REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Ingénierie des Matériaux et des Surfaces

Étude des Propriétés Structurales, Microstructurales et Mécaniques et Magnétiques des Aciers Inoxydables Austénitiques X5CrNi18-10 hyper trempés

---

Présenté par

BOUCHAREB Ouail

BOUAICHA Younes abd elbari

Proposé et Dirigé par

Dr.ELMOHRI Abdennour

Promotion Juin 2024

Dédicace

“

Je dédie ce travail à mes chers parents, qui ont non seulement été des piliers de soutien et d’amour, mais aussi mes enseignants. Leur dévouement et leurs encouragements ont été essentiels à ma réussite.,,

Une dédicace spéciale à mes deux frères, qui ont toujours été là pour moi, dans les bons et les mauvais moments. Votre amour et votre soutien m’ont aidé à surmonter de nombreux défis,,

Je dédie ce travail à mes chers amis, dont le soutien indéfectible et l’encouragement constant ont été une source inestimable de motivation.,,

Merci à tous pour votre présence et votre aide précieuse.,,

Merci .

”

- Ouail

“

Je dédie ce projet à mes précieux membres de la famille et à mes amis qui ont joué un rôle extraordinaire dans ma vie,,

Votre soutien inébranlable, votre amour et vos encouragements ont été la force motrice de mon parcours,,

et je tiens à remercier tous ceux qui ont aidé à travers cela avec même les plus petits gestes, ,

Ce projet est un témoignage du travail que nous avons mis et des nuits où nous n’avons jamais dormi”

Merci .

”

- Younes

Remerciements

Tout d’abord, nous tenons à remercier Dieu le Tout-Puissant, qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail. Nous exprimons également notre gratitude aux responsables des différents laboratoires qui ont contribué à notre recherche :

- Le laboratoire IMS, situé dans le hall technologique.
- Le laboratoire de Génie Mécanique, situé dans la faculté de Génie Mécanique à Bab Ezzouar.
- Le laboratoire de la faculté d’Ain Oussera.
- Le plateau technique d’analyse physico-chimique (USTHB).

Nous adressons nos remerciements tout particuliers à notre encadrant, Dr. EL MOHRI,Abdennour, pour son suivi et ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à tous les enseignants du département de Génie Mécanique de l’université de Médéa.

Enfin, nous remercions les membres du jury qui ont bien voulu accepter d’évaluer ce travail. Un grand merci à tous ceux qui nous ont apporté leurs conseils et contributions.

Résumé

Cette étude se concentre sur les comportements structurels, microstructuraux, mécaniques et magnétiques des aciers inoxydables austénitiques X5CrNi18-10 lors des traitements thermiques allant jusqu'à 1000°C avec différents temps de maintien. Les différents échantillons feront l'objet d'une caractérisation structurale par diffraction des rayons X (DRX) pour mieux assurer l'homogénéisation de la phase austénitique. La caractérisation métallographique sera effectuée à l'aide de la microscopie optique et de la microscopie à force atomique. L'analyse des images permettra de calculer la taille moyenne des grains. La caractérisation micromécanique sera réalisée par des essais de microdureté pour mesurer la dureté des phases obtenues des différents échantillons. Enfin, une caractérisation magnétique sera réalisée par VSM (Vibrating Sample Magnetometer) afin de fournir une caractérisation structurale, métallographique et micromécanique complète et approfondie.

Mots clé : feron, micromécanique, maintien, Magnetometer

ملخص

إجراء التوصيف المعدني باستخدام المجهر البصري ومجهر القوة الذرية. ستسمح تحليل الصور بحساب متوسط حجم الحبوب. سيتم إجراء التوصيف الميكرو ميكانيكي من خلال اختبارات الصلابة الدقيقة لقياس صلابة المراحل التي تم الحصول عليها من العينات المختلفة. أخيراً، سيتم إجراء التوصيف المغناطيسي باستخدام مقياس مغناطيسية العينة
المهتزة (VSM) لتوفير توصيف هيكلي، معدني وميكانيكي شامل وعميق.

الكلمات المفتاحية : القوة الذرية , المجهر البصري , توصيف هيكلي

Abstract

This study focuses on the structural, microstructural, mechanical, and magnetic behaviors of austenitic stainless steels X5CrNi18-10 during heat treatments up to 1000°C with different holding times. The different samples will undergo structural characterization using X-ray diffraction (XRD) to ensure better homogenization of the austenitic phase. Metallographic characterization will be performed using optical microscopy and atomic force microscopy. Image analysis will allow the calculation of the average grain size. Mi-

cromechanical characterization will be carried out by microhardness tests to measure the hardness of the phases obtained from the different samples. Finally, magnetic characterization will be performed using a Vibrating Sample Magnetometer (VSM) to provide a complete and thorough structural, metallographic, and micromechanical characterization.

Keywords feron, micromechanics, hold, mangnetometer

Table des matières

Introduction générale 2

1 Généralités sur les aciers inoxydables 3

1.1 Historique des aciers inoxydables austénitiques 4
1.2 Aciers 4
1.2.1 Types principaux d'aciers et leurs utilisations 4
1.2.2 Propriétés des aciers 5
1.2.3 Applications des aciers 5
1.3 Aciers inoxydables 5
1.3.1 Composition et propriétés 6
1.3.2 Classification des aciers inoxydables 6
1.3.3 Applications des aciers inoxydables 8
1.4 Aciers inoxydables austénitiques 8
1.4.1 Composition chimique et additions 9
1.4.2 Classement des aciers inoxydables austénitiques 10
1.4.3 Relation avec les aciers traditionnels 11
1.5 Aciers austénitiques 316 11
1.5.1 Composition de l'Acier Inoxydable 316 11
1.5.2 Propriétés physiques et mécaniques 11
1.5.3 Applications typiques de l'acier 316 12
1.5.4 Désignation européenne 12
1.6 Propriétés et applications des aciers inoxydable austénitique 13
1.6.1 Propriétés de mise en forme 13
1.6.2 Propriétés Physiques des Aciers Inoxydables Austénitiques 13
1.6.3 Propriétés Mécaniques des Aciers Inoxydables Austénitiques 14
1.6.4 Propriété Électrique des Aciers Inoxydables Austénitiques 15
1.6.5 Propriétés magnétiques des Aciers Inoxydables Austénitiques 15
1.6.6 Propriétés de composition et de structure 15
1.7 Procédure de Fabrication des aciers inoxydables 16
1.8 Diagrammes de phases 16
1.8.1 Phases de référence 16
1.8.2 Diagramme de phase Fe-Cr 17
1.8.3 Diagramme Fe-Ni 19
1.8.4 Diagramme Fe-Cr-Ni 20
1.9 Influence des éléments d'addition 20
1.9.1 Éléments Alphagènes Principaux dans les Aciers Inoxydables 20
1.9.2 Principaux Éléments Gammagènes 23

