepteur, et leur utilisation pour les applications de construction est de plus en plus rependue. Les systèmes constructifs en aciers inoxydables permettent l'obtention d'un haut niveau de protection contre la corrosion sans la nécessité de mesures supplémentaire. Il existe quatre familles d'aciers inoxydables : ferritiques, austénitiques, martensitiques et duplex. Ces différents matériaux offrent un éventail de qualités qui les rendent indispensables à une gamme extraordinaire d'applications industrielles, structurales, architecturales, médicales et esthétiques...etc.

Quant au deuxième chapitre, il est consacré aux procédures expérimentales et discussion des résultats. Dans cette partie, on va présenter, en particulier, la préparation des échantillons et les différentes techniques d'analyse et de caractérisation utilisées dans cette étude, ainsi qu'à l'interprétation des résultats obtenus, en utilisant le logiciel ORIGIN pour l'analyse statistique afin de vérifier la compatibilité de la distribution des valeurs de la dureté obtenus avec la loi normale. En fin, une conclusion générale est établie pour donner une vision globale de cette étude, en tenant compte des résultats obtenus.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

1.1. Les aciers inoxydables

1.1.1. Historique de l'acier inoxydable.

Le succès a de nombreux pères. Les alliages de fer et de chrome qu'on appelle couramment « aciers inoxydables », en ont effectivement quelques-uns, depuis le Suédois Axel Fredrik Cronstedt en 1751 il est découvert le nickel. Même si le chrome est l'élément essentiel pour rendre un acier résistant à la rouille, le nickel s'utilisait avant la création de l'acier inoxydable pour rendre le fer moins sujet à la corrosion, et il allait devenir un ingrédient clé de la principale famille de cet alliage. La seconde étape est la découverte du chrome par Louis Nicolas Vauquelin, un chimiste français, en 1797. Le chrome métallique, bien que cassant, se montre peu réactif aux acides [1]. En 1821 le Pierre Berthier publie les résultats de ses études sur les alliages de chrome et le ferrochrome. et le 1911 Elwood Haynes commence à entreprendre des essais portant sur les aciers au chrome aux États-Unis et détermine l'effet de cet élément sur la résistance à la corrosion par l'atmosphère et les produits chimiques. Il obtient un brevet pour son acier inoxydable en 1919, à la suite d'une demande déposée en 1915. entre des années 1904 - 1911 Léon Guillet publie ses recherches sur des alliages de fer, de chrome et de nickel qu'on classerait aujourd'hui parmi les aciers inoxydables. Albert Portevin s'appuie sur les recherches de Léon Guillet et, avec Walter Giesen, publie des informations sur des matériaux à peu près équivalents aux aciers inoxydables austénitiques, martensitiques et ferritiques d'aujourd'hui. En 1912, Alors qu'ils travaillent pour Krupp, Eduard Maurer et Benno Strauss obtiennent des brevets pour deux aciers inoxydables chrome-nickel. Et après en 1913, À Sheffield (Royaume-Uni), Harry Brearley dirige la fonte et le forgeage de lames de couteaux de table en acier inoxydable. Cette première application commerciale en préfigurera des milliers d'autres. Le décor est alors planté pour la création des aciers inoxydables [2].

1.1.2. Définition d'un acier inoxydable

De notre cuisine à l'industrie nucléaire, tout en passant par le milieu médical, les aciers inoxydables sont présents dans de nombreux aspects de notre vie quotidienne. En effet, en plus de leurs propriétés mécaniques (résistance, ductilité, ténacité), ils disposent d'une résistance remarquable à la corrosion (air, acides, eaux salées...), qui leur confère une durée de vie avantageuse dans de nombreux milieux. Mais alors, qu'est-ce véritablement qu'un acier

inoxydable ? Il s'agit d'un alliage métallique constitué majoritairement de fer, avec au moins 10,5% de chrome, essentiel à la formation d'une couche auto-régénératrice qui assure la résistance de l'acier à la corrosion. Différents éléments d'alliage y sont généralement associés, comme le nickel, le carbone (<1,2%, car il peut altérer la formation de la couche protectrice), ou encore le cuivre, pour ajuster les propriétés de l'acier en fonction des conditions dans lesquelles il sera utilisé [3].

Le chrome présent dans l'acier inoxydable réagit avec l'oxygène de l'air en produisant sur la surface de l'acier un film d'oxide ultrafin et inerte, riche en chrome. C'est ce film qui confère à l'acier inoxydable sa résistance à la corrosion. Ce film passif diffère d'autres revêtements tels que la peinture ou la galvanisation d'une façon importante : s'il est endommagé par abrasion ou autre moyen mécanique, il se reforme spontanément et continue à protéger l'acier [4].



Les aciers inoxydables, jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc.

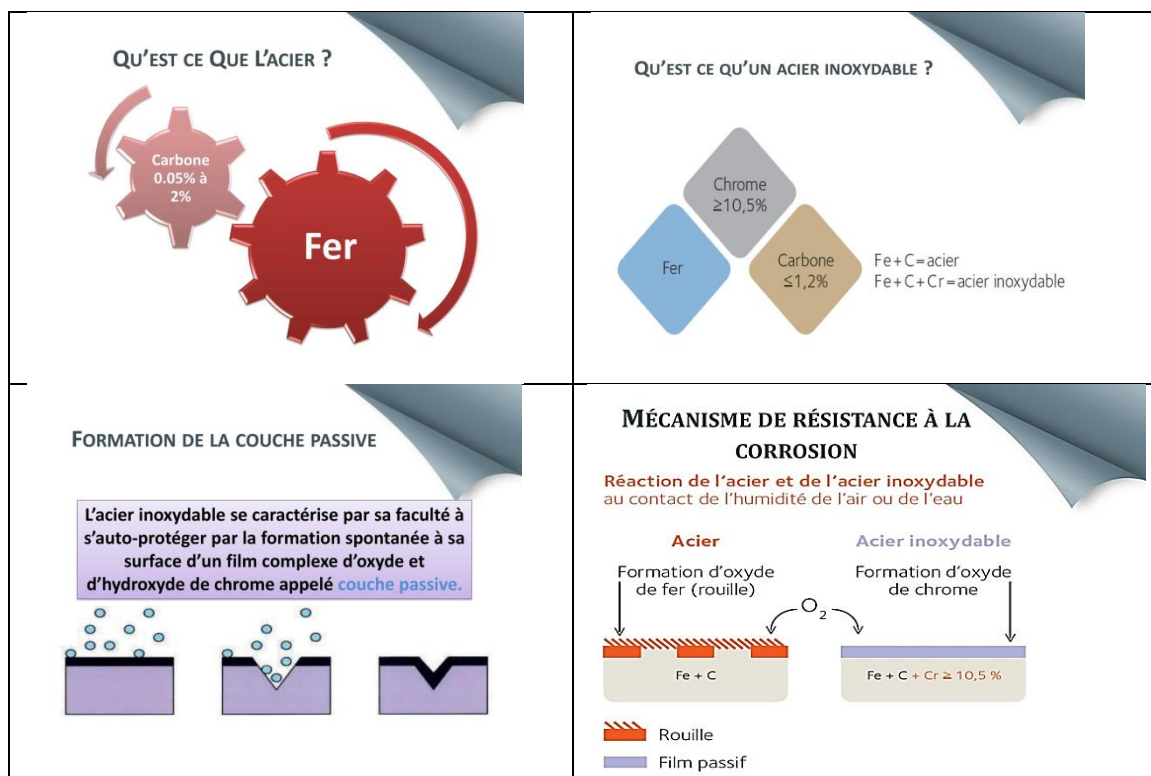


Figure.1.1. Illustration du mécanisme de résistance à la corrosion [5].

Les constituants de l'acier inoxydable & leurs rôles



Figure.1.2. Les constituants de l'acier inoxydable et leurs rôles. [6].

1.1.3. Pourquoi utiliser l'acier inoxydable ?

L'acier inoxydable a été utilisé avec succès dans l'industrie de la construction au Royaume-Uni et en Europe depuis plus de soixante-dix ans. Ses diverses utilisations ont augmenté rapidement au cours des dernières années car les avantages de l'acier inoxydable par rapport aux matériaux plus traditionnels sont désormais généralement reconnus. Les avantages que représente pour le préconisateur l'utilisation de l'acier inoxydable comprennent :

- Excellente résistance à la corrosion ;
- Caractéristiques mécaniques et ductilité élevées ;
- Magnétisme ;
- Excellentes caractéristiques à basses et hautes températures ;
- Bénéfices sur les coûts du cycle de vie des structures ;
- Traitements de surfaces esthétiques.

La prise en compte du cycle de vie dans le coût d'un projet de construction est désormais une méthode reconnue pour établir le coût réel des systèmes constructifs. L'acier inoxydable ne nécessitant aucune maintenance dans le cycle de vie de la structure, aucune mesure ne doit être prise en compte pour la réparation ou la réhabilitation de l'ouvrage.

Alors que la tendance vers une qualité de prescription plus élevée et une durée de vie des structures plus étendue se confirme, l'acier inoxydable offrira des solutions économiques à long terme aux problèmes rencontrés par les préconisateurs [4].

1.1.4. Types d'aciers inoxydables et sont application

Les différents types d'acier inoxydable sont divisés en degrés, et chacun d'eux a des propriétés différentes en termes de malléabilité, de dureté, de résistance à la corrosion, etc. Parce que contrairement à ce qu'il peut paraître par son nom, l'acier inoxydable n'est pas littéralement « inoxydable ». Ce qui le rend ainsi appelé, c'est que, par rapport à l'acier normal, il peut supporter beaucoup plus de temps et d'utilisation avant de montrer des signes d'usure. Et les différents aciers inoxydables, ils sont « inoxydables » mais ils ne sont pas de même grade [4].

Entre autres, on distingue :

- Aciers inox austénitiques,
- Aciers inox martensitiques,
- Aciers inox ferritiques,
- Aciers inox austéno-ferritique (Duplex).

1.1.4.1. Aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques présentent une excellente résistance à la corrosion. Ces aciers riches en chrome sont ductiles et ont une résistance mécanique élevée. Ils sont amagnétiques et sont formables et soudables. Le procédé d'écrouissage permet d'augmenter leur résistance mécanique, bien que cela rende parfois le métal légèrement magnétique et peut éventuellement réduire la résistance à la corrosion. Les aciers inoxydables austénitiques sont fréquemment utilisés dans l'industrie de la construction, l'industrie pharmaceutique et le secteur chimique [4].

Les aciers inoxydables austénitiques de composition Fe-Cr-Ni ont leur structure cristallographique de type cubique à faces centrées qui leur confère une ductilité et une ténacité exceptionnelle. Il faut ajouter également une excellente soudabilité métallurgique, ce qui facilite leur mise en œuvre. Ce sont les aciers inoxydables les plus utilisés, dans les industries chimiques et agro-alimentaires, pour fabriquer les couverts de table, etc. Les aciers inoxydables super austénitiques résistent à des milieux particulièrement agressifs. Leurs compositions chimiques sont adaptées pour optimiser la résistance à la corrosion vis à vis de milieux spécifiques. Outre le chrome et le nickel, ces aciers contiennent du molybdène et de l'azote [7].

➤ Applications de l'acier inoxydable austénitique

Il est utilisé dans les équipements de cuisine, les couverts, les équipements de transformation des aliments et les composants structurels des industries automobile et aérospatiale. Il est utilisé aussi dans la fabrication d'une large gamme de produits tels que les équipements de préparation des aliments, les paillasse de laboratoire, les équipements médicaux et chirurgicaux, les accessoires de bateaux, les équipements de traitement pharmaceutique, textile et chimique.

➤ Composition chimique

Tableau.1.1. Composition chimique de l'acier inoxydable austénitique [7].

Composition chimique %				
Fer	Carbone	Chrome	Molybdène	Nickel
Base	0,015 à 0,10	16 à 18	0 à 4	8 à 13

1.1.4.2. Aciers inoxydables martensitiques

La haute teneur en carbone des aciers martensitiques permet l'augmentation de la dureté par traitement thermique. Des résistances à la rupture de plus de 1300 N/mm^2 peuvent être obtenues. Ils sont magnétiques et ne sont généralement pas soudables. Bien qu'ils soient moins chers que les aciers austénitiques, leur faible résistance à la corrosion limite leur application à certains composants tels que les vannes et les lames de couteaux [4]. Pour obtenir un acier inoxydable de structure martensitique, deux conditions indispensables doivent être satisfaites :

- Présence d'une teneur en chrome supérieure à 11 % pour assurer l'inoxidabilité.

- Existence d'un domaine de température où l'acier prend la structure austénitique.

L'obtention d'une structure entièrement martensitique, après trempe, confère à ces aciers inoxydables une limite d'élasticité, une résistance à la rupture et une dureté élevée, conjuguées à une résistance à la corrosion. De tels aciers inoxydables sont utilisés pour les instruments chirurgicaux et en coutellerie [7]

➤ Applications de l'acier inoxydable martensitique

Les applications des aciers inoxydables martensitiques comprennent une large gamme de pièces et de composants, des aubes de compresseur et pièces de turbine, ustensiles de cuisine, boulons, écrous et vis, pièces de pompe et de vanne, instruments dentaires et chirurgicaux, moteurs électriques, pompes, vannes, pièces de machine instruments chirurgicaux tranchants, couverts, lames de couteaux et autres outils coupants à main.

➤ Composition chimique

Tableau.1.2. Composition chimique de l'acier inoxydable martensitique

Composition chimique %		
Fer	Carbone	Chrome
Base	0,10 à 1,2	10,5 à 17

1.1.4.3. Aciers inoxydables ferritiques

Les aciers ferritiques sont moins résistants et moins ductiles que les aciers austénitiques. Ils sont magnétiques et leur résistance mécanique peut être augmentée jusqu'à un certain niveau par écrouissage. Les aciers ferritiques courants sont comparativement économiques. Leur résistance à la corrosion localisée est inférieure à celle des aciers austénitiques, mais leur résistance à la fissuration due à la corrosion sous contrainte est supérieure. Si l'aspect est important, leur utilisation doit être réservée aux applications en intérieur [4].

Les aciers inoxydables ferritiques sont caractérisés par le fait que leur structure reste ferritique dans tout l'intervalle de température, c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas de transformation $\alpha \leftrightarrow \gamma$. Avec les aciers ferritiques, plus la teneur en chrome sera élevée et plus le risque dit de « fragilisation à 475 °C » sera grand. Ce phénomène se caractérise par une

augmentation de la dureté accompagnée d'une diminution de la ténacité par suite du maintien durant plusieurs centaines d'heures à des températures comprises entre 400 et 500 °C. [7]

➤ Applications de l'acier inoxydable ferritique

Les applications typiques des aciers inoxydables ferritiques comprennent les composants et pièces automobiles, l'industrie pétrochimique, les échangeurs de chaleur, les fours et les biens durables tels que les appareils électroménagers et les équipements alimentaires.

➤ Composition chimique

Tableau.1.3. Composition chimique de l'acier inoxydable ferritique

Composition chimique %			
Fer	Carbone	Chrome	Molybdène
Base	0,02 à 0,06	10,5 à 29	0 à 4

1.1.4.4. Aciers inoxydables austéno-ferritique (duplex)

Ces aciers ont une microstructure mixte austénitique/ferritique. Ils sont mécaniquement plus résistants que les aciers austénitiques, mais ne peuvent pas être formés aussi aisément. Ils sont magnétiques et soudables. Leur résistance à la corrosion est supérieure à celle des aciers austénitiques, plus particulièrement leur résistance à la fissuration due à la corrosion sous contrainte. Les aciers duplex sont utilisés dans l'industrie du papier, l'industrie pétro-chimique, et la construction [4].