1.10 Traitement Thermique 23
1.10.1 Introduction 23
1.10.2 Cycle d'un traitement thermique 24
1.10.3 Différents types de traitements thermiques 25
1.10.4 Gamme de traitement thermique 25
1.10.5 Trempe 26
1.10.6 Revenu 28
1.10.7 Recuit 29

2 Matériaux et Techniques expérimentales 32
2.1 Introduction 33
2.2 Matériau utilisé 33
2.3 Appareillage 33
2.3.1 Four de traitement thermique 33
2.3.2 Traitement Thermique 34
2.3.3 Polisseuse 34
2.3.4 Attaque chimique : 36
2.4 Caractérisations structurales 36
2.4.1 Analyse par DRX (diffraction des rayons X) 36
2.4.2 Logiciel highscore 37
2.5 Etude morphologique 38
2.5.1 Microscope Optique (MO) 38
2.5.2 Microscopie à force atomique (AFM) 38
2.6 Etude mécanique 40
2.6.1 Etude par micro dureté 40
2.7 Etude magnétique 40

3 Résultats et discussion 44
3.1 Introduction 45
3.2 Etude structurale 46
3.2.1 Résultats de traitements de DRX 46
3.3 Analyse métallographique 50
3.3.1 Observation sur microscope optique 50
3.3.2 Observation sur microscope a force atomique MFA 54
3.3.3 Le résultat de la rugosité (R) 60
3.4 Etude mécanique 61
3.4.1 Essai de Microdurté 61
3.5 Etude magnétique 62
3.5.1 Caractérisation par Magnétisation à échantillon vibrant (VSM) 62

Conclusion générale 66

Bibliographie 68

Table des figures

1.1 Diagramme représentatif des familles d'aciers inoxydables (10). 6
1.2 Structure d'un acier inoxydable austénitique. 7
1.3 La structure d'un acier inoxydable duplex. 7
1.4 Variétés allotropiques du fer pur 17
1.5 Diagramme de phase fer-chrome(20) 17
1.6 Diagramme d'équilibre fer-crhome à des températures inférieures(20) 18
1.7 Diagramme Fe-Ni[20] 19
1.8 Coupes de diagramme de phases ternaire Fe-Cr-Ni[29]. 21
1.9 Constitution des alliages Fe-Ni-Cr à 0,1 % C à température ambiante après hypertrempe(21). 21
1.10 Diagramme Fer-Chrome – Influence de l'addition d'éléments gammagènes (21) 22
1.11 mode opératoire d'un traitement thermique (22) 25
1.12 Classification des traitements thermiques (23) 26
1.13 Cycle thermique lors d'une trempe (25) 27
1.14 Cycle thermique complet d'une trempe et revenu (27) 29
1.15 Cycle thermique d'un recuit (28) 31

2.1 Four à chambre isolant de fibres électriques de haute précision. 34
2.2 Polisseuse HITECH 36
2.3 Schéma représentatif explique le principe de diffraction où d est la distance réticulaire des plans d'indices (h, k, l) et la longueur d'onde des rayons X utilisés 37
2.4 Microscope optique de type « OPTIKA» 38
2.5 appareil Bruker ICON SPM 39
2.6 Wilson Hardness - Tukon 1102 / 1202 40
2.7 appareille de découpe mecatome T180 41
2.8 Balance ohaus 42
2.9 Préparation de l'échantillion 42
2.10 Appareille microsens EZ9 43

3.1 Pics identifiés de la phase austénitique γ métastable de l'acier inoxydable austénitique pour différents types de traitements. 46
3.2 L'évolution des spectres de diffraction des rayons X de l'acier inoxydable austénitique 316 pour différents types de traitements. 47
3.3 Evolution des paramètres de maille de chaque échantillon. 48
3.4 Evolution de la taille de cristallite des aciers inoxydables austénitique 316 pour différents types de traitements thermiques. 49

3.5 Nuage de points représentant la micro déformation de chaque échantillion 50
3.6 Microstructure de l'échantillion 01 brut (X200). 51
3.7 Microstructure de l'échantillion 01 brut (X500). 51
3.8 Morphologie Microscope Optique de l'acier inoxydable après recuit(X200) . 52
3.9 Morphologie Microscope Optique de l'acier inoxydable après recuit (X500). 52
3.10 Morphologie Microscope Optique de l'acier inoxydable après trempe Ech03 (X200). 53
3.11 Morphologie Microscope Optique de l'acier inoxydable après trempe Ech04 (X200). 53
3.12 Morphologie Microscope Optique de l'acier inoxydable après trempe Ech04 (X500). 54
3.13 Morphologie Microscope a force atomique de l'échantillion 01 BRUT..... 55
3.14 Capture d'écran du logiciel de l'appareil de microscope optique Bruker pour l'échantillon 1 BRUT 56
3.15 Morphologie Microscope a force atomique de l'échantillion 02 aprés recuit. 56
3.16 Capture d'écran du logiciel de l'appareil de microscope optique Bruker pour l'échantillon 2 aprés recuit 57
3.17 Morphologie Microscope a force atomique de l'échantillion 03 aprés trempe. 57
3.18 Capture d'écran du logiciel de l'appareil de microscope optique Bruker pour l'échantillon 03 aprés trempe. 58
3.19 Morphologie Microscope a force atomique de l'échantillion 04 aprés trempe. 58
3.20 Capture d'écran du logiciel de l'appareil de microscope optique Bruker pour l'échantillon 4, aprés trempe 59
3.21 Variation de la microdureté moyenne HV en fonction des différents traitements thermiques 61
3.22 Courbes d'hystérésis (aimantation en fonction du champ appliqué) de l'acier inoxydable austénitique 316 pour différents types de traitements. 62
3.23 Nuage de points représentant l'évolution des paramètres mécanique de chaque echantillon. 63
3.24 Nuage de points représentant la saturation de magnétisation Ms emu/g de chaque echantillon. 64
3.25 Nuage de points représentant la Rémanence Mr emu/g de chaque echantillon. 64

Liste des tableaux

2.1 Composition chimique de l'acier inoxydable X5CrNi18-10. 33
2.2 Paramètres de l'attaque chimique réalisée. 36

3.1 Tableau récapitulatif des résultats du traitement DRX. 48
3.2 Longeur moyenne en (µm). 54
3.3 Résultats de mesure de la microdureté de l'acier inoxydable. 61
3.4 Tableau récapitulatif de l'étude magnétique. 62

Introduction générale

Les aciers, alliages de fer-carbone, sont parmi les matériaux les plus cruciaux dans le secteur industriel en raison de leur large spectre de propriétés ajustables. Le caractère fondamental des aciers repose sur leur composition de base : le fer, un métal durable et malléable, mélangé à une faible proportion de carbone, qui augmente significativement leur dureté et leur résistance mécanique. La modification de la teneur en carbone, typiquement entre 0, 02% et 2, 1% en poids, ainsi que l'ajout d'autres éléments d'alliage tels que le chrome, le nickel, le molybdène et le vanadium, permet de créer une vaste gamme d'aciers avec des propriétés distinctes adaptées à des applications spécifiques. Ces modifications influencent la microstructure de l'acier, telles que la formation de structures ferritiques, austénitiques ou martensitiques, chacune offrant des avantages uniques en termes de ductilité, de résistance à la corrosion et de traitement thermique (1). La compréhension de ces relations entre la composition chimique, la microstructure et les propriétés finales est essentielle pour l'ingénierie des matériaux, permettant aux scientifiques et ingénieurs de concevoir des aciers optimisés pour des exigences spécifiques comme les structures de haute résistance ou les applications à haute température (2). Les aciers inoxydables sont des alliages de fer qui se distinguent principalement des autres aciers par leur haute teneur en chrome, généralement supérieure à 10, 5% , ce qui leur confère une résistance exceptionnelle à la corrosion(3). Cette résistance est due à la formation d'une couche passive d'oxyde de chrome sur la surface, qui protège le matériau contre divers environnements corrosifs(3). En plus du chrome, d'autres éléments comme le nickel, le molybdène et le vanadium peuvent être ajoutés pour améliorer certaines propriétés, telles que la tenue à la corrosion, la ductilité et la résistance à la température(4). Les aciers inoxydables peuvent être contrastés avec les aciers au carbone, qui sont principalement des alliages de fer et de carbone, avec d'autres éléments en quantités beaucoup plus faibles(5). Tandis que les aciers au carbone sont extrêmement polyvalents et économiques, leur résistance à la corrosion est nettement inférieure à celle des aciers inoxydables(5). Les aciers au carbone peuvent rouiller rapidement lorsqu'exposés à l'air et à l'humidité, tandis que les aciers inoxydables maintiennent leur intégrité et leur aspect même dans des conditions environnementales sévères(5). Sur le plan microstructural, les aciers inoxydables peuvent être classés en trois grandes familles, en fonction de leur structure cristalline : Austénitiques : Non magnétiques et particulièrement résistants à la corrosion, ils contiennent du nickel en plus du chrome. Ils sont ductiles et peuvent être formés à froid, ce qui les rend idéaux pour de nombreuses applications, y compris dans les industries alimentaire et pharmaceutique(4). Ferritiques : Magnétiques et moins ductiles que les austénitiques, ces aciers contiennent du chrome mais très peu de nickel. Ils offrent une bonne résistance à la corrosion et sont souvent utilisés dans les appareils ménagers et dans la construction

automobile(4). Martensitiques : Également magnétiques, ces aciers peuvent être trempés et revenus. Ils sont généralement utilisés dans des applications nécessitant une haute résistance mécanique et une bonne résistance à l'usure, tels que les couteaux et autres outils coupants(4). En résumé, les aciers inoxydables offrent des avantages significatifs en termes de résistance à la corrosion, de ductilité, et de diversité d'applications par rapport aux aciers au carbone(3). Cette capacité à résister à des environnements hostiles les rend indispensables dans de nombreuses applications industrielles, médicales et domestiques, où la durabilité et la sécurité sont primordiales(5).

Notre travail consiste à étudier les différentes caractéristiques d'un acier inoxydable austénitique de nuance X5CrNiMo18-10 (AISI 316) ayant subi un traitement d'hyper trempe afin d'obtenir des phases austénitiques plus homogènes et contenant un minimum de carbures.
Ce présent mémoire est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre "**généralités sur les aciers inoxydables**" Ce chapitre aborde les caractéristiques générales des aciers inoxydables et servira de fondement théorique pour les analyses et discussions des résultats expérimentaux présentés dans les sections suivantes, offrant ainsi un cadre de référence pour comprendre les impacts des traitements thermiques sur les propriétés des aciers inoxydables étudiés dans ce travai

Le deuxième chapitre "**Matériaux et Techniques expérimentales**" Ce chapitre résume le processus expérimental et présente l'ensemble des équipements et moyens utilisés, ainsi que les étapes à suivre. Il fournit une description détaillée des instruments de mesure, des techniques de préparation des échantillons et des procédures d'essai. L'objectif est de garantir une compréhension claire et exhaustive des méthodes employées pour mener à bien les différentes analyses. De plus, ce chapitre met en lumière l'importance de chaque étape du processus expérimental pour la validation des résultats obtenus et leur interprétation scientifique.

Le troisième chapitre " **Résultats et discussion**" Ce chapitre est dédié à l'analyse détaillée des résultats expérimentaux obtenus à partir des différents échantillons d'acier inoxydable X5CrNi8-10 soumis à divers traitements thermiques. L'objectif est d'examiner et de comparer les propriétés mécaniques, microstructurales et magnétiques de ces échantillons.

Chapitre 1

Généralités sur les aciers inoxydables

1.1 Historique des aciers inoxydables austénitiques

L'histoire des aciers inoxydables commence avec la découverte du chrome par le chimiste français Nicolas-Louis Vauquelin en 1797. En 1821, Berthier observa les propriétés inoxydables du fer allié au chrome.

Au début du XXe siècle, Léon Guillet et Albert Portevin étudièrent les alliages fer-chrome, couvrant les nuances martensitiques à 13% de chrome et les nuances ferritiques à 17% de chrome. En 1909, Guillet publia des travaux sur les aciers inoxydables au chrome-nickel. Le métallurgiste allemand W. Giesen conduisit des recherches similaires, et ensemble, leurs études permirent de classer les aciers inoxydables en trois familles principales : martensitique, ferritique et austénitique.