Un alliage contenant environ 25 % de chrome et 5 % de nickel aura à la température ambiante, et après avoir subi un traitement thermique approprié, une structure formée de ferrite et d'austénite. Pour améliorer leur résistance à la corrosion, on ajoute fréquemment du molybdène ce qui conduit, corrélativement, à baisser la teneur en chrome à un niveau de l'ordre de 20 %. Ainsi, une structure de 50 % de ferrite α et 50 % d'austénite γ est formée, d'où le nom de structure duplex.

Les aciers inoxydables austéno-ferritiques présentent d'excellentes performances (ductilité, ténacité, résistance à la corrosion entre - 40 et 75 °C) [7].

➤ Applications de l'acier inoxydable duplex

L'acier inoxydable duplex est idéal pour les applications dans des environnements exigeants tels que le traitement et les équipements chimiques, pétroliers et gaziers, les environnements marins, à haute teneur en chlorure, l'industrie des pâtes et papiers, les réservoirs de cargaison pour navires et camions, et bio-usines de combustibles, réservoirs de confinement de chlorure ou sous pression, transport, tubes d'échangeur de chaleur, construction, industrie alimentaire.

➤ Composition chimique

Tableau.1.4. Composition chimique de l'acier inoxydable duplex

Composition chimique %				
Fer	Carbone	Chrome	Nickel	Molybdène
Base	0,02	22	5,5	3

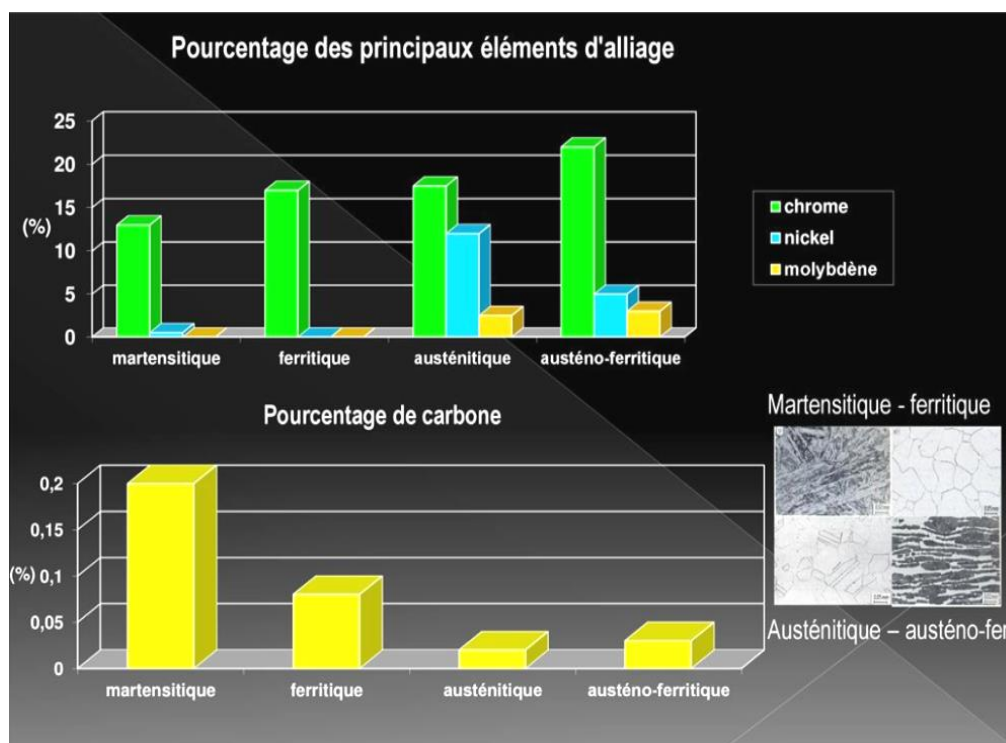


Figure.1.3. Pourcentage des principaux éléments d'alliage [8].

1.1.5. Principales caractéristiques des aciers inoxydables

1.1.5.1. Masse volumique

Les aciers inoxydables présentent une masse volumique de l'ordre de 7850 kg/m^3 .

1.1.5.2. Résistance à la corrosion

Les aciers inoxydables contiennent en général plus de 10% de chrome. Ils possèdent une résistance à la corrosion supérieure que les autres aciers standards. Deux autres éléments chimiques participent à cette résistance : le nickel et le molybdène. L'action conjuguée des éléments d'alliage a non seulement pour but d'accroître la résistance à l'oxydation, mais aussi celui d'améliorer d'autres caractéristiques telle que la soudabilité ou la résistance mécanique.

1.1.5.3. Propriétés mécaniques

L'acier inoxydable présente un module d'élasticité élevé, ce qui lui donne une très bonne rigidité (environ trois fois celle de l'aluminium), et une bonne stabilité. Son coefficient de dilatation est environ la moitié de celui de l'aluminium ce qui en fait un excellent choix dans les environnements de laboratoire typiques, où les variations de températures sont uniformes.

1.1.5.4. Propriétés de mise en forme

Les aciers inoxydables peuvent être fabriqués et transformés en utilisant un large éventail de technologies et sont entièrement "recyclables" à la fin de leur vie utile. Leur usinage est beaucoup plus difficile que celui de l'aluminium, d'où un coût considérablement plus élevé

1.1.5.5. Propriétés thermiques

Sa faible conductivité thermique en fait par ailleurs, un excellent matériau pour résoudre le problème des ponts thermiques [9].

1.1.5.6. Propriétés physiques

Ces aciers possèdent :

- Une capacité thermique de $0.5 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$ pour $T = 0^\circ\text{C}$ à 100°C ;
- Une conductivité thermique de 16.2 w/m.K à 100°C ;
- Une conductivité thermique de 21.4 w/m.K à 500°C .

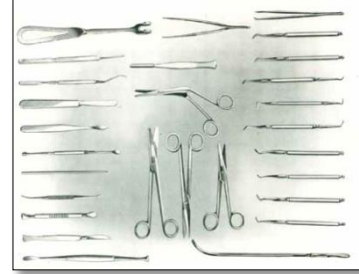
1.1.5.7. Propriétés électriques

La résistivité électrique de l'acier inoxydable est $7.4.10^{-5} \text{ ohm.cm}$ [10].

1.1.6. Utilisations des aciers inoxydables dans la vie [2]

1.1.6.1. Les aciers inoxydables dans les Industries chimiques de transformation

Les industries chimiques de transformation seraient inimaginables sans les aciers inoxydables. En effet, ils sont essentiels à la production sûre et rentable des composés pharmaceutiques, des engrais, du papier, des plastiques, des produits pétrochimiques et d'une foule d'autres biens.



1.1.6.2. L'acier inoxydable dans les applications alimentaires

L'acier inoxydable est le matériau de choix pour un large éventail d'applications allant de la vaisselle et des ustensiles de cuisine et en passant par les équipements de transformation laitière et alimentaire ni l'apparence des produits alimentaires, il ne rouille pas facilement, et ses surfaces sont faciles à nettoyer et à désinfecter. C'est tout simplement un matériau idéal.



1.1.6.3. L'acier inoxydable pour une architecture durable

Depuis plus de quatre-vingts ans, l'acier inoxydable est le matériau par excellence pour projeter une image moderne et progressive. C'est aussi un matériau de choix pour les installations de transports en commun, les équipements de sécurité et les autres applications architecturales où la durabilité constitue un critère primordial.



1.1.6.4. L'acier inoxydable dans les sculptures éternelles

Au cours des siècles, les sculpteurs ont recherché des matériaux capables de résister aux éléments et de durer pendant des générations. Enfin ils trouvèrent l'acier inoxydable.



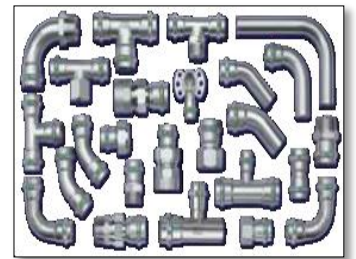
1.1.6.5. L'acier inoxydable dans les transports

L'acier inoxydable intervient dans presque tous les moyens de transports routiers, ferroviaires, maritimes et aériens. Il n'est pas rare, par exemple, de voir passer des véhicules ferroviaires en acier inoxydable transportant des voyageurs à travers la ville ou la campagne



1.1.6.6. L'acier inoxydable dans le traitement de l'eau

L'acier inoxydable joue un rôle majeur dans la manipulation, le stockage et le traitement de l'eau, qu'il s'agisse d'eau potable ou ultra pure, ou encore d'eaux usées ou de ruissellement.



1.1.6.7. L'acier inoxydable dans la production d'énergie et d'électricité.

La disponibilité permanente de l'électricité et des autres formes d'énergie est essentielle au fonctionnement de la société moderne. Depuis leur apparition il y a un siècle, les aciers inoxydables jouent un rôle clé dans l'extraction de l'énergie et dans la production d'électricité et de combustibles, et on en a de plus en plus besoin pour obtenir de l'énergie verte [2].



1.2. Les traitements thermiques

1.2.1 Définition

Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement) [11].

1.2.2 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 :

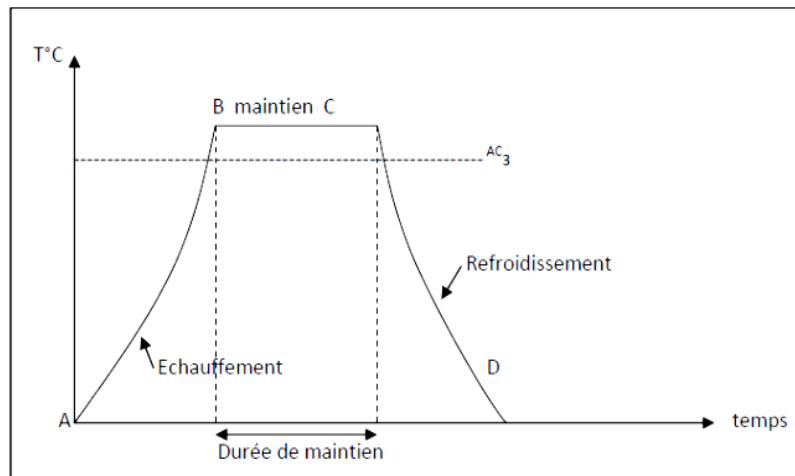


Figure .1. 4. Cycle d'un traitement thermique. [12].

AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (AC3).

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).

1.2.3. Notion de base des traitements thermiques

La connaissance des équilibres thermodynamiques et chimiques et la maîtrise des transformations des phases, diffusives ou displacives, débouche sur la possibilité d'obtenir à volonté une structure favorable à une utilisation visée grâce à des traitements thermiques. Les principaux paramètres de ces traitements sont :

- La composition du matériau traité ;

- La température de maintien, et son rapport T/T_F à la température absolue de fusion du matériau ;
- Le temps de maintien ;
- Les vitesses de chauffage et/ou de refroidissement ;
- L'atmosphère ou le milieu de traitement ;
- La profondeur de matière traitée [13].

1.2.4. But et rôle des traitements thermiques

Le but des traitements thermiques est de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables, soit pour sa mise en forme, soit pour son utilisation :

- Conférer à un matériau des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation sous forme de pièce finie.
- Augmenter la dureté et la résistance mécanique.
- Augmenter la malléabilité.
- Facilité de la mise en forme.
- Changement de la microstructure de la pièce.
- Affiner les grains et homogénéiser la structure [14].

1.2.5. Différents types de traitements thermiques

Les traitements thermiques se classent en :

- a) Traitements thermiques massiques (volumiques) : ce type de traitement a pour effet de modifier en profondeur les propriétés du matériau dans toute la masse du produit.
- b) Traitements thermiques surfaciques : il a pour but de modifier les propriétés du matériau sur une profondeur limitée. La figure suivante montre les classifications des traitements thermiques.

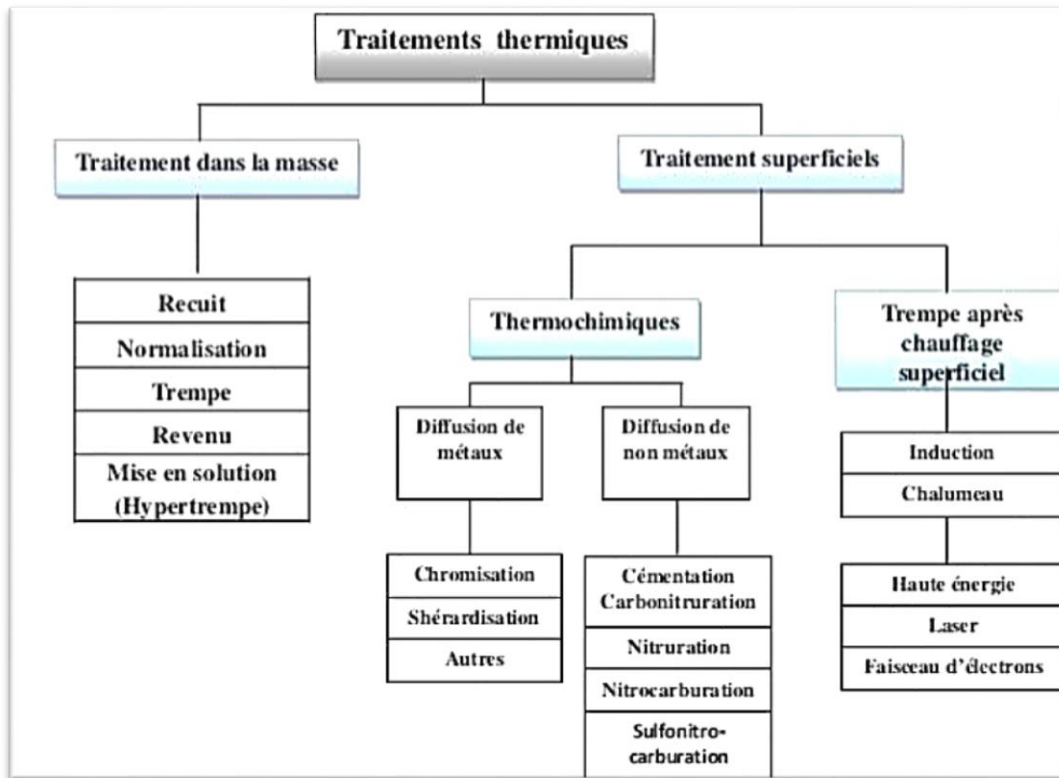


Figure.1.5. Classification des traitements thermiques [15, 16].

1.2.6. Principaux traitements thermiques de l'acier

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont :

- Le recuit ;
 - La trempe ;
 - Le revenu ;
 - La normalisation.
- **Le recuit**
- Le recuit consiste à :
- Chauffer la pièce à une température déterminée dite température de recuit (le choix de la température dépend des objectifs, elle peut aller de 450 à 1100°C) ;

- Maintenir cette pièce à cette température pendant un temps donné ;
- Refroidir à la vitesse adéquate afin d'obtenir après retour à la température ambiante un état structural du métal proche de l'état d'équilibre stable.

Le recuit permet notamment :

- D'éliminer ou réduire les contraintes résiduelles du métal liées à une action antérieure (déformation, soudure, etc.) ou un traitement thermique antérieur ;
- D'obtenir la formation d'une structure favorable à une action ultérieure (déformation, usinage, etc.) ou un traitement thermique ultérieur.