Harry Brearley est crédité de la première production industrielle des aciers inoxydables martensitiques à Sheffield en 1913. Les Allemands Benno Strauss et Eduard Maurer développèrent les aciers inoxydables austénitiques, tandis que les Américains Frederick Becket et Christian Dantsizen contribuèrent aux aciers inoxydables ferritiques.

Philip Monnartz fut le premier à décrire la passivité des aciers inoxydables. Les recherches sur les éléments d'alliage menèrent au développement des aciers à durcissement structural, avec des propriétés à haute température mises en évidence par Pierre Chevenard. Au début des années 1930, J. Hochmann découvrit les nuances biphasées austéno-ferritiques, aujourd'hui appelées duplex.

Les aciers inoxydables austénitiques ont été développés dans les années 1920 à la suite des recherches de plusieurs scientifiques, dont Eduard Maurer et Benno Strauss en Allemagne. Ils ont introduit l'alliage 18-8 (18% de chrome et 8% de nickel), qui est devenu la base pour le type 304, l'un des aciers inoxydables austénitiques les plus utilisés aujourd'hui. Cette composition favorisait une structure austénitique stable, non magnétique et exceptionnellement résistante à la corrosion. Ces propriétés ont rendu ces aciers inoxydables extrêmement populaires dans les applications nécessitant une résistance à la corrosion et une bonne formabilité, comme dans les équipements alimentaires et les applications biomédicales(6).

1.2 Aciers

Les aciers sont des alliages de fer avec une quantité contrôlée de carbone et parfois d'autres éléments ajoutés, pour améliorer certaines propriétés. Ils font partie des matériaux les plus importants et les plus utilisés dans la construction et la fabrication en raison de leur force, durabilité et coût relativement bas.

1.2.1 Types principaux d'aciers et leurs utilisations

Aciers au Carbone : Contenant jusqu'à 2.1% de carbone, ces aciers sont largement utilisés dans la construction, la fabrication de véhicules et de machines. Ils sont économiques et offrent un bon équilibre entre ductilité et résistance mécanique (7).

Aciers Alliés : Ces aciers incluent des éléments comme le chrome, le nickel, et le manganèse pour améliorer certaines propriétés comme la résistance à la corrosion et à la chaleur. Ils sont essentiels pour des applications industrielles spécifiques où des propriétés améliorées sont nécessaires, comme les outils de coupe et les moteurs(8).

Aciers Inoxydables : Avec un minimum de 10.5% de chrome, les aciers inoxydables offrent une résistance exceptionnelle à la corrosion et sont utilisés dans des environnements corrosifs comme dans la fabrication d'équipements alimentaires et médicaux(4).

Aciers à Outils : Conçus pour être extrêmement durs et résister à l'usure à des températures élevées, ces aciers sont utilisés dans la fabrication de matrices, de moules, et d'outils de coupe(9).

1.2.2 Propriétés des aciers

- **Résistance Mécanique :** Haute résistance à la traction et à la compression, idéale pour les structures portantes ; Ductilité : Excellente en particulier pour les aciers à faible teneur en carbone, permettant des applications variées comme les câbles et les plaques formées(7) ;
- **Résistance à la Corrosion :** Exceptionnelle chez les aciers inoxydables grâce à la présence de chrome et d'autres alliages ;
- **Durabilité :** Capable de supporter des conditions environnementales sévères, ce qui les rend très durables dans le temps(4).

1.2.3 Applications des aciers

Les aciers sont omniprésents dans presque tous les aspects de la vie moderne, utilisés dans la construction d'infrastructures, la fabrication de voitures et d'appareils, la construction navale, et beaucoup d'autres industries. Leur polyvalence et leur coût-efficacité les rendent indispensables dans le monde entier. En somme, les aciers sont un pilier de l'industrie moderne, avec une vaste gamme de types et de grades pour répondre aux exigences spécifiques de presque toutes les applications imaginables.

1.3 Aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques principalement composés de fer et d'au moins 10.5% de chrome. Cette teneur en chrome forme une couche protectrice d'oxyde de chrome à la surface de l'acier, ce qui empêche la corrosion et la rouille. Cette propriété les distingue des autres types d'aciers et leur confère une durabilité exceptionnelle.

En plus de leur résistance à la corrosion, les aciers inoxydables possèdent d'autres qualités telles que la résistance mécanique, la facilité de fabrication, et une bonne résistance aux températures extrêmes. Ces caractéristiques les rendent adaptés à une large

gamme d'applications, notamment dans les secteurs de la construction, de la médecine, de l'alimentation, et des industries chimiques.

1.3.1 Composition et propriétés

Les aciers inoxydables sont principalement constitués de fer, avec au moins 10.5% de chrome, ce qui leur confère une résistance supérieure à la corrosion grâce à la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome(7). D'autres éléments comme le nickel, le molybdène et le vanadium sont souvent ajoutés pour améliorer certaines propriétés.

1.3.2 Classification des aciers inoxydables

Il existe cinq classes principales d'aciers inoxydables avec des structures cristallographiques différentes, représentées par les zones du diagramme de la Figure 1.1.

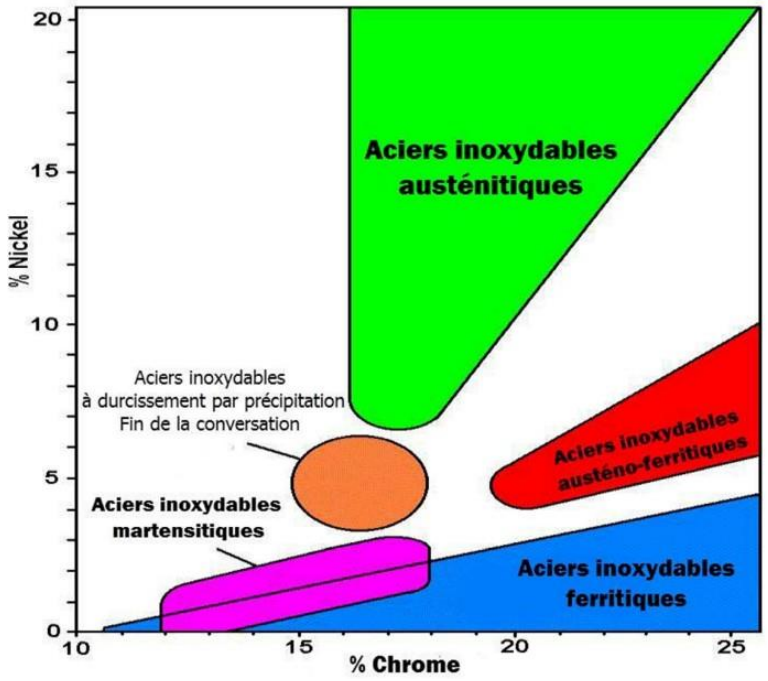


FIG. 1.1 : Diagramme représentatif des familles d'aciers inoxydables (10).

- **Austénitiques** : Ce sont les plus courants, caractérisés par une haute ductilité et une excellente résistance à la corrosion. Exemples typiques : Type 304 et Type 316, ce dernier contenant du molybdène pour une meilleure résistance aux chlorures(4).

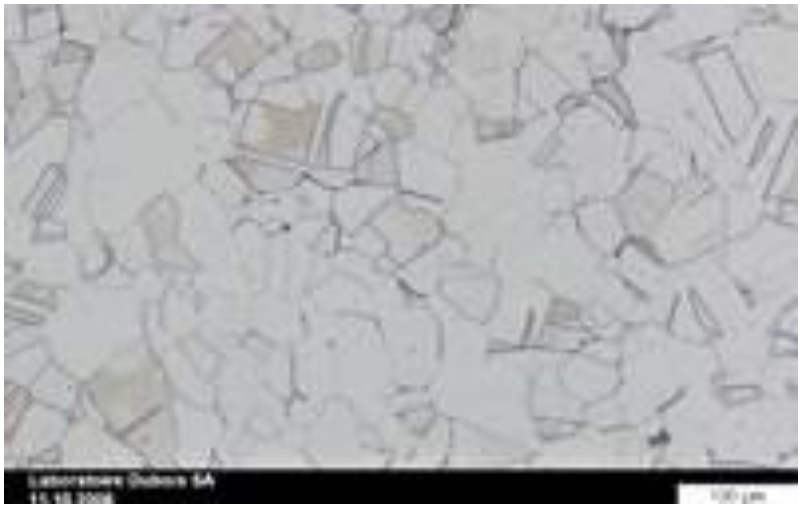


FIG. 1.2 : Structure d'un acier inoxydable austénitique.

- **Ferritiques :** Contiennent généralement moins de nickel, sont magnétiques et possèdent une bonne résistance à la corrosion et une bonne formabilité. Typiquement utilisés dans les appareils ménagers et la construction(4) ;
- **Martensitiques :** Haute teneur en carbone et capacité de durcissement par traitement thermique, utilisés pour les couteaux et autres outils coupants(9) ;
- **Les aciers austéno-ferritiques :** sont obtenus à partir d'une composition située à la limite de la boucle γ .

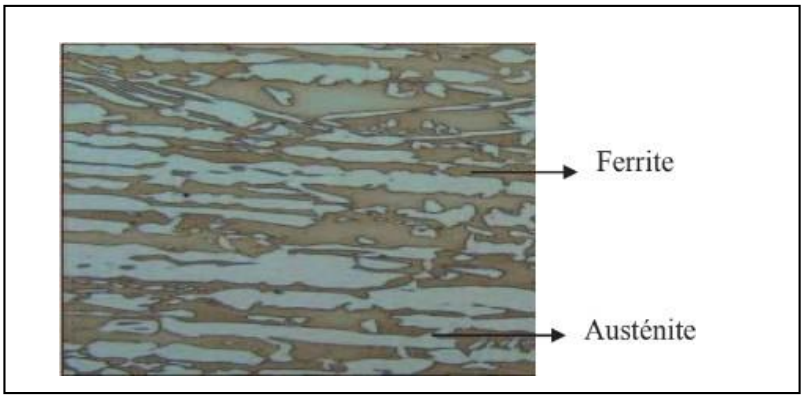


FIG. 1.3 : La structure d'un acier inoxydable duplex.

- **À Durcissement par Précipitation :** Peuvent être durcis par traitement thermique, ce qui permet d'atteindre une haute résistance mécanique sans compromettre la ductilité(9).

1.3.3 Applications des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables trouvent des applications dans presque tous les secteurs, de la cuisine avec les ustensiles et les éviers, à la construction pour les éléments exposés aux intempéries, en passant par le domaine médical pour les instruments chirurgicaux et le secteur industriel pour les équipements de traitement chimique et les installations sous pression(8).

1.4 Aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques sont les plus courants en raison de leur exceptionnelle résistance chimique, leur ductilité comparable à celle du cuivre, et leurs excellentes propriétés mécaniques. Ils contiennent environ 18% de chrome et 10% de nickel. Leur faible teneur en carbone peut être stabilisée par des éléments tels que le titane ou le niobium. Grâce à leur excellente ductilité, ces aciers sont également utilisés à très basses températures (jusqu'à -200 °C) et rivalisent avec les alliages légers et l'acier contenant 9% de nickel pour la fabrication d'équipements cryogéniques.

Exemples : X5CrNi18-10, X2CrNiMo17-12-2. sont une sous-catégorie des aciers inoxydables, caractérisés par leur structure cristalline cubique à faces centrées (CFC). Cette structure est obtenue grâce à des niveaux élevés de nickel et de chrome, qui non seulement confèrent à ces aciers une excellente résistance à la corrosion, mais stabilisent également la phase austénitique à toutes les températures ambiantes et plus élevées. Les aciers inoxydables austénitiques se distinguent des autres aciers inoxydables par plusieurs propriétés uniques :

- **Résistance supérieure à la corrosion :** Leur teneur élevée en chrome forme une couche passive d'oxyde de chrome qui protège l'acier contre la corrosion dans une variété de milieux chimiques. Le nickel, en plus, améliore cette résistance, en particulier dans les environnements acides et alcalins(11) ;
- **Excellente ductilité :** La structure CFC confère aux aciers austénitiques une ductilité exceptionnelle, ce qui les rend faciles à former et à manipuler dans divers processus de fabrication, y compris le soudage, le pliage et le forgeage(3) ;
- **Non magnétiques :** À l'état recuit, ces aciers sont généralement non magnétiques, ce qui est un critère important pour certaines applications électroniques et électriques(12). En contraste, les autres familles d'aciers inoxydables telles que les ferritiques et les martensitiques offrent différentes propriétés :
  - Aciers inoxydables ferritiques : Ces aciers ont une structure cristalline cubique centrée (BCC). Ils sont magnétiques et moins ductiles que les austénitiques. Leur résistance à la corrosion est généralement inférieure, bien qu'ils soient plus résistants à la corrosion sous contrainte dans certains environnements(5).
  - Aciers inoxydables martensitiques : Ces aciers peuvent être durcis par traitement thermique grâce à leur teneur élevée en carbone. Ils sont magnétiques et

offrent une haute résistance et dureté, mais leur ductilité et leur résistance à la corrosion sont moins bonnes par rapport aux austénitiques(13).