➤ **La trempe**

Elle consiste à :

- Chauffer la pièce à une température appropriée (austénitisation ou mise en solution) ;
- Maintenir cette pièce à une température bien déterminée ;
- Refroidir à une vitesse adéquate la pièce en la plongeant par exemple dans de l'eau (trempe à l'eau) ou de l'huile (trempe à l'huile) ou par insufflation d'un gaz tel que l'air. On peut évoquer également les émulsions eau polymères ainsi que certains sels (nitrates, nitrites) comme milieux de trempe. Une trempe a pour objet de durcir le métal. Elle permet d'obtenir des aciers très durs mais dans la plupart des cas peu ductiles. Elle est donc généralement suivie d'un revenu.

➤ **Le revenu**

Le revenu consiste à :

- En un ou plusieurs chauffages de la pièce à une température déterminée (inférieure à la température de début de transformation de phase de l'acier $\sim 700^{\circ}\text{C}$) ;
- Un maintien de la pièce à cette température pendant un temps donné ;
- Un refroidissement approprié.

Un revenu permet d'atténuer les effets de la trempe en rendant la pièce plus ductile et plus tenace. Il peut dans des cas particuliers permettre un durcissement secondaire. L'emploi du terme revenu sous-entend que le traitement est réalisé sur un état préalablement trempé. Un traitement à 500°C sur un acier trempé est un revenu, sur un acier non traité est un recuit.

➤ **La normalisation**

Le traitement de normalisation (équivalent d'un recuit à haute température suivi d'un refroidissement à l'air) est un traitement d'affinage structural permettant un adoucissement et

l'élimination des contraintes apparues avec les opérations précédentes. Outre l'obtention de structures homogènes recherchées dans certaines applications mécaniques il conduit à un état reproductible idéal pour la trempe. L'état dit "normaliser" est un état de livraison des produits sidérurgiques [16].

1.3. Spectrométrie de fluorescence X(XRF)

1.3.1. Définition

La spectrométrie de fluorescence X(XRF) est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres sous forme solide ou liquide. Elle permet l'analyse de tous les éléments chimiques du Béryllium (Be) à l'Uranium (U) dans des gammes de concentration allant de quelques ppm à 100%, avec des résultats précis et sur tout reproductibles.

1.3.2. Principe de la spectrométrie

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet de ces rayons X, les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, les atomes tendent alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, sous forme de photons X notamment. Chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique [17].

1.4. Le laminage

Le laminage est l'opération qui consiste à déformer un métal en le faisant passer entre deux cylindres dont l'écartement est inférieur à l'épaisseur initiale. Les deux cylindres du laminoir tournent dans des sens opposés. Les frottements qui prennent naissance entre le lingot et les cylindres forcent celui-là à avancer (figure.1.6). Pour préparer des produits plats, on utilise

des cylindres à génératrice rectiligne. Pour obtenir des produits présentant des formes particulières, on emploie des cylindres à cannelures.

La réduction d'épaisseur du lingot s'obtient de façon discontinue par passes successives dans le même laminoir dont l'écartement des cylindres est progressivement diminué, en continu en utilisant des laminoirs placés en série. Le taux de réduction que l'on peut obtenir à chaque passe dépend de la nature du métal et de la température à laquelle l'opération est effectuée.

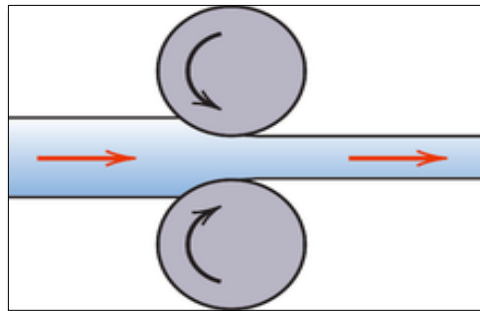


Figure.1.6. Principe de laminage

Le laminage peut être réalisé à chaud ou à froid. Le premier procédé intervient dans la phase de déformation d'acier à haute température (généralement entre 800 et 1200 °C) tandis que le laminage à froid est généralement réservé aux produits métalliques plats à un niveau de température ambiante.

a) Le laminage à chaud

Le processus permet d'attribuer aux pièces métalliques, issues de la coulée, une forme géométrique déterminée (longue, large ou épaisse). Le laminage à chaud intervient notamment dans la production de bobines, de plaques, de poutrelles, de fils ou de rondelles.

b) Le laminage à froid

Ce processus permet la transformation d'un produit métallique laminé à chaud en une bobine d'acier mince et aplatie.

Le laminage à froid a pour effet d'augmenter la résistance à la rupture et la dureté de l'acier et diminue sa ductilité (c'est-à-dire sa capacité à se déformer plastiquement de façon durable sans se casser) Lorsque l'on veut rendre au métal ses caractéristiques mécaniques, on le soumet à un recuit à une température qui dépend de la valeur des caractéristiques désirées. Ce procédé de mise en forme permet à l'acier sa recristallisation [18].

- **Le laminoir**

Un laminoir est une installation industrielle ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau (généralement du métal). Il permet également la production de barres profilées (produits longs).

- **Écrouissage et traitement thermique**

Durant le laminage, le métal subit un écrouissage (allongement du grain). L'écrouissage est donc un durcissement du métal résultant des contraintes mécaniques qu'il a subi. Ceci lui fait perdre en ductilité et en malléabilité.

Afin de redonner ses propriétés de ductilité et de malléabilité au métal, il faut procéder à un recuit. On pratique un traitement thermique d'adoucissement (recuit entre 300°C et 600°C) et d'homogénéisation. [19]

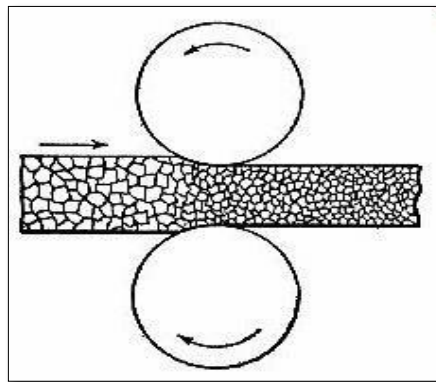


Figure.1.7. Écrouissage des grains nécessitant un recuit d'homogénéisation [20].

- **Recristallisation**

La recristallisation est un processus qui s'accomplit par chauffage permettant de remplacer les grains déformés par de nouveaux grains qui germent et grandissent jusqu'à ce que les grains d'origine aient été complètement consommés.

Le recuit de recristallisation est un processus de recuit appliqué à un métal travaillé à froid afin d'obtenir la nucléation et la croissance de nouveaux grains sans changement de phase. Ce traitement thermique permet d'éliminer les résultats de la déformation plastique intense des pièces hautement profilées formées à froid. Le recuit est efficace lorsqu'il est appliqué aux aciers durcis ou travaillés à froid, dont la structure se recristallise pour former de nouveaux grains de ferrite.

➤ Avantages

- Permet le processus de restauration par réduction ou élimination des effets de l'écroûissage (contraintes) ;
- Agrandit les grains de ferrite isométrique formés à partir des grains allongés ;
- Réduit le niveau de résistance et de dureté ;
- Augmente la ductilité.

➤ Processus

La recristallisation s'accompagne généralement d'une réduction de la résistance et de la dureté d'un matériau, ainsi qu'une augmentation simultanée de la ductilité.

La température de recristallisation des aciers se situe généralement entre 400 et 700 °C. Les conditions de recristallisation, telles que la vitesse de chauffage et le temps de maintien à température, dépendent du degré de travail à froid et de la composition de l'acier [21].

1.5. Méthodes d'essai mécanique

L'essai des matériaux étudie le comportement des matériaux soumis à différentes sollicitations. Il s'agit pour l'essentiel d'observer le rapport qui existe entre les forces appliquées et la déformation, ainsi que les sollicitations limites résultantes entraînant une défaillance des composants. Les valeurs caractéristiques obtenues par les méthodes d'essai mécanique sont utilisées dans le développement des matériaux, la conception des composants, ainsi que dans l'application de l'assurance qualité.

Afin de caractériser aussi précisément que possible les propriétés des matériaux, on dispose d'une série de méthodes d'essai normalisées [22].

Tableau 1.5. Les différentes méthodes d'essai mécanique

Propriété mécanique	Méthode d'essai
Dureté	Brinell, Rockwell, Vickers
Élasticité, plasticité : Comportement des matériaux soumis à une sollicitation statique	Essai de traction, essai de compression, essai de flexion, essai de torsion
Comportement au fluage	Essai de fluage
Ténacité	Essai de résilience
Comportement à la fatigue, résistance à la durée/aux efforts alternés	Essai de fatigue

Dans ce mémoire on étudiera uniquement l'essai de dureté et précisément l'essai de dureté Vickers (Hv) [22].

1.5.1. Essai de dureté :

La définition valable pour la dureté d'un matériau est la résistance qu'oppose un corps à la pénétration d'un autre corps plus dur. La dureté est un complément indispensable de l'examen métallographique, qui donne une première impression sur les caractéristiques mécanique et corrobore souvent l'interprétation des textures. Cet essai à la fois rapide et peu coûteux en matériaux, est réalisé à l'aide d'un Duromètre

1.5.2. Essai de dureté Vickers (Hv)

La méthode de Vickers est une méthode universelle, deux avantages exclusifs la préfèrent aux autres procédés. D'un côté, elle permet d'effectuer des essais sur tous les métaux durs (aciers inoxydable, aciers trempés, aciers cyanurés etc.) et les alliages légers ; et de l'autre côté, elle permet d'effectuer des essais sur les pièces extra-minces ayant jusqu'à 0.05 mm d'épaisseur, seulement il faut dans ce cas choisir la charge appropriée pour que la diagonale soit au moins égale à l'épaisseur de la pièce à contrôler [23].

➤ Pourquoi choisir la méthode Vickers ?

La méthode Vickers est une technique de test de microdureté. Elle est en effet adaptée à tous les matériaux solides et métalliques et à toutes les plages de dureté de 10 gf à 100 kgf.

Elle utilise une pyramide pénétrante en diamant à base carrée avec une charge fixe. Un instrument optique mesure la marque de l'empreinte. Cette technique permet des charges d'essai légères ainsi que des charges macro allant jusqu'à 30 kg.

Cette technique à des avantages :

- La plage de mesure est très étendue. Cette méthode permet de tester tous les types de matériaux, qu'ils soient particulièrement tendres ou durs ;
- Le test est facile à réaliser ;
- Les calculs sont indépendants de la taille de la pyramide de diamant ;
- Le même pénétrateur permet de mesurer des matériaux de duretés différentes ;
- Cette technique est parfaite pour les tests de laboratoire.

Mais elle a aussi des inconvénients :

- C'est un procédé long car l'empreinte sur la surface se mesure de manière optique, avec un microscope par exemple, ce qui peut être source d'erreur ;
- Comme pour la méthode Brinell, la surface de l'échantillon doit être bien préparée ;
- Sur certains matériaux, la mesure de la marque est moins lisible en raison de la répartition irrégulière de la charge d'essai par la pyramide (la charge est plus forte sur les bords que sur les côtés) [22].

1.5.3 Principe de mesure de dureté Vickers

L'essai de dureté Vickers consiste à appliquer une charge en douceur, sans impact, en enfonçant un pénétrateur en diamant de forme pyramidale, à l'intérieur d'un échantillon, comme le montre la Figure.1. 8. Le diamant Vickers laisse une empreinte de forme pyramidale avec une base carrée et une profondeur d'environ 1/7ème de la longueur de la diagonale. Le pénétrateur est maintenu en place pendant 10 à 15 secondes avant d'être relâché complètement.

On mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de l'empreinte, et on fait la moyenne des deux valeurs pour déterminer la diagonale de l'empreinte. La dureté Vickers est le quotient de la force d'essai par la surface de l'empreinte Figure. 1.9.

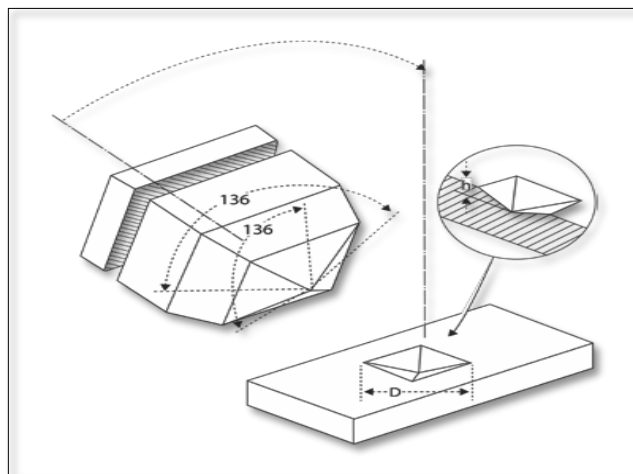


Figure .1.8. Présentation schématique du pénétrateur Vickers et de la forme d'une empreinte. [22].

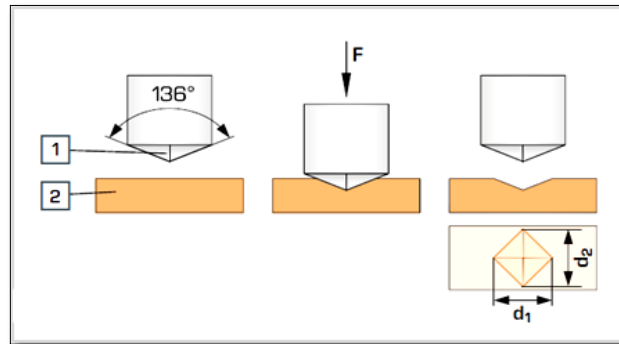


Figure .1.9. Procédure d’essai et mesure optique de l’empreinte laissée
1 diamant de forme pyramide, 2 éprouvette, F force d’essai, d_1 et d_2 diagonales.

Dans l’essai de dureté Vickers, il est généralement admis que le retrait de la charge n’est pas suivi par un retour élastique – un phénomène qui n’est pourtant pas à exclure et dont l’influence est très marquée dans certains cas. En général, l’empreinte (Figure.1.10) présente une forme carrée, avec deux diagonales de longueur similaire. Le calcul de la dureté Vickers repose sur la surface de l’empreinte plutôt que de la surface projetée. Si toutefois le retour élastique a provoqué une déformation de l’empreinte (phénomène très fréquent avec les matériaux anisotropes) (voir Figure. 1.11), la valeur de dureté doit-elle se baser sur la moyenne des deux diagonales. Malgré le peu d’études rigoureuses consacrées à cette question, la mesure des diagonales est cependant la méthode privilégiée actuellement, même dans le cas d’empreintes déformées [24].

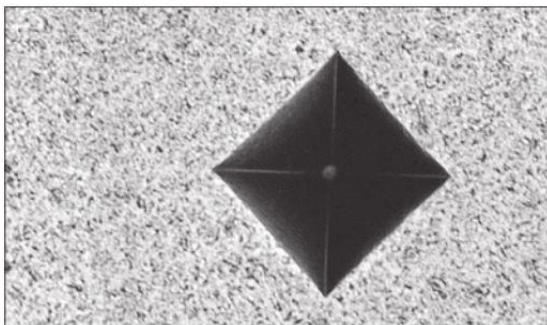


Figure.1.10. Exemple d’une empreinte Vickers correcte (400 X).

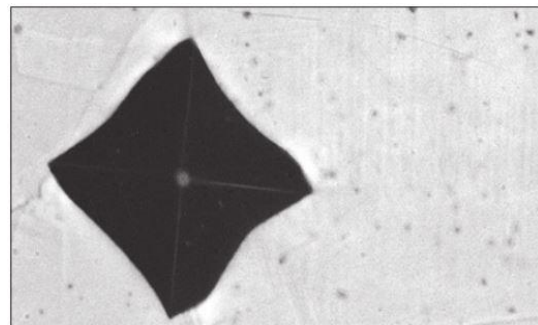


Figure.1. 11. Exemple d’une empreinte Vickers déformée (400 X).

1.5.4. Calcul de la dureté Vickers (Hardness Vickers : Hv)

Dans la méthode Vickers, que nous avons employée, le pénétrateur est une pyramide en diamant à base carrée dont l'angle au sommet entre deux faces triangulaires vaut 136° . La dureté Vickers (Vickers Hardness) est alors définie par le rapport : $H_v = F/S$

Avec :

F : la charge appliquée (en Newton) par le pénétrateur

S : la surface latérale (en mm^2) de l'empreinte pyramidale [23].

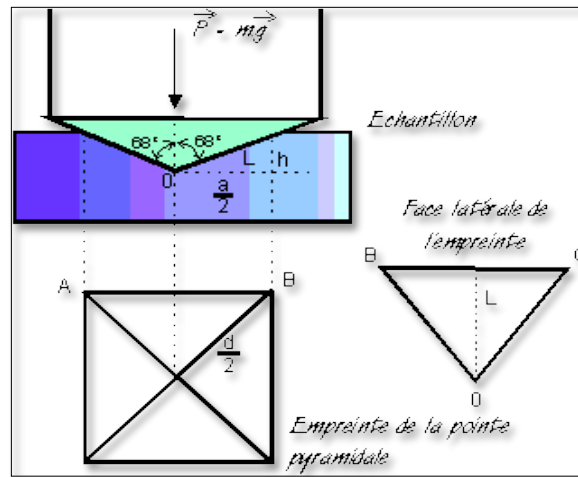


Figure 1.12. Forme et dimensions de l'empreinte [25].

La surface latérale de l'empreinte étant :

$$S = 4 \cdot L \cdot a/2 \tag{1.2}$$

Avec : $L = a / (2 \cdot \sin 68^\circ)$ et $a = d / \sqrt{2}$,

Alors: $S = d^2 / (2 \cdot \sin 68^\circ)$

$$\text{Soit : } H_v = 0,189 \cdot F/d^2 \tag{1.3}$$

Avec F en N et d ($d = (d_1 + d_2) / 2$) en mm

Il est intéressant de connaître la profondeur de pénétration h de la pyramide dans le matériau.

Sa valeur est.

$$h = a / (2 \cdot \tan 68^\circ) = d / (2\sqrt{2} \tan 68^\circ) \quad (1.4)$$

Soit :
$$h = d/7 \quad (1.5)$$

Il suffit de mesurer la longueur d de la diagonale de la base carrée de l'empreinte pour accéder à la valeur de la dureté Vickers. En pratique, on mesure les longueurs d_1 et d_2 des deux diagonales et on en prend la valeur moyenne [23].

1.5.5. Duromètre

Un Duromètre est un instrument de mesure qui sert à évaluer la rigidité ou la résistance d'un matériau.

Utilisé dans le cadre d'essai de dureté, Le Duromètre permet de déterminer la résistance d'un matériau à une déformation au moyen d'un outil plus dur, le plus souvent un cône en diamant ou une bille en acier, qui vient pénétrer la surface du matériau à tester. Le Duromètre mesure alors la profondeur de pénétration de l'outil et l'empreinte laissée par ce dernier sur la surface de l'échantillon.

Le Duromètre est un outil très utile au cours du processus de production, car il aide à assurer des produits respectent toujours les valeurs de dureté requise [26].

Chapitre 2

Chapitre 2 : Procédure expérimentale et discussion des résultats

2.1. Introduction

Dans cette partie, on va présenter la procédure expérimentale, en particulier la préparation des échantillons et les différentes techniques d'analyse et de caractérisation utilisées dans cette étude, ainsi que l'interprétation et la discussion des résultats obtenus, en utilisant le logiciel ORIGIN (version 2018) pour l'analyse statistique afin d'examiner la compatibilité de la distribution des valeurs de la dureté obtenus avec la loi normale.

2.2. Description du matériau utilisé et préparation des échantillons

La matière brute utilisée dans cette étude est une tôle d'acier inoxydable d'épaisseur 1mm (Figure. 2.1).



Figure. 2.1. Echantillon avant laminage d'épaisseur 1mm.

Avant d'engager à la préparation et l'élaboration de nos échantillons, on a commencé par une analyse de la composition chimique du matériau étudié. Nous avons utilisé la technique de spectrométrie par fluorescence X (XRF), décrite au premier chapitre, au niveau du laboratoire de la société nationale SANIAK, BCR Ain-El-Kebira, Sétif.

Pour minimiser les erreurs de mesure, nous avons fait deux essais. La composition chimique obtenue ainsi que celles des valeurs moyennes sont rapportées dans les tableaux suivants :

Tableau. 2.1. Composition chimique de l'acier inoxydable, en utilisant deux essais.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,0708	0,354	0,42	0,025	0,005	15,66	0,0415	0,143	0,0051	0,028
0,0706	0,353	0,41	0,027	0,0054	15,38	0,0441	0,143	0,0054	0,029
Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	As	B	N	Fe
0,069	0,0121	0	0,1012	0,0033	0,0066	0,0072	0,0001	>0,0600	83
0,051	0,0149	0	0,1016	0,0036	0,0066	0,0075	0,0002	>0,0600	83,29

Chapitre 2. Procédure expérimentale et discussion des résultats

Tableau. 2.2. Valeur moyennes des éléments constituant la composition chimique de l'acier utilisé.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,0707	0,354	0,41	0,0026	0,0052	15,52	0,0428	0,143	0,0052	0,029
Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	As	B	N	Fe
0,06	0,0135	<0,0010	0,1014	<0,0050	0,0066	0,0073	<0,0005	>0,0600	83,14

D'après les valeurs moyennes données par le tableau 2.2, on remarque que l'acier inoxydable utilisé dans notre étude est composé de deux éléments essentiels : le Fer (Fe) et le chrome(Cr) d'un taux de 83,14 % et 15,52 % respectivement.

2.2.1. Laminage

Après le découpage de la tôle en petites bandes de 10 mm de largeur, celles-ci sont laminées à froid en utilisant un laminoir du laboratoire de l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision (IOMP) de l'université de Sétif 1 (Figure.2.2).

Après chaque passe on doit nettoyer la partie active des deux cylindres du laminoir.



Figure. 2.2. Photo du laminoir utilisé (marque MES).

On a choisi un taux de déformation faible d'ordre 20%, qui correspond à une épaisseur finale $e_f \approx 0.8$ mm, obtenu à partir de la relation suivante :

$$\varepsilon = \ln (e_i / e_f) \quad (2.1)$$

Où : ε : taux de déformation rationnel ;

$e_i \approx 1\text{mm}$: épaisseur initiale (avant déformation) ;

e_f : épaisseur finale (après déformation) [27].

2.2.2. Traitement thermique des échantillons

Après l'opération de laminage, toutes ces bandes sont découpées en petits échantillons de dimensions 10x10 mm (Figure. 2.3), ensuite ils sont polis sur les bords afin d'éliminer les arrêtes vifs provoquées par le découpage et d'améliorer l'état de surfaces des échantillons utilisés.



Figure. 2.3. Echantillons découpés après laminage.

Ces échantillons ont subi un traitement de recristallisation pendant 4 heures dans un four électrique de marque NABERTHERM avec une gamme de température comprise entre 30°C et 3000°C du laboratoire des sciences de la matière (Université de bordj Bou Arreridj). (Figure.2.4).



Figure. 2.4. Four pour traitement thermique, marque NABERTHERM gamme de température entre 30°C et 3000°C.

- **Le recuit**

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage des l'échantillon à des températures variantes de 400 à 800°C avec un pas de 100°C pendant un temps de maintien égal à 4heurs.

Dans ce four, l'échantillon est chauffé par production de la chaleur dans l'échantillon, c'est-à-dire chauffage par résistance, cette méthode est utilisée surtout pour les échantillons uniformes et de petites sections. Afin de résister à la température du recuit et ne pas faire fondre l'acier inoxydable à l'intérieur du four, nous avons mis les échantillons dans des coupes de porcelaine (figure.2.5).



Figure. 2.5. Photo d'échantillon à l'intérieur du four

- **Refroidissement.**

On a utilisé un refroidît lent dans le four pour tous les échantillons traités.

Les échantillons après traitement thermique sont représentés sur la figure. 2.6.

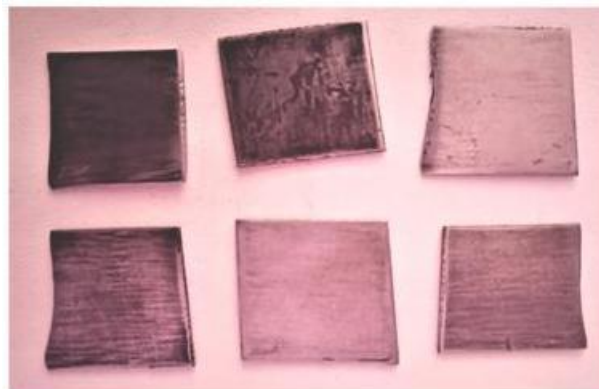


Figure. 2.6. Échantillons après traitement thermique

Chapitre 2. Procédure expérimentale et discussion des résultats

Pour obtenir des surfaces bien polies nécessaires à l'essai de micro dureté, de façon à ce qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de gêner la pénétration de l'outil, nous avons effectué un polissage et un nettoyage à tous nos échantillons.

2. 2.3 Essai de dureté

Dans ce projet on étudiera uniquement l'essai de Vickers.

2.2.3.1 Essai de dureté Vickers

Le procédé Vickers est également utilisé sur des appareils de laboratoire pour la mesure de micro duretés.

Nous avons utilisé dans cet essai le Micro-duromètre Q30 logiciel Qpix Version T2.



Figure.2.7. Micro-Duromètre Q30, marque Qness, logiciel QpixT2

Lecteur directe l'écran tactile (multi touche). Laboratoire IOMP à l'Univ de Sétif.1.

2.2.3.2. Définition Micro-duromètre Q30 : Qpix Version T2

Logiciel de test de dureté en un aperçu clair de toutes les fonctions les plus importantes sur un seul écran garantit la convivialité et, surtout, garantit que les résultats des tests sont clairement hiérarchisés.

Il y a deux méthodes de mesure :

- Méthode de Vickers indentation pyramide l'angle 136° ;

Chapitre 2. Procédure expérimentale et discussion des résultats

- Méthode brinell indenture bille $d=2.5\text{mm}$.

Pour ce projet nous utilisons la méthode de Vickers [28].

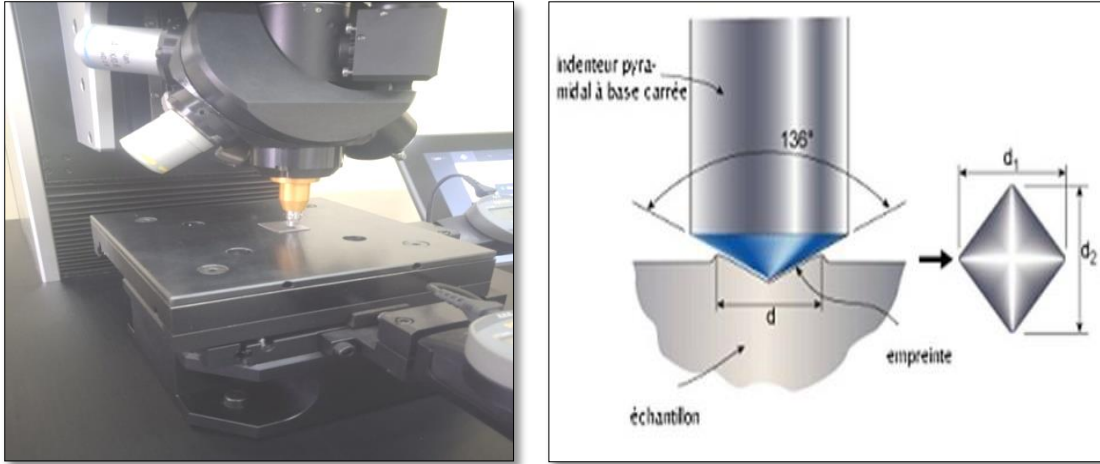


Figure.2.8. Micro Duromètre avec forme de pénétrateur utilisé [29].

Le pénétrateur est ici une pyramide en diamant à base carrée d'angle au sommet est de 136° , appliquée sur la surface d'acier inoxydable à tester avec une charge de : ($F=0.0025\text{N}$ à 300N) pendant un temps donné.

Dans notre étude nous avons utilisé une charge $F=2\text{N}$ pendant un temps de 10 sec.

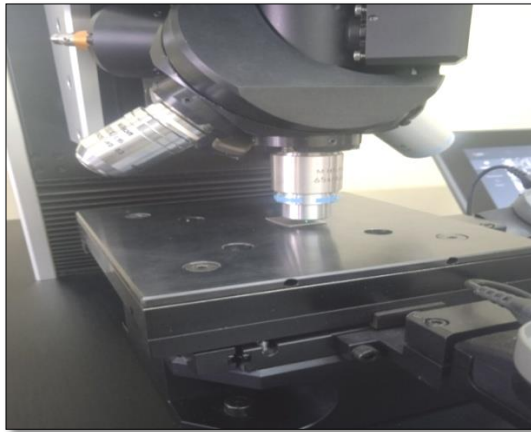


Figure.2.9. Micro-duromètre au cours de l'exécution de la mesure en surface.

La tourelle est composée :

- Objectifs : 10x.40x.65x.100x
- Oculaire : 10x

Grossissement : maximal 1000x plus zoom 4x [28].

2.2.3.3. Les résultats des essais de dureté

Les résultats de l'essai de dureté réalisé au niveau de l'institut OMP à l'université de Sétif 1 sont regroupés et ordonnés dans les tableaux 1 et 2 (voir les annexes).

2.3. Analyse statistique des résultats

Pour vérifier la normalité de la distribution de résultats trouvés expérimentalement, on utilise le test de **Khi-Deux**.

➤ Etapes de vérification

1. Ordonner les valeurs de mesurage de l'ordre croissant
2. Calculer l'étendue :

$$E_{HV} = H_{V \max} - H_{V \min} \quad (2.2)$$

3. Calculez le nombre de classes :

$$K = K_{\min} \dots \dots K^* \quad (2.3)$$

$$K_{\min} = 1 + \frac{10}{3} \log n \quad (2.4)$$

$$K^* = 5 \log n \quad (2.5)$$

4. Calculez l'intervalle de classe :

$$\Delta_{Hv} = \frac{EHV}{K-1} \quad (2.6)$$

5. Déterminer les limites de classe :

$$H_{V0} = H_{V \min} - \frac{\Delta_{Hv}}{2} \quad (2.7)$$

$$H_{Vj} = H_{V0} + j \Delta_{Hv} \quad (2.8)$$

2.3.1. Simulation et vérification de normalité

2.3.1.1. La densité de la loi normale

Loi gaussienne (ou normale) de paramètres $\mu \in \mathbb{R}$ et $\sigma > 0$ et on note $X \sim N(\mu, \sigma)$ si X possède la densité.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.9)$$

σ : Écart type. μ : Moyenne

Dans le cas où $\mu = 0$ et $\sigma = 1$, on dit aussi que X suit la loi normale centrée réduite.