1.4.1 Composition chimique et additions

Les aciers inoxydables austénitiques sont une classe d'aciers inoxydables qui contiennent une structure cristalline austénitique (face-centered cubic). Ils sont largement utilisés pour leur résistance à la corrosion et leur bonne formabilité. Voici une description de leur composition chimique et des additions typiques :

Composition Chimique

1. **Chrome (Cr) :** 16– 26% Le chrome est l'élément clé pour la résistance à la corrosion. Il forme une couche passive d'oxyde de chrome qui protège le métal sous-jacent.

2. **Nickel (Ni) :** 6– 22% Le nickel stabilise la phase austénitique et améliore la résistance à la corrosion, notamment dans les environnements acides.

3. **Manganèse (Mn) :** 2% max Le manganèse est utilisé pour stabiliser la phase austénitique et peut remplacer partiellement le nickel.

4. **Carbone (C) :** ≤0.08% Le carbone améliore la dureté et la résistance mécanique, mais sa teneur est limitée pour éviter la formation de carbures de chrome qui peuvent réduire la résistance à la corrosion.

5. **Molybdène (Mo) :** 2– 3% Le molybdène améliore la résistance à la corrosion, en particulier contre la corrosion par piqûres et la crevasse.

6. **Azote (N) :** 0.1– 0.2% L'azote augmente la résistance mécanique et améliore la résistance à la corrosion.

7. **Silicium (Si) :** 1% max Le silicium améliore la résistance à l'oxydation à haute température.

8. **Soufre (S) et Phosphore (P) :** très faibles teneurs (environ 0.03% max pour chacun) Le soufre et le phosphore sont généralement considérés comme des impuretés et leur teneur est maintenue à des niveaux très bas pour éviter d'affecter négativement les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion.

Additions Typiques

1. **Titane (Ti) et Niobium (Nb) :** Ajoutés pour stabiliser les aciers en évitant la formation de carbures de chrome lors du soudage, ce qui maintient la résistance à la corrosion intergranulaire (par exemple, les aciers inoxydables stabilisés comme le type 321).

2. **Cuivre (Cu) :** Peut être ajouté pour améliorer la résistance à certains types de corrosion (par exemple, la corrosion sous contrainte).

3. **Aluminium (Al) :** Utilisé en petites quantités pour la désoxydation et pour améliorer la résistance à l'oxydation.

Exemples de Grades Courants

1. **(X5CrNi 18-10) :** Le grade le plus courant avec environ 18% de chrome et 8% de nickel.

2. **(X5CrNiMo 17-12-2) :** Contient du molybdène (≈ 3.5%) pour une meilleure résistance à la corrosion, particulièrement en milieu salin.

3. **(X6CrNiTi 18-10) :** Stabilisé au titane pour éviter la corrosion intergranulaire après le soudage.

Ces aciers inoxydables austénitiques sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles, y compris la construction, les équipements médicaux, les industries chimiques, et les appareils de cuisine en raison de leur combinaison de propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion.

1.4.2 Classement des aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques peuvent être classés en fonction de leur teneur en carbone et des éléments d'addition de la manière suivante :

1. **Aciers austénitiques sans molybdène :** Ces types d'aciers sont très utilisés car ils offrent un bon compromis entre le coût et la résistance à la corrosion ;

2. **Aciers austénitiques au molybdène :** L'ajout de molybdène améliore la résistance à la corrosion par piqûres, notamment en présence de chlorures ;

3. **Aciers austénitiques à très bas carbone :** Avec une teneur en carbone inférieure à 0, 03%, ces aciers évitent la corrosion intergranulaire car le carbone reste en solution solide et ne se combine pas avec le chrome pour former des carbures de chrome ;

4. **Aciers austénitiques stabilisés :** L'ajout de titane et/ou de niobium empêche la précipitation des carbures de chrome après des traitements thermiques ou des procédés de soudage. Ces aciers conservent de bonnes caractéristiques mécaniques jusqu'à 600°C ;

5. **Aciers super austénitiques :** Enrichis en nickel et en azote, ces aciers ont une structure entièrement austénitique grâce à leur teneur élevée en chrome et en molybdène, ce qui leur confère une excellente résistance à la corrosion dans des environnements agressifs.

1.4.3 Relation avec les aciers traditionnels

Comparativement aux aciers au carbone, tous les types d'aciers inoxydables offrent une meilleure résistance à la corrosion grâce à leur teneur élevée en chrome. Cependant, les aciers inoxydables austénitiques se distinguent par leur capacité à résister à une gamme encore plus large de milieux corrosifs et à maintenir leur intégrité structurelle et esthétique même sous des contraintes sévères, ce qui les rend idéaux pour des applications dans des environnements très exigeants tels que les installations maritimes, les usines chimiques et les équipements médicaux(14).

1.5 Aciers austénitiques 316

L'acier inoxydable austénitique de type 316 est l'un des aciers inoxydables les plus fréquemment utilisés, notamment en raison de sa résistance exceptionnelle à la corrosion, surpassant celle d'autres grades comme le 304. Voici une analyse détaillée de ses propriétés et de ses utilisations.

1.5.1 Composition de l'Acier Inoxydable 316

L'acier inoxydable 316 contient :

- Chrome : 16 − 18% ;
- Nickel : 10 − 14% ;
- Molybdène : 2 − 3% ;
- Carbone : Maximum 0.08% ;
- Manganèse : Maximum 2% ;
- Silicium : Maximum 1% ;
- Phosphore : Maximum 0.045% ;
- Soufre : Maximum 0.03%.

La présence de molybdène augmente la résistance à la corrosion en milieu marin et contre les attaques chimiques par des substances telles que les acides sulfuriques, acides chlorhydriques, et les chlorures.

1.5.2 Propriétés physiques et mécaniques

- L'acier 316 possède une excellente résistance à la corrosion, y compris à la corrosion par piqûre et crevasse, ce qui est crucial pour les applications marines et chimiques. Il est aussi bien adapté à des températures élevées, capable de résister jusqu'à 870°C en continu(4).

- Ce type d'acier est ductile, facile à former, à souder et à finir, ce qui le rend idéal pour de nombreuses fabrications complexes(4).