La densité normale centrée réduite est représentée sur la figure. 2. 10. [30].

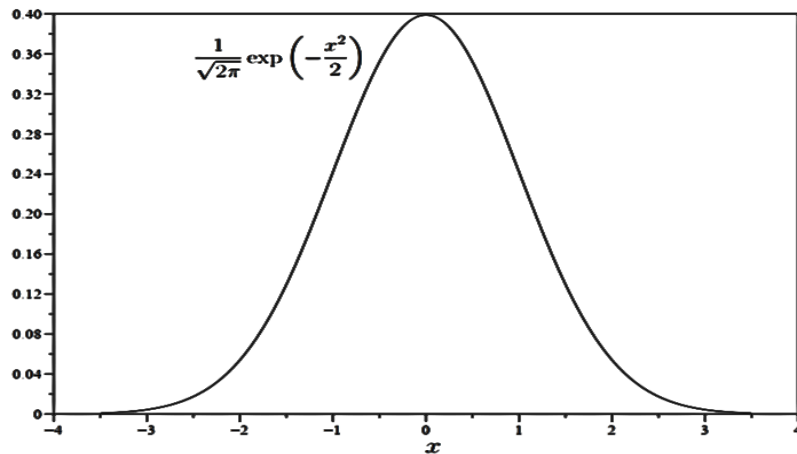


Figure. 2.10. Densité de la loi normale centrée réduite $N(0, 1)$. [30]

2.3.1.2. Histogrammes et tableaux des valeurs

L'outil graphique le plus simple est l'histogramme de fréquence. Il s'agit de couper automatiquement l'intervalle de définition de la variable en k intervalles de largeur égales, puis de produire une série de barres dont la hauteur est proportionnelle à l'effectif associé à l'intervalle. Dans la plupart des logiciels, le nombre k d'intervalles est défini de manière arbitraire, dans d'autres il est paramétrable. Une règle simple pour définir le bon nombre d'intervalles est d'utiliser la règle de Sturdj :

$$K_{\min} = 1 + \frac{10}{3} \log n \quad (2.10)$$

Certains logiciels procèdent automatiquement à l'estimation des deux principaux paramètres de la loi normale (μ la moyenne, σ l'écart-type) et tracent la fonction de densité

correspondante pour apprécier le rapprochement entre la distribution empirique (histogramme) et la distribution théorique.

Pour pouvoir donner une indication sur la loi suivie à priori, on doit répartir les mesures en classe égales d'intervalle et les représentés graphiquement, ainsi on a obtenu les figure (2.11- 2.13) des trois échantillons analysés. Données par le logiciel utilisé.

a) Histogramme, la fonction de densité correspondante et tableau des valeurs statistiques obtenues pour l'échantillon non recuit

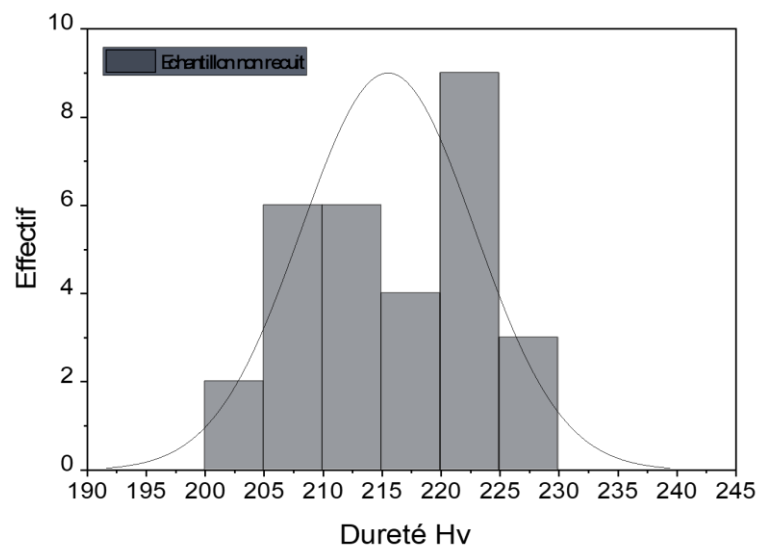


Figure.2.11. Histogramme et la fonction de densité correspondante pour échantillon non recuit

Tableau .2.3. Valeurs statistiques de l'échantillon de référence (non recuit)

Mean	Moyenne : μ	215,5
Standard Deviation	Écart-type : σ_x	7,35
Skewness	Asymétrie γ_1	-0,21
Kurtosis	Aplatissement : γ_2	-0,88
Coefficient of Variation	Coefficient de variation : C_v	0,03
Minimum	Minimum : Hv_{\min}	200
Median	Médiane : Med	216,5
Maximum	Maximum : Hv_{\max}	228

b) Histogramme, la fonction de densité correspondante et tableau des valeurs statistiques obtenues pour l'échantillon recuit à 500°C

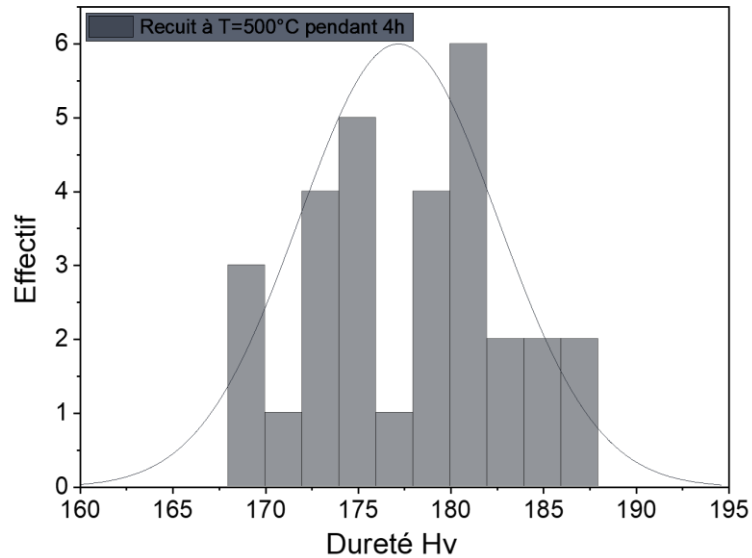


Figure.2.12. Histogramme et la fonction de densité correspondante pour échantillon recuit à 500°C

Tableau .2.4. Valeurs statistiques de l'échantillon 02 recuit à 500°C pour une durée de 4h.

Mean	Moyenne : μ	177,17
Standard Deviation	Écart-type : σ_x	5,35
Skewness	Asymétrie : γ_1	0,05
Kurtosis	Aplatissement : γ_2	-0,83
Coefficient of Variation	Coefficient de variation : C_v	0,03
Minimum	Minimum : Hv_{\min}	168
Median	Médiane : Med	178
Maximum	Maximum : Hv_{\max}	187

c) Histogramme, la fonction de densité correspondante et tableau des valeurs statistiques obtenues pour l'échantillon recuit à 700°C.

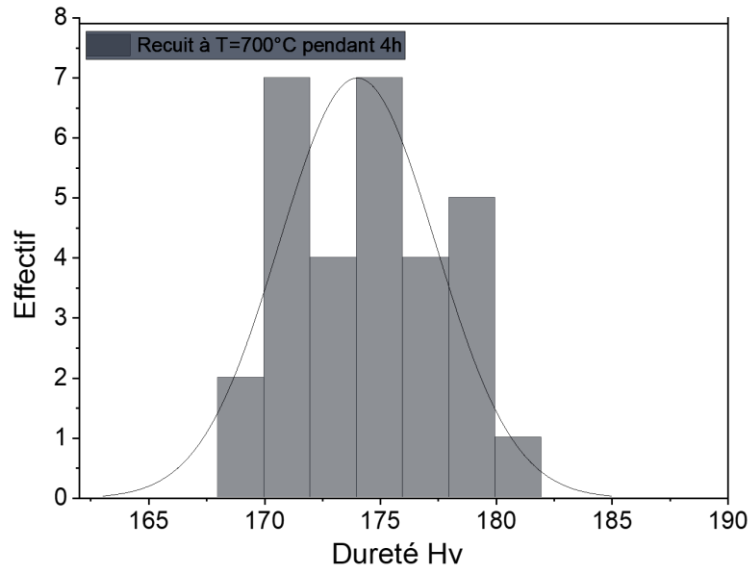


Figure.2.13. Histogramme et la fonction de densité correspondante pour échantillon recuit à 700°C

Tableau .2.5. Valeurs statistiques de l'échantillon 03 recuit à 700°C pour une durée de 4h.

Mean	Moyenne : μ	174
Standard Deviation	Écart-type : σ_x	3,37
Skewness	Asymétrie : γ_1	0,21
Kurtosis	Aplatissement : γ_2	-0,75
Coefficient of Variation	Coefficient de variation : C_v	0,02
Minimum	Minimum : Hv_{\min}	168
Median	Médiane : Med	174
Maximum	Maximum : Hv_{\max}	181

2.3.1.3. Vérification de la normalité

a) Généralités sur les lois statistiques

En pratique, lorsque l'on utilise les lois statistiques, on suppose que la distribution recueillie soit normale, binomiale, de poisson ... Il est donc essentiel de posséder des outils permettant de vérifier qu'une distribution donnée peut être, sans trop d'inexactitude, assimilée à une des lois théoriques que nous avons étudiées. Ces outils sont des tests qui mesurent l'écart entre la distribution théorique et les valeurs de l'échantillon étudié.

Il existe de nombreux tests (Khi-Deux, Kolmogorov-Smirnov, Student, Fisher...) mais nous n'étudierons ici que celui du Khi-Deux (noté χ^2) car c'est le plus important de par sa généralité qui lui permet d'être appliqué à n'importe quelle distribution théorique.

b) Principe du test

La formulation algébrique de la loi du KHI-DEUX étant inutilisable facilement, nous allons utiliser des tables statistiques(Annexe1). Pour déterminer la valeur critique, nous avons besoin au préalable de calculer le nombre de degrés de liberté (ν) et de nous fixer un seuil de signification noté P.

c) Détermination du nombre de degrés de liberté

Soit ν le nombre de degrés de liberté et k le nombre de modalités ou nombre d'effectif (lignes) du tableau.

$\nu = k - 1$ quand on peut calculer les effectifs théoriques sans avoir à utiliser de loi statistique.

$\nu = k - 1 - m$ quand on doit utiliser une loi pour calculer les effectifs théoriques ; m étant le nombre de Paramètres de la loi ($m=2$ pour la loi Normale, $m=1$ pour la loi de Poisson et autre lois). Dans cette hypothèse en utilise la loi normale $m=2$ et $k=19$ pour échantillons 01(non recuit). Donc le nombre de degré de liberté est égal : $\nu = 19 - 1 - 2 = 16$.

En va calculer la loi de khi deux à partir de tableau de khi deux $\chi^2(\nu, \alpha)$.

Exemple : Trouvons le quantile d'ordre 0.975 de la loi du Khi-Deux avec 16 degrés de liberté. On pose $1 - \alpha = 0,975$. On a donc $\alpha = 1 - 0,975 = 0,025$. Dans la table d'ordre $1 - \alpha$, le quantile d'ordre 0.975 de la loi du khi-deux avec 16 degrés de liberté se trouve donc à

l'intersection de la ligne « $v = 16$ » avec la colonne « $\alpha = 0,025$ ». On obtient la valeur 28.85.

Ce quantile est habituellement dénoté $\chi^2_{(16, 0,975)}$. On a donc $\chi^2_{(16, 0,975)} = 28.85$.

Le même travail pour les autres échantillons (voir les tableaux ci-dessous) [31].

2.3.1.4. Test de Jarque-Bera

2.3.1.4.1 Description

Le test de normalité de Jarque-Bera est également fondé sur les coefficients d'asymétrie (γ_1) et d'aplatissement (γ_2). Il évalue les écarts simultanés de ces coefficients avec les valeurs de référence de la loi normale. La formulation est très simple par rapport au d'autre test.

On propose les estimateurs :

$$\gamma_1 = \mu_3/\sigma^3 = \frac{\frac{1}{n}\sum_i(x_i-\bar{x})^3}{\left[\frac{1}{n}\sum_i(x_i-\bar{x})^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.11)$$

$$\gamma_2 = \mu_4/\sigma^4 = \frac{\frac{1}{n}\sum_i(x_i-\bar{x})^4}{\left[\frac{1}{n}\sum_i(x_i-\bar{x})^2\right]^2} \quad (2.12)$$

Où : γ_1 : Le coefficient d'asymétrie (Skewness en anglais)

γ_2 : Le coefficient d'aplatissement (Kurtosis en anglais)

La seule différence avec ceux de Fisher est que le second coefficient n'est pas normalisé, c.-à-d. $\gamma_2 = 3$, pour la loi normale.

Les deux coefficients (Skewness et Kurtosis) permettent de comparer une distribution à une distribution normale, pour cela, on pose l'hypothèse suivante :

H_0 : Skewness = 0 et Kurtosis -3 = 0.

Pour tester cette hypothèse, on va utiliser la formule suivante [32].

$$\chi^2 = \left(\gamma_1 \cdot \sqrt{\frac{6}{N}} \right)^2 + \left((\gamma_2 - 3) \cdot \sqrt{\frac{24}{N}} \right)^2 \quad (2.13)$$

Le tableau ci-dessous englobe les valeurs de $(\gamma_1, \gamma_2, \chi_{cal}^2)$.

Tableau.2.6. Valeurs de $(\gamma_1, \gamma_2, \chi_{cal}^2)$ des trois échantillons étudiés.

Température de recuit pendant 4 Heures	Non recuit	500°C	700°C
γ_1	-0.214	0.053	0.214
γ_2	-0.878	-0.827	-0.7
χ_{cal}^2	12.48	11.90	11.29

Si $\chi_{cal}^2 < \chi_{tab}^2$ à $(k-2-1)$ degrés de liberté ceci implique que la distribution est normale.

- **La région critique**

$$K^*(\chi^2) = \{ \chi^2 / \chi^2 > \chi^2_{(k-m-1, 1-\alpha)} \} \quad (2.14)$$

k : nombre de modalité

m : nombre de paramètres estimés

m =2(la moyenne ; l'écart type)

$\chi^2_{(k-m-1, 1-\alpha)}$ est donnée par la table des valeurs de distribution de Khi deux (Annexe I)

- **Décision**

- Si χ^2 appartient à $K^*(\chi^2)$: On rejette l'hypothèse H_0 c'est-à-dire que la répartition n'est pas normale.
- Si χ^2 n'appartient pas à $K^*(\chi^2)$: On accepte l'hypothèse H_0 et la répartition est normale.

La région critique pour un risque α du test est définie par :

R.C :
$$T > \chi^2_{(1-\alpha)} \quad (2.15)$$

Chapitre 2. Procédure expérimentale et discussion des résultats

Pour un risque $\alpha = 0.05$, le seuil critique est : $\chi^2_{(16; 0,95)} = 26.30$

Les tableaux ci-dessous englobe les valeurs de (χ^2_{cal} et χ^2_{tab}) des trois échantillons pour différentes valeurs de α -intervalle de confiance- variant de 0.005 à 0.25.

Tableau.2.7. Valeurs de (χ^2_{cal} et χ^2_{tab}) pour échantillon de référence (non recuit).

χ^2_{cal}	$\chi^2_{(16; 0,75)}$	$\chi^2_{(16; 0,90)}$	$\chi^2_{(16; 0,95)}$	$\chi^2_{(16; 0,975)}$	$\chi^2_{(16; 0,99)}$	$\chi^2_{(16; 0,995)}$
12.48	19.4	23.54	26.30	28.85	32	34.27

Tableau.2.8. Valeurs de (χ^2_{cal} et χ^2_{tab}) pour échantillon recuit à 500°C.

χ^2_{cal}	$\chi^2_{(12; 0,75)}$	$\chi^2_{(12; 0,90)}$	$\chi^2_{(12; 0,95)}$	$\chi^2_{(12; 0,975)}$	$\chi^2_{(12; 0,99)}$	$\chi^2_{(12; 0,995)}$
11.90	14.8	18.5	21	23.3	26.2	28.3

Tableau.2.9. Valeurs de (χ^2_{cal} et χ^2_{tab}) pour échantillon recuit à 700°C.

χ^2_{cal}	$\chi^2_{(9; 0,75)}$	$\chi^2_{(9; 0,90)}$	$\chi^2_{(9; 0,95)}$	$\chi^2_{(9; 0,975)}$	$\chi^2_{(9; 0,99)}$	$\chi^2_{(9; 0,995)}$
11.29	11.4	14.7	16.9	19	21.7	23.6

Dans toute notre étude, la statistique T est largement inférieure à χ^2_{tab} , pour toute valeurs de α comprise entre 0.005 et 0.25. La distribution observée est donc compatible avec une distribution théorique normale.

Il est à noter que le degré d'asymétrie et d'aplatissement de la série statistique étudié, ressemble à celle d'une distribution normale - en cloche - ($\gamma_1 = 0$ et $\gamma_2 < 3$).

2.3.2. Étude de la dispersion des valeurs mesurées des trois échantillons

Le coefficient de variation (écart type relatif) est une mesure statistique de la dispersion des points des données autour de la moyenne. Il est couramment utilisé pour comparer la dispersion des données entre des séries distinctes de données et qui n'ont pas la même valeur moyenne. Le coefficient de variation est défini comme le rapport entre l'écart-type et la moyenne en valeur absolue.

$$C_v = \frac{\sigma_x}{\mu} \times 100 \quad (2.16)$$

Avec σ : Écart type et μ : La moyenne

Le coefficient de variation est un nombre sans unité permettant de comparer les dispersions de toutes les distributions quelle que soit la nature des variables observées.

Le tableau 2.12 donne les valeurs du coefficient de variation calculer théoriquement selon les paramètres (σ : Écart type et μ : Moyenne) données par le logiciel utilisé (origine version 2018) [33].

Tableau. 2.10. Valeurs calculées théoriquement de coefficient de variation.

Echantillons	Coefficient de variation C_v	C_v (%)	Classification
Echantillon non recuit	0,034	3.41	Excellent
Echantillon recuit à 500°C	0,030	3.02	Excellent
Echantillon recuit à 700°C	0,019	1.94	Excellent

On remarque que le coefficient de variation est inférieur à 5% pour les trois échantillons étudiés, donc la classification est excellente.

Et qui est en bon accord avec les valeurs de l'annexe 2 [36] où on remarque que la valeur de coefficient C_v est inférieur à 15% pour les trois échantillons analysés ce qui permet de conclure à une bonne homogénéité de la distribution des valeurs obtenus de la dureté.

Le degré d'asymétrie et d'aplatissement de la série statistique étudié, ressemble à celle d'une distribution normale - en cloche -, ($\gamma_1 = 0$ et $\gamma_2 < 3$).

Il est évident que pour toutes les distributions symétriques le coefficient de d'asymétrie est nul (ce qui est dans notre cas). $\gamma_1 = 0$.

Il est à noter que le coefficient C_v à 700°C est inférieur aux autres valeurs, ce qui signifie que les valeurs mesurer à cette température est plus proche à la valeur moyenne qui est due à la bonne préparation et nettoyage de la surface à analyser.

Conclusion

Les valeurs de la dureté H_v sont distribuées normalement, et la densité de distribution est donnée par :

➤ Pour échantillon de référence (Non recuit)

$$f(H_v) = \frac{1}{7,347 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-251,5}{7,347} \right)^2} \quad (2.17)$$

➤ Pour échantillon recuit à 500°C

$$f(H_v) = \frac{1}{5,350 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-177,17}{5,35} \right)^2} \quad (2.18)$$

➤ Pour échantillon recuit à 700°C

$$f(H_v) = \frac{1}{3,373 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-174}{3,373} \right)^2} \quad (2.19)$$

2.4. Influence de la température de recuit sur la dureté Vickers et la profondeur de pénétration h.

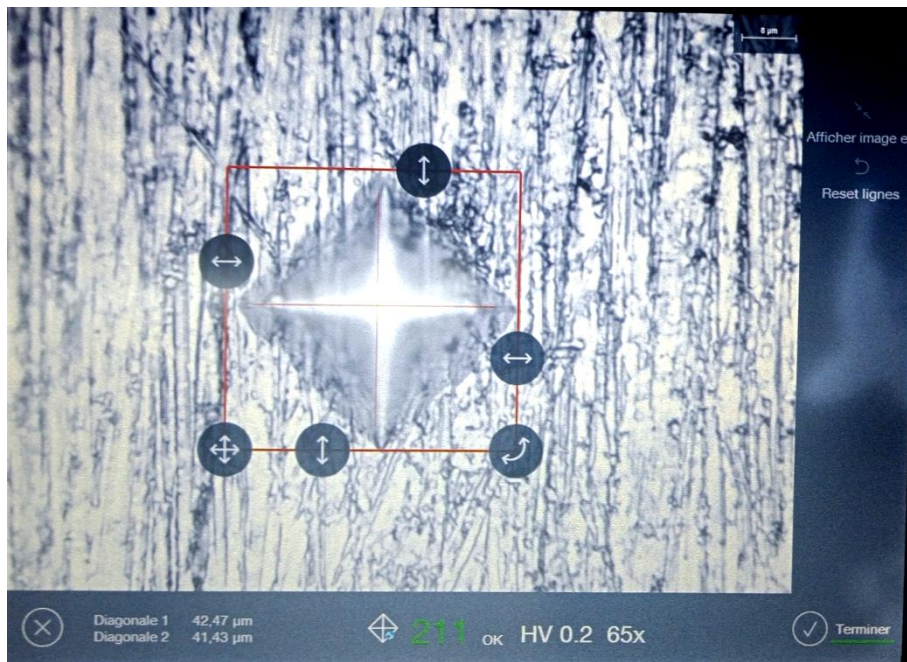
2.4.1 Calcul de la profondeur de pénétration h.

Il est intéressant de connaître la profondeur de pénétration h (Fig. 1.12) de la pyramide dans le matériau. Sa valeur est :

$$h = a / (2 \cdot \tan 68^\circ) = d / (2\sqrt{2} \tan 68^\circ) \quad (2.20)$$

$$h = d/7 \quad (2.21)$$

Il suffit donc, de mesurer la longueur d de la diagonale de la base carrée de l'empreinte. En pratique, on mesure les longueurs d_1 et d_2 des deux diagonales et on en prend la valeur moyenne. (Figure 1.12) [25].



Profondeur de pénétration h

$$d_1 = 42.47$$

$$d_2 = 41.43$$

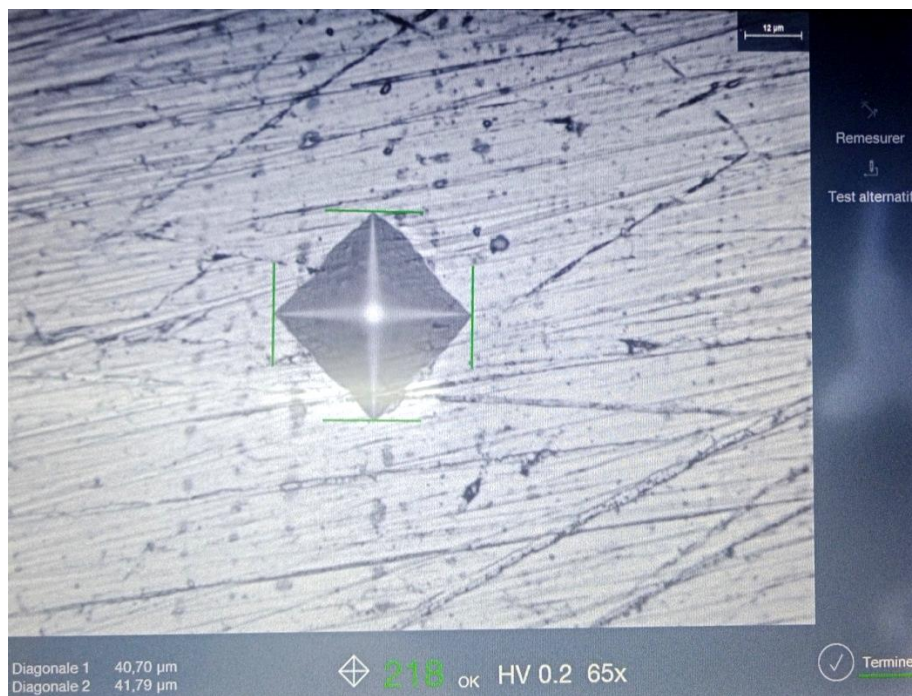
$$D = (d_1 + d_2) / 2$$

$$D = 41,95$$

$$h = D/7 = 41.95/7$$

$$h = 5,99 \mu\text{m}.$$

Figure. 2.14. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon non recuit



Profondeur de pénétration h

$$d_1 = 40.70$$

$$d_2 = 41.79$$

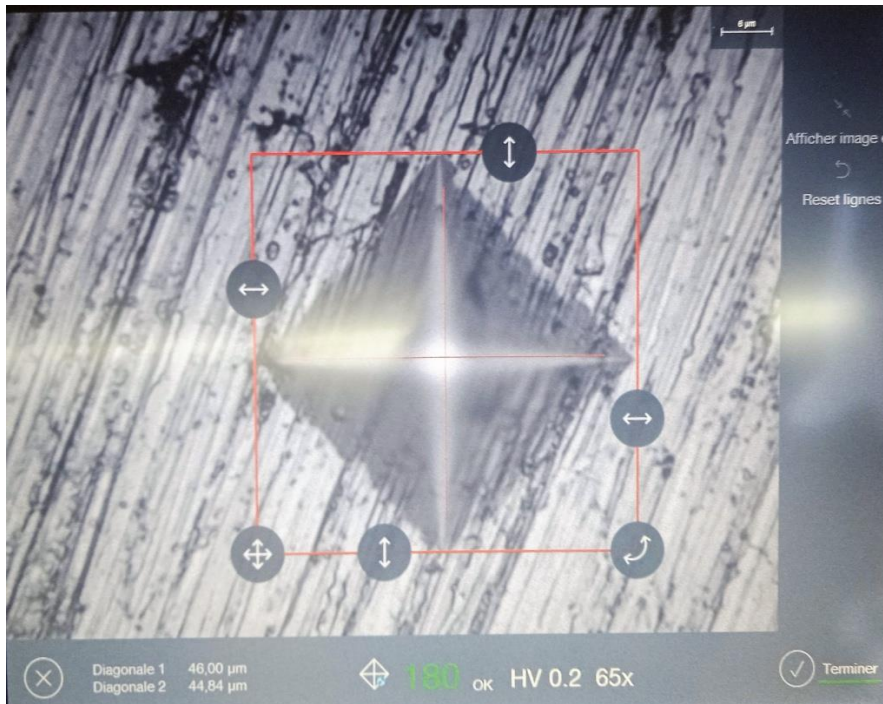
$$D = (d_1 + d_2) / 2$$

$$D = 41.25$$

$$h = D/7 = 41.25/7$$

$$h = 5.9 \mu\text{m}.$$

Figure.2.15. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon recuit à 400°C



Profondeur de pénétration h

$$d_1 = 46$$

$$d_2 = 44.8$$

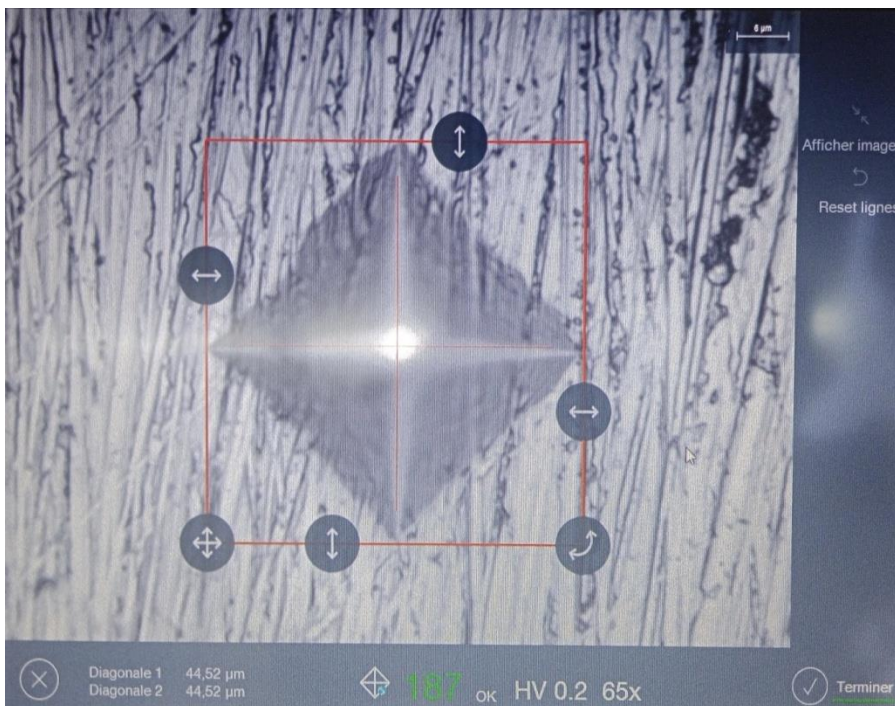
$$D = (d_1 + d_2) / 2$$

$$D = 45.4$$

$$h = D / 7 = 45.4 / 7$$

$$h = 6.4 \mu\text{m}.$$

Figure.2.16. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon recuit à 500°C