1.5.3 Applications typiques de l'acier 316

Largement utilisé dans l'industrie chimique pour les réservoirs et les tuyauteries exposés à des substances corrosives. Dans l'industrie marine, pour le matériel résistant à l'eau salée. En médical, pour les instruments chirurgicaux et autres équipements nécessitant une haute résistance à la stérilisation et à la corrosion. L'acier 316 est également prisé dans l'industrie alimentaire, pour les équipements en contact avec les aliments, en raison de sa capacité à résister à la corrosion sans contaminer les aliments(8).

1.5.4 Désignation européenne

L'acier inoxydable X5CrNi18-10 correspond à la désignation européenne de l'acier inoxydable 304, dont la norme est EN 10088-1 et sa composition typique est comme suite :

- **Carbone (C) :** $\leq 0,07\%$;
- **Chrome (Cr) :** $17,5 - 19,5\%$;
- **Nickel (Ni) :** $8,0 - 10,5\%$;
- **Manganèse (Mn) :** $\leq 2,0\%$;
- **Silicium (Si) :** $\leq 1,0\%$;
- **Phosphore (P) :** $\leq 0,045\%$;
- **Soufre (S) :** $\leq 0,015\%$;
- **Azote (N) :** $\leq 0,11\%$.

Cet acier est connu pour sa bonne résistance à la corrosion et est couramment utilisé dans diverses applications industrielles et domestiques.

1.6 Propriétés et applications des aciers inoxydable austénitique

Les aciers inoxydables présentent une vaste gamme de structures, ce qui se traduit par des propriétés physiques, mécaniques et surtout chimiques diversifiées. Leur principale caractéristique est leur exceptionnelle résistance à la corrosion, conférant à ces aciers une durabilité remarquable dans la majorité des environnements. En outre, ils possèdent des propriétés mécaniques élevées, tant à haute qu'à basse température, incluant une résistance mécanique, une ductilité et une ténacité accrues. Grâce à leur résistance à la corrosion et à leurs finitions de surface de qualité supérieure, les aciers inoxydables occupent une place prédominante dans diverses industries telles que l'aéronautique, la chimie, la pharmacie et l'agroalimentaire. Ils sont également largement utilisés dans les cuisines professionnelles, l'architecture et même la bijouterie.

1.6.1 Propriétés de mise en forme

Les aciers inoxydables peuvent être produits et transformés à l'aide d'un large éventail de technologies et sont entièrement recyclables à la fin de leur cycle de vie. Leur usinage est cependant beaucoup plus complexe que celui de certains autres matériaux, ce qui entraîne un coût significativement plus élevé.

1.6.2 Propriétés Physiques des Aciers Inoxydables Austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques, grâce à leur structure cristalline cubique à faces centrées (CFC), présentent un ensemble de propriétés physiques qui les rendent particulièrement adaptés à une multitude d'applications. Voici une analyse détaillée de ces propriétés :

- Densité : Les aciers inoxydables austénitiques ont une densité légèrement supérieure à celle des aciers au carbone, généralement autour de 7,9 à 8,0 g/cmS. Cette densité plus élevée est due à la présence de nickel et de chrome en proportions significatives (15) .

- Conductivité thermique : Bien que les aciers inoxydables austénitiques ne soient pas les meilleurs conducteurs de chaleur, ils possèdent une conductivité thermique qui varie généralement entre 15 et 25 W/m-K, en fonction de la composition exacte et de la température. Cette conductivité est sensiblement inférieure à celle des aciers au carbone, une caractéristique due en partie à la structure CFC qui réduit la liberté de mouvement des électrons(3).

- Capacité thermique spécifique : Les aciers austénitiques ont une capacité thermique spécifique plus élevée que les aciers ferritiques ou martensitiques, généralement dans la gamme de 500 J/kg-K. Cela signifie qu'ils peuvent absorber plus de chaleur avant de s'échauffer, une propriété utile dans les applications impliquant des variations de température élevées(16).

- Expansion thermique : L'un des inconvénients des aciers inoxydables austénitiques est leur coefficient d'expansion thermique élevé, environ 16 à 18 x 10 ˆ-6 /°C, ce qui est

nettement plus élevé que celui des aciers au carbone. Cette propriété doit être prise en compte dans les conceptions d'ingénierie où les matériaux sont exposés à des variations de température importantes(4).

- Module d'élasticité : Le module d'élasticité des aciers inoxydables austénitiques est légèrement inférieur à celui des aciers au carbone, typiquement autour de 200 GPa. Cela leur confère une moindre rigidité mais une meilleure capacité à absorber l'énergie sans se rompre(17).

- Résistance électrique : Ces aciers ont également une résistance électrique relativement élevée, de l'ordre de 0,7 à 0,8 Ωm, due à la perturbation du réseau cristallin par les atomes de nickel et de chrome. Cette propriété est importante dans les applications nécessitant un contrôle précis du courant électrique(18).

1.6.3 Propriétés Mécaniques des Aciers Inoxydables Austénitiques

- **Résistance à la traction :** Les aciers inoxydables austénitiques offrent une résistance à la traction typiquement entre 500 et 800 MPa. Cette plage peut augmenter significativement après un travail à froid, ce qui est souvent exploité pour renforcer le matériau dans des applications exigeantes sans recourir à des traitements thermiques(3).

- **Limite d'élasticité :** La limite d'élasticité de ces aciers est relativement basse comparée à leur résistance à la traction, se situant généralement entre 200 et 300 MPa. Cette faible limite d'élasticité rend les aciers austénitiques moins rigides, mais plus ductiles et mieux adaptés à des applications nécessitant une déformation significative sans rupture(3).

- **Ductilité :** L'une des propriétés les plus remarquables des aciers inoxydables austénitiques est leur haute ductilité. Ils peuvent subir de grandes déformations plastiques avant rupture, ce qui est quantifié par des allongements à la rupture souvent supérieurs à 40%. Cette ductilité élevée les rend idéaux pour le formage profond, le pliage, et d'autres processus de mise en forme à froid(15).

- **Résilience :** Les aciers inoxydables austénitiques possèdent également une excellente résilience, même à très basses températures, ce qui les rend utiles dans les applications cryogéniques. Cette résilience est due à leur structure CFC qui ne subit pas de transition ductile-fragile comme c'est le cas pour les aciers ferritiques ou martensitiques(17).

- **Dureté :** À l'état recuit, ces aciers ont une dureté relativement basse, typiquement dans la gamme de 150 à 200 HB (Brinell). Cependant, leur dureté peut être augmentée par écrouissage, un processus où la déformation plastique à froid augmente les dislocations dans la structure, rendant le matériau plus dur et plus résistant(16).