Profondeur de pénétration h

$$d_1 = 44.52$$

$$d_2 = 44.52$$

$$D = (d_1 + d_2) / 2$$

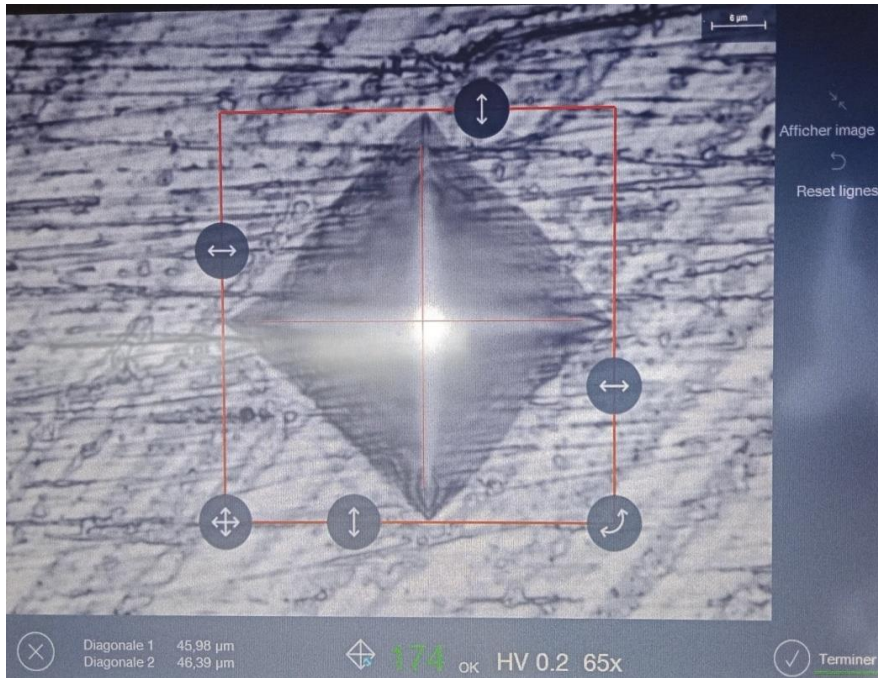
$$D = 44.52$$

$$h = D / 7 = 44.52 / 7$$

$$h = 6.4 \mu\text{m}.$$

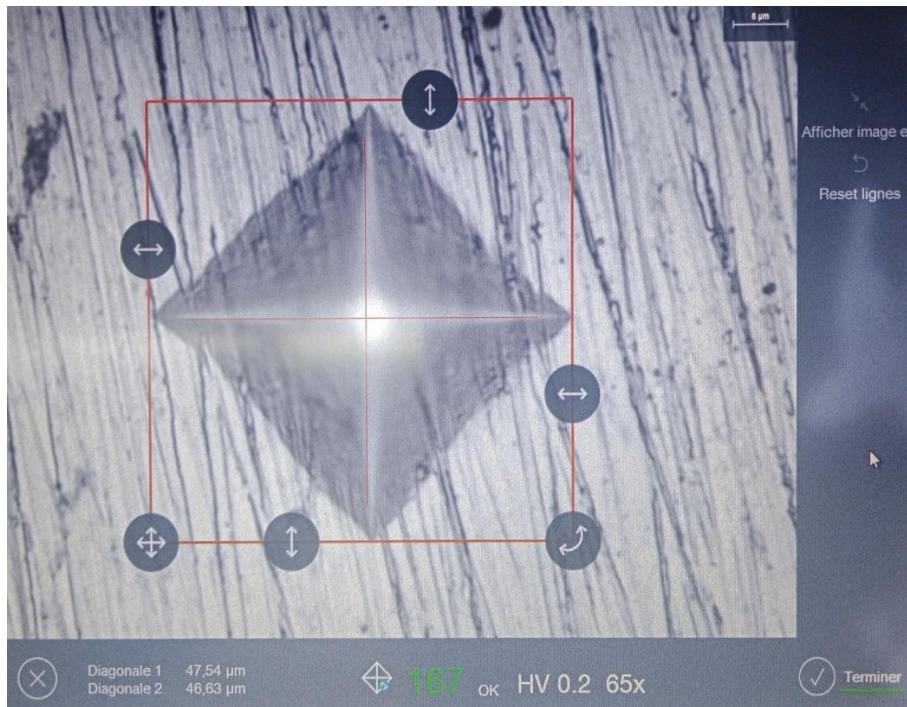
Figure.2.17. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon recuit à 600°C

Chapitre 2. Procédure expérimentale et discussion des résultats



Profondeur de
pénétration h
 $d_1=45.98$
 $d_2=46.39$
 $D = (d_1+d_2) / 2$
 $D=46.19$
 $h=D/7=46.19/7$
 $h= 6.6 \mu\text{m}.$

Figure.2.18. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon recuit à 700°C



Profondeur de
pénétration h
 $d_1= 47.54$
 $d_2= 46.63$
 $D = (d_1+d_2) / 2$
 $D=47.08$
 $h=D/7=47.08/7$
 $h= 6.7 \mu\text{m}.$

Figure.2.19. Empreinte de pointe pyramide pour échantillon recuit à 800°C

2.4.2 Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau .2.11. Valeurs de la profondeur de pénétration h des échantillons non recuit et recuit de 400 à 800°C).

	Non recuit	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
La moyenne(μ)	215.5	210.25	177.17	186.75	174	169
Écart type (σ)	7.35	7.5	5.35	6.60	3.37	1.63
La profondeur de pénétration(h)	6 μm	5.9 μm	6.4 μm	6.4 μm	6.6 μm	6.7 μm

2.4.2.1. Influence de la température de recuit sur la dureté Vickers

Nous pouvons observer que Hv diminue linéairement avec l'augmentation de la température de recuit T (voir Fig.2.20). L'ajustement linéaire est donné comme suit :

$$H_v = - 0.086 T + 234.84 \tag{2.22}$$

Où T est exprimé en °C.

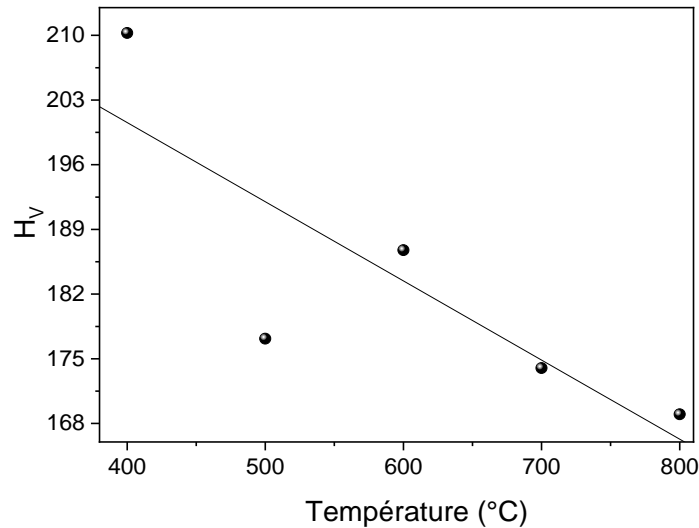


Figure. 2.20. Variation de Hv en fonction de la température de recuit T

La signification de la régression est donnée à une probabilité p de l'hypothèse nulle (H_0), $p < 0.082$, et un coefficient de corrélation linéaire $\rho = -0.83$. On remarque que la dureté Hv mesurée à $T = 500$ °C est plus éloignée de la droite de régression en comparaison avec celle

mesurée à $T = 600\text{ °C}$, ceci peut être due à la mauvaise préparation de cet échantillon des échantillons (polissage des surfaces, ...etc).

On peut aussi l'attribuer à un phénomène d'adoucissement. Ainsi qu'à la recristallisation suivie d'un grossissement de grains rendus possible par la redissolution des précipités, il est peut-être aussi attribué à une déségrégation des éléments solutés (soufre, phosphore ...etc) sous l'effet de la diffusion des lacunes vers les interfaces et vers les joints de grains. [34].

2.4.2.2 Influence de la température de recuit sur la profondeur de pénétration h

Contrairement à la dureté H_v qui diminue avec l'augmentation de la température de recuit T , on constate que la profondeur de pénétration h (μm) augmente avec l'augmentation de la température de recuit T (Fig.2.21).

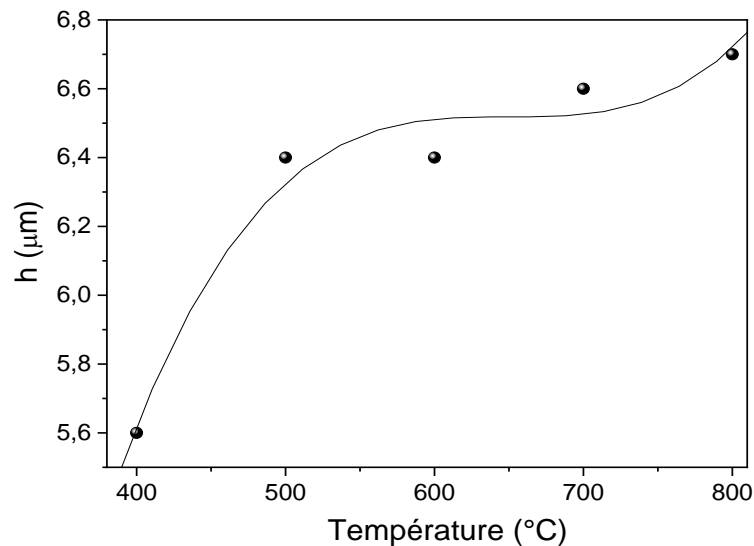


Figure.2.21. Variation de la profondeur de pénétration h (μm) en fonction de la température de recuit T .

L'ajustement polynomial est donné comme suit :

$$h (\mu\text{m}) = - 9.42 + 0.074 T - 1.14 \times 10^{-4} T^2 + 5.83 \times 10^{-8} T^3 \quad (2.23)$$

Où T est exprimé en $^{\circ}\text{C}$.

La signification de la régression polynomiale est donnée à une probabilité p de l'hypothèse nulle (H_0), $p < 0.23$, et un coefficient de corrélation non linéaire $\rho = 0.97$.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Les résultats de ce travail nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Les valeurs de la dureté Hv sont distribuées normalement.
- Les valeurs de Hv sont concentrées autour de la valeur moyenne pour la température $T=500^{\circ}\text{C}$, et sont dispersées autour de la valeur moyenne pour une température $T = 700^{\circ}\text{C}$.
- On a constaté que la variation de la température de recuit influe sur les propriétés mécaniques de l'acier inoxydable en l'occurrence de la micro-dureté.
- On remarque d'après les résultats obtenus de mesures de la dureté qu'il y a une diminution de la dureté, en fonction de la température de recuit ; ce qui nous permet de conclure l'influence de la température sur l'évolution de la dureté, Alors que la profondeur de pénétration h (μm) augmente.
- Le changement des propriétés mécaniques, par la température de chauffage, s'explique par la modification de la structure du matériau (augmentation des tailles des grains avec diminution de nombre des grains), entraînant ainsi des variations de la micro dureté sur la surface.
- Enfin, comme notre travail s'est limité à la mesure de la micro-dureté de la surface, une étude plus approfondie des propriétés mécaniques des aciers inoxydables serait souhaitée.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] K. Bradley (Ed.), Nickel, Acier inoxydable et énergie en chine des transports durables pour l'Inde, les aciers inoxydables au nickel au service des agriculteurs, vol. 27, n° 1, (Août 2012).
- [2] K. Bradley (Ed.), Nickel, Célébration du 100e anniversaire de l'acier inoxydable, l'histoire de sa création les grandes étapes par secteur son avenir, Édition spéciale, (Mai 2012).
- [3] M. Clément Keller, Modification des propriétés mécaniques d'un acier inoxydable par laminage traitement thermique, Institut National des Sciences Appliquées, Rouen_Normandie, (2017).
- [4] Ancon Building Products, L'utilisation de l'acier inoxydable dans l'industrie de la construction. (2007), www.ancon.co.uk.
- [5] F. Benghanem. L.Gharbi, Les Aciers Inoxydables, (<https://slideplayer.fr/slide/13500146/>.30/05/2022)
- [6][https://slideplayer.fr/slide/13397148/80/images/4/Les+constituants+de+1%E2%80%99acier+inoxydable.jpg\(01/06/22\)](https://slideplayer.fr/slide/13397148/80/images/4/Les+constituants+de+1%E2%80%99acier+inoxydable.jpg(01/06/22))
- [7] M. Bouzidi, M. Ghebrioua, Influence des post-traitements sur le comportement mécanique et électrochimique d'un dépôt en acier inoxydable, Mémoire de master, Univ de Bejaia (2018).
- [8] H. Dahmani et I. El fakir, Acier inoxydable et son utilisation dans le BTP, (<https://slideplayer.fr/slide/13369385/>.05/06/22)
- [9] N. Ouali, Comportement au vieillissement et à la restauration par traitement thermique de l'acier inoxydable austeno-ferritique SAF 2205, Mémoire de Magister, Univ de Blida (2012).
- [10] H. Behlouli, Caractérisations des couches de diffusion d'un acier inoxydable. Univ de Blida 1.2014
- [11] S. Khouidem, L'effet de traitement thermique sur les propriétés des fils de cuivre, mémoire master, Univ Biskra, (2019).
- [12] S. Bounoua, Effets des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques des assemblages soudées, mémoire master, Univ Aboubakr Belkaïd Tlemcen, (2019).
- [13] M. Dupeux, Aide-mémoire science des matériaux, 2^e édition Dunod paris, (2008).
- [14] A.Ganoun et O. hamdi, L'étude de l'influence de traitement thermique sur la déformabilité des tôles minces, mémoire master, Univ Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2020).
- [15] I. Bouri, Traitement thermique, Université de Mostaganem, 2012 (<https://fr.slideshare.net/kadixstx/prsentation-les-traitements-thermiques.25/05/2022>).

Références Bibliographiques

- [16] N. Mansouri, Traitement thermique, polycopie cours, chapitre ii, Univ Batna 2 (http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/mansouri_naima/files/chapitre_ii_traitements_thermiques.pdf. 20/05/2022).
- [17] V. Thirion-merle, Spectrométrie de fluorescence x, Archéométrie et archéologie, UMR5138, Maison de l'Orient et de la Méditerranée CNRS, Université de Lyon, France. Hal open, (2016).
- [18] R. Azzouz, Affinement des grains dans les aciers hypoeutectoïdes, Mémoire magister, Univ Biskra, (2010).
- [19] Feuillard technique, Les alliages à durcissement par écrouissage Publié par : CQRDA, Partenaire financier : (Québec)
- [20] <https://p4.storage.canalblog.com/43/22/447324/60372321.jpg> (09/06/2022)
- [21] <https://www.bodycote.com/fr/services/traitementthermique/recuitnormalisation/recristallisation/#:~:text=la%20temp%3%a9rature%20de%20recristallisation%20des,la%20composition%20de%20l'acier.>(22/05/2022).
- [22] <https://guide.directindustry.com/fr/bien-choisir-un-durometre/>. (01/05/2022).
- [23] S. Bensaada et D. Feliachi, Essai mécanique, Office des Publications Universitaires (2004).
- [24] <https://www.buehler.fr/vickers-hardness-testing.php>. (20/05/2022).
- [25] <http://olympiades.briand44.free.fr/olymp98/partie13.htm>.(15/05/2022).
- [26] https://fr.termwiki.com/FR/durometer_%E2%82%85 (10/04/2022).
- [27] Z. Bencharef, Chapitre IV, Matériaux et méthodes expérimentales, Univ de Biskra, (2006). <http://thesis.univ-biskra.dz/2441/6/Chapitre%20IV.Pdf>.
- [28] A.Kheris et I.Khellaf, Présentation du microduromètre, .Univ de Sétif 1.
- [29] <https://slideplayer.fr/slide/3395042/11/images/5/DURET%C3%89+VICKERS+%28HV%29.jpg>(05/05/2022).
- [30] B. Jourdain, Probabilités et statistique pour l'ingénieur, Polycopie de cours (2018).
- [31] L. Houde, Lois de probabilité, Département de Mathématiques et d'informatique Université du Québec à copyright© 2014Trois-Rivières.
- [32] http://en.wikipedia.org/wiki/Jarque-Bera_test. (27/05/2022).
- [33] <https://fr.livingeconomyadvisors.com/237-what-is-the-coefficient-of-variation> (20/05/22).
- [34] S. Daoud, Mémoire de Magister, Effet de laminage à froid et du traitement de recristallisation sur la cohésion inter granulaire d'un acier inoxydable 18-10, Univ Sétif (2001).
- [35] https://www.researchgate.net/figure/Classification-of-coefficient-ofvariation_18_tbl1_346627980[21 May, 2022].

Annexes

Annexe 1

Tableau 1. Résultats de dureté Hv en fonction de la température de trois échantillons (non recuit, recuit à 500 et 700°C) pour trente (30) essais pendant 4 heures

Température de recuit (°C)	Non recuit	Recuit à 500°C	Recuit à 700°C
1	200	168	168
2	203	168	169
3	207	169	170
4	207	171	170
5	208	172	170
6	208	172	171
7	208	172	171
8	209	173	171
9	211	174	171
10	211	174	172
11	211	174	172
12	212	175	173
13	213	175	173
14	214	176	174
15	215	178	174
16	218	178	174
17	219	178	174
18	219	179	175
19	220	180	175
20	220	180	175
21	220	180	176
22	220	180	176
23	221	180	176
24	222	180	176
25	222	183	178
26	223	183	178
27	224	185	179
28	226	185	179
29	226	186	179
30	228	187	181

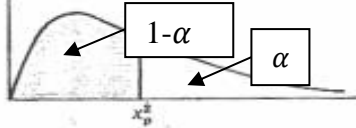
Tableau 2. Résultats de dureté Hv en fonction de la température de trois échantillons recuit à 400, 600 et 800°C pour quatre (04) essais pendant 4 heures

Température de recuit (°C)	Dureté Hv			
	1 ^{er} essai	2 ^{em} essai	3 ^{em} essai	4 ^{em} essai
400	204	202	220	215
600	178	187	188	194
800	167	169	169	171

Annexe 2

Tableau de khi deux avec ν : degré de liberté et quantiles d'ordre $(1-\alpha)$

**VALEURS DES CENTILES (χ_p^2)
pour la
DISTRIBUTION du KHI-DEUX
en fonction du nombre ν de degrés de liberté
(aire en gris = p)**



ν	$\chi_{0,995}^2$	$\chi_{0,99}^2$	$\chi_{0,975}^2$	$\chi_{0,95}^2$	$\chi_{0,90}^2$	$\chi_{0,75}^2$	$\chi_{0,50}^2$	$\chi_{0,25}^2$	$\chi_{0,10}^2$	$\chi_{0,05}^2$	$\chi_{0,025}^2$	$\chi_{0,01}^2$	$\chi_{0,005}^2$
1	7,88	6,63	5,02	3,84	2,71	1,32	0,455	0,102	0,0158	0,0039	0,0010	0,0002	0,0000
2	10,6	9,21	7,38	5,99	4,61	2,77	1,39	0,575	0,211	0,103	0,0506	0,0201	0,0100
3	12,8	11,3	9,35	7,81	6,25	4,11	2,37	1,21	0,584	0,352	0,216	0,115	0,072
4	14,9	13,3	11,1	9,49	7,78	5,39	3,36	1,92	1,06	0,711	0,484	0,297	0,207
5	16,7	15,1	12,8	11,1	9,24	6,63	4,35	2,67	1,61	1,15	0,831	0,554	0,412
6	18,5	16,8	14,4	12,6	10,6	7,84	5,35	3,45	2,20	1,64	1,24	0,872	0,676
7	20,3	18,5	16,0	14,1	12,0	9,04	6,35	4,25	2,83	2,17	1,69	1,24	0,989
8	22,0	20,1	17,5	15,5	13,4	10,2	7,34	5,07	3,49	2,73	2,18	1,65	1,34
9	23,6	21,7	19,0	16,9	14,7	11,4	8,34	5,90	4,17	3,33	2,70	2,09	1,73
10	25,2	23,2	20,5	18,3	16,0	12,5	9,34	6,74	4,87	3,94	3,25	2,56	2,16
11	26,8	24,7	21,9	19,7	17,3	13,7	10,3	7,58	5,58	4,57	3,82	3,05	2,60
12	28,3	26,2	23,3	21,0	18,5	14,8	11,3	8,44	6,30	5,23	4,40	3,57	3,07
13	29,8	27,7	24,7	22,4	19,8	16,0	12,3	9,30	7,04	5,89	5,01	4,11	3,57
14	31,3	29,1	26,1	23,7	21,1	17,1	13,3	10,2	7,79	6,57	5,63	4,66	4,07
15	32,8	30,6	27,5	25,0	22,3	18,2	14,3	11,0	8,55	7,26	6,26	5,23	4,60
16	34,3	32,0	28,8	26,3	23,5	19,4	15,3	11,9	9,31	7,96	6,91	5,81	5,14
17	35,7	33,4	30,2	27,6	24,8	20,5	16,3	12,8	10,1	8,67	7,56	6,41	5,70
18	37,2	34,8	31,5	28,9	26,0	21,6	17,3	13,7	10,9	9,39	8,23	7,01	6,26
19	38,6	36,2	32,9	30,1	27,2	22,7	18,3	14,6	11,7	10,1	8,91	7,63	6,84
20	40,0	37,6	34,2	31,4	28,4	23,8	19,3	15,5	12,4	10,9	9,59	8,26	7,43
21	41,4	38,9	35,5	32,7	29,6	24,9	20,3	16,3	13,2	11,6	10,3	8,90	8,03
22	42,8	40,3	36,8	33,9	30,8	26,0	21,3	17,2	14,0	12,3	11,0	9,54	8,64
23	44,2	41,6	38,1	35,2	32,0	27,1	22,3	18,1	14,8	13,1	11,7	10,2	9,26
24	45,6	43,0	39,4	36,4	33,2	28,2	23,3	19,0	15,7	13,8	12,4	10,9	9,89
25	46,9	44,3	40,6	37,7	34,4	29,3	24,3	19,9	16,5	14,6	13,1	11,5	10,5
26	48,3	45,6	41,9	38,9	35,6	30,4	25,3	20,8	17,3	15,4	13,8	12,2	11,2
27	49,6	47,0	43,2	40,1	36,7	31,5	26,3	21,7	18,1	16,2	14,6	12,9	11,8
28	51,0	48,3	44,5	41,3	37,9	32,6	27,3	22,7	18,9	16,9	15,3	13,6	12,5
29	52,3	49,6	45,7	42,6	39,1	33,7	28,3	23,6	19,8	17,7	16,0	14,3	13,1
30	53,7	50,9	47,0	43,8	40,3	34,8	29,3	24,5	20,6	18,5	16,8	15,0	13,8
40	66,8	63,7	59,3	55,8	51,8	45,6	39,3	33,7	29,1	26,5	24,4	22,2	20,7
50	79,5	76,2	71,4	67,5	63,2	56,3	49,3	42,9	37,7	34,8	32,4	29,7	28,0
60	92,0	88,4	83,3	79,1	74,4	67,0	59,3	52,3	46,5	43,2	40,5	37,5	35,5
70	104,2	100,4	95,0	90,5	85,5	77,6	69,3	61,7	55,3	51,7	48,8	45,4	43,3
80	116,3	112,3	106,6	101,9	96,6	88,1	79,3	71,1	64,3	60,4	57,2	53,5	51,2
90	128,3	124,1	118,1	113,1	107,6	98,6	89,3	80,6	73,3	69,1	65,6	61,8	59,2
100	140,2	135,8	129,6	124,3	118,5	109,1	99,3	90,1	82,4	77,9	74,2	70,1	67,3

D'après Catherine.m. thompson, table of percentage points of the χ^2 distribution, biometrika, Vol.32 (1941)

Annexes

$1 - \alpha$	0,001	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,5	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999
α	0,999	0,995	0,99	0,975	0,95	0,9	0,5	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
$v = ddl$													
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,45	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88	10,83
2	0,00	0,01	0,02	0,05	0,10	0,21	1,39	4,61	5,99	7,38	9,21	10,60	13,82
3	0,02	0,07	0,11	0,22	0,35	0,58	2,37	6,25	7,81	9,35	11,34	12,84	16,27
4	0,09	0,21	0,30	0,48	0,71	1,06	3,36	7,78	9,49	11,14	13,28	14,86	18,47
5	0,21	0,41	0,55	0,83	1,15	1,61	4,35	9,24	11,07	12,83	15,09	16,75	20,51
6	0,38	0,68	0,87	1,24	1,64	2,20	5,35	10,64	12,59	14,45	16,81	18,55	22,46
7	0,60	0,99	1,24	1,69	2,17	2,83	6,35	12,02	14,07	16,01	18,48	20,28	24,32
8	0,86	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	7,34	13,36	15,51	17,53	20,09	21,95	26,12
9	1,15	1,73	2,09	2,70	3,33	4,17	8,34	14,68	16,92	19,02	21,67	23,59	27,88
10	1,48	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	9,34	15,99	18,31	20,48	23,21	25,19	29,59
11	1,83	2,60	3,05	3,82	4,57	5,58	10,34	17,28	19,68	21,92	24,73	26,76	31,26
12	2,21	3,07	3,57	4,40	5,23	6,30	11,34	18,55	21,03	23,34	26,22	28,30	32,91
13	2,62	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	12,34	19,81	22,36	24,74	27,69	29,82	34,53
14	3,04	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	13,34	21,06	23,68	26,12	29,14	31,32	36,12
15	3,48	4,60	5,23	6,26	7,26	8,55	14,34	22,31	25,00	27,49	30,58	32,80	37,70
16	3,94	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	15,34	23,54	26,30	28,85	32,00	34,27	39,25
17	4,42	5,70	6,41	7,56	8,67	10,09	16,34	24,77	27,59	30,19	33,41	35,72	40,79
18	4,90	6,26	7,01	8,23	9,39	10,86	17,34	25,99	28,87	31,53	34,81	37,16	42,31
19	5,41	6,84	7,63	8,91	10,12	11,65	18,34	27,20	30,14	32,85	36,19	38,58	43,82
20	5,92	7,43	8,26	9,59	10,85	12,44	19,34	28,41	31,41	34,17	37,57	40,00	45,31
21	6,45	8,03	8,90	10,28	11,59	13,24	20,34	29,62	32,67	35,48	38,93	41,40	46,80
22	6,98	8,64	9,54	10,98	12,34	14,04	21,34	30,81	33,92	36,78	40,29	42,80	48,27
23	7,53	9,26	10,20	11,69	13,09	14,85	22,34	32,01	35,17	38,08	41,64	44,18	49,73
24	8,08	9,89	10,86	12,40	13,85	15,66	23,34	33,20	36,42	39,36	42,98	45,56	51,18
25	8,65	10,52	11,52	13,12	14,61	16,47	24,34	34,38	37,65	40,65	44,31	46,93	52,62
26	9,22	11,16	12,20	13,84	15,38	17,29	25,34	35,56	38,89	41,92	45,64	48,29	54,05
27	9,80	11,81	12,88	14,57	16,15	18,11	26,34	36,74	40,11	43,19	46,96	49,65	55,48
28	10,39	12,46	13,56	15,31	16,93	18,94	27,34	37,92	41,34	44,46	48,28	50,99	56,89
29	10,99	13,12	14,26	16,05	17,71	19,77	28,34	39,09	42,56	45,72	49,59	52,34	58,30
30	11,59	13,79	14,95	16,79	18,49	20,60	29,34	40,26	43,77	46,98	50,89	53,67	59,70

Tableau de classification du coefficient de variation d'après [01]. [35]

Coefficient de variation c_v	< 0.05	0.05-0.07	0.07-0.11	0.11-0.15	>0.15
Classification	Excellent	Moyen	Marginal	Faible	Inacceptable

Résumé

Résumé : Le but de ce travail est l'étude statistique de la dureté d'un acier inoxydable sous l'influence de la température du recuit thermique. A travers cette étude, nous avons abordé, en première partie, la question de savoir ce que c'est l'acier inoxydable, à quoi il est sert, le rôle des traitements thermiques.....etc. Ensuite, nous avons mesuré les paramètres nécessaires au calcul de la dureté, en l'occurrence les diagonales de l'empreinte faite par l'essai de dureté et ceci pour chaque échantillon séparément. Nous avons, en deuxième partie, fait une analyse statistique des résultats obtenus pour vérifier si nos données réelles suivent une loi normale ou non. Nous avons également étudié l'effet de la température de recuit sur la dureté Vickers et sur la profondeur de pénétration. L'interprétation des résultats obtenus montre que la distribution de la dureté suit la loi Normal. En outre, on observe une diminution de la dureté en fonction de l'augmentation la température de recuit. Cette évolution de la dureté peut s'expliquer par la modification de la structure du matériau, en particulier l'augmentation de la taille des grains, la diminution de la densité des défauts ...etc. entraînant ainsi des variations de la micro-dureté sur la surface.

Les mots clé : Dureté, Acier inoxydable, Traitement thermique, Laminage, Loi Normal.

المخلص: الهدف من هذا العمل هو الدراسة الإحصائية لصلابة الفولاذ المقاوم للصدأ تحت تأثير درجة حرارة التلدين الحراري. من خلال هذه الدراسة، تناولنا، في الجزء الأول، مسألة ماهية الفولاذ المقاوم للصدأ، ولماذا يتم استخدامه ، ودور المعالجات الحرارية... إلخ. بعد ذلك، قمنا بقياس المعاملات اللازمة لحساب الصلابة، في هذه الحالة الأقطار للمسافة البادئة التي تم إجراؤها بواسطة اختبار الصلابة وهذا لكل عينة على حدة. في الجزء الثاني، قمنا بإجراء تحليل إحصائي للنتائج التي تم الحصول عليها للتحقق مما إذا كانت بياناتنا الحقيقية تتبع التوزيع الطبيعي أم لا. درسنا أيضًا تأثير درجة حرارة التلدين على صلابة فيكرز وعلى عمق الاختراق. يوضح تفسير النتائج التي تم الحصول عليها أن توزيع الصلابة يتبع القانون العادي. بالإضافة إلى ذلك ، لوحظ انخفاض في الصلابة مع زيادة درجة حرارة التلدين. يمكن تفسير هذا التطور في الصلابة من خلال تعديل بنية المادة ، ولا سيما الزيادة في حجم الحبوب ، وتقليل كثافة العيوب ، ... إلخ، مما يتضمن اختلافات في الصلابة الدقيقة على السطح.

الكلمات المفتاحية: الصلابة ، الفولاذ المقاوم للصدأ ، المعالجة الحرارية ، الدرفلة ، القانون العادي.

Abstract: The aim of this work is the statistical study of the hardness of a stainless steel under the influence of the thermal annealing temperature. Through this study, we have addressed, in the first part, the question of what stainless steel is, what it is used for, the role of heat treatments.....etc. Then, we measured the parameters needed to calculate the hardness, in this case the diagonals of the indentation made by the hardness test and this for each sample separately. We have, in the second part, made a statistical analysis of the results obtained to check if our real data follow a normal law or not. We also studied the effect of the annealing temperature on the Vickers hardness and on the depth of penetration. The interpretation of the results obtained shows that the distribution of hardness follows the Normal law. In addition, a decrease in hardness is observed as the annealing temperature increases. This evolution of the hardness can be explained by the modification of the structure of the material, in particular the increase in the size of the grains, the reduction in the density of the defects.... etc. Thus involving variations of the micro-hardness on the surface.

Key words: Hardness, Stainless Steel, Heat Treatment, Rolling, Normal Law.