- **Fatigue :** Les aciers austénitiques ont une bonne résistance à la fatigue, particulièrement importante pour les composants qui subissent des cycles de charge répétés. Leur performance en fatigue peut être améliorée par des finitions de surface soignées et des traitements thermiques appropriés(19).

- **Microdureté :** La microdureté des aciers inoxydables austénitiques varie en fonction de la composition spécifique de l'alliage et du traitement subi. Typiquement, la mi-

crodureté se situe dans une gamme de 200 à 400 HV (Vickers). Cette plage peut être influencée par des facteurs tels que le travail à froid, l'écrouissage et la teneur en éléments d'alliage comme le carbone, le chrome et le nickel.

1.6.4 Propriété Électrique des Aciers Inoxydables Austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques présentent une résistance électrique relativement élevée, généralement comprise entre 0,69 et 0,73 $\mu\Omega \cdot m$. Cette résistivité est supérieure à celle des aciers au carbone et de nombreux autres métaux (3), en raison de la présence de chrome et de nickel. Cette caractéristique les rend moins adaptés aux applications nécessitant une conductivité électrique élevée, mais avantageux pour les applications où une faible conductivité est souhaitable, comme certains capteurs, ou lorsque la résistance à la corrosion et les propriétés mécaniques priment sur la conductivité électrique.

1.6.5 Propriétés magnétiques des Aciers Inoxydables Austénitiques

- **Non-magnétisme :** Les aciers inoxydables austénitiques sont généralement non-magnétiques à l'état recuit. Cette caractéristique est due à leur structure cristalline cubique à faces centrées (CFC), qui ne présente pas d'alignement magnétique naturel à température ambiante. C'est une propriété clé qui les rend particulièrement utiles dans les applications où le magnétisme pourrait être problématique, comme dans certains équipements médicaux et électroniques(3).
- **Effet de l'écrouissage :** Bien que non-magnétiques dans leur état recuit, les aciers inoxydables austénitiques peuvent devenir légèrement magnétiques lorsqu'ils sont soumis à un écrouissage. Le travail à froid, comme le pliage, le martelage ou le laminage, peut restructurer la matrice cristalline et induire des transformations de phase locales qui rendent le matériau légèrement magnétique. Cet effet est généralement très faible et ne nuit pas significativement aux propriétés anticorrosives de l'acier(4).

1.6.6 Propriétés de composition et de structure

Les aciers inoxydables austénitiques se composent principalement de fer, chrome (16% à 26%) et nickel (8% à 20%), des éléments essentiels qui stabilisent la phase austénitique de l'acier(3). Cette catégorie d'acier contient aussi du molybdène pour une meilleure résistance à la corrosion, et du carbone en faibles quantités pour éviter la formation de carbures de chrome. D'autres éléments comme le manganèse, le silicium, et l'azote sont ajoutés pour améliorer diverses propriétés mécaniques et stabiliser davantage la structure austénitique(4). La structure cristalline de ces aciers est cubique à faces centrées (CFC), qui reste stable sur une large gamme de températures. Cette structure confère aux aciers une excellente ductilité et résistance à la corrosion, les rendant idéaux pour de nombreuses applications industrielles(4).

Applications spécifiques : Le non-magnétisme des aciers inoxydables austénitiques est un avantage majeur dans les industries qui nécessitent des environnements non ma-

gnétiques, comme l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou d'autres applications sensibles aux champs magnétiques.

1.7 Procédure de Fabrication des aciers inoxydables

La production des aciers inoxydables se déroule en quatre étapes principales, détaillés, dans l'ordre chronologique suivant :

- **L'élaboration :** Cette phase comprend une fusion dans un four à arc suivie d'une opération d'affinage ;
- **La coulée :** Réalisée soit sous forme de lingots, soit de plus en plus souvent par coulée continue ;
- **La transformation à chaud :** Principalement effectuée par laminage et, plus rarement, par forgeage ;
- **La transformation à froid :** Effectuée par laminage pour les produits plats et par tréfilage pour les produits longs.

1.8 Diagrammes de phases

Les aciers sont constitués de divers éléments, chacun influençant leurs structures et leurs propriétés. En raison du grand nombre d'éléments impliqués dans la composition des aciers, l'établissement de diagrammes de phases complets n'est pas réalisable. Cependant, il est utile de se familiariser avec les diagrammes de phases binaires entre le fer et les autres éléments.

1.8.1 Phases de référence

Avant d'examiner les différents diagrammes d'équilibre, il est nécessaire de rappeler les variétés allotropiques du fer pur, comme illustré sur la Figure 1.4. Le fer possède trois structures cristallines distinctes entre 0 °C et sa température de fusion. Entre la température ambiante et 910 °C, le fer adopte une structure cubique centrée, appelée fer α. À partir de 910 °C, il se transforme en fer γ, qui possède une structure cubique à faces centrées. Une nouvelle transformation se produit à 1400 °C, jusqu'à 1538 °C, où le fer reprend une structure cubique centrée, connue sous le nom de fer δ.

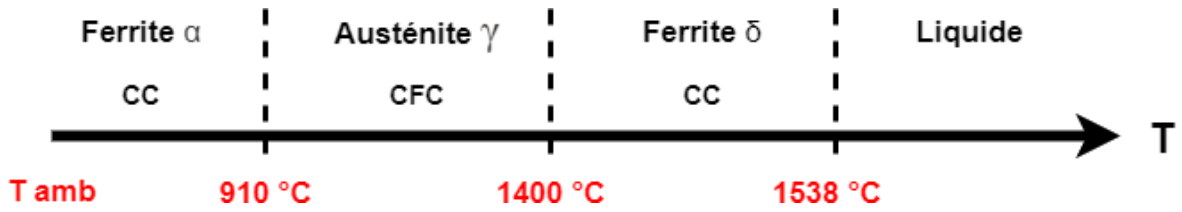


FIG. 1.4 : Variétés allotropiques du fer pur .

1.8.2 Diagramme de phase Fe-Cr

Le diagramme de phase Fe-Cr (fer-chrome) (figure 1.5) est essentiel pour comprendre les propriétés des aciers inoxydables, en particulier la manière dont différents pourcentages de chrome influencent la structure et la résistance à la corrosion des alliages. Ce diagramme illustre les changements de phase que subissent les alliages de fer et de chrome à différentes températures et compositions.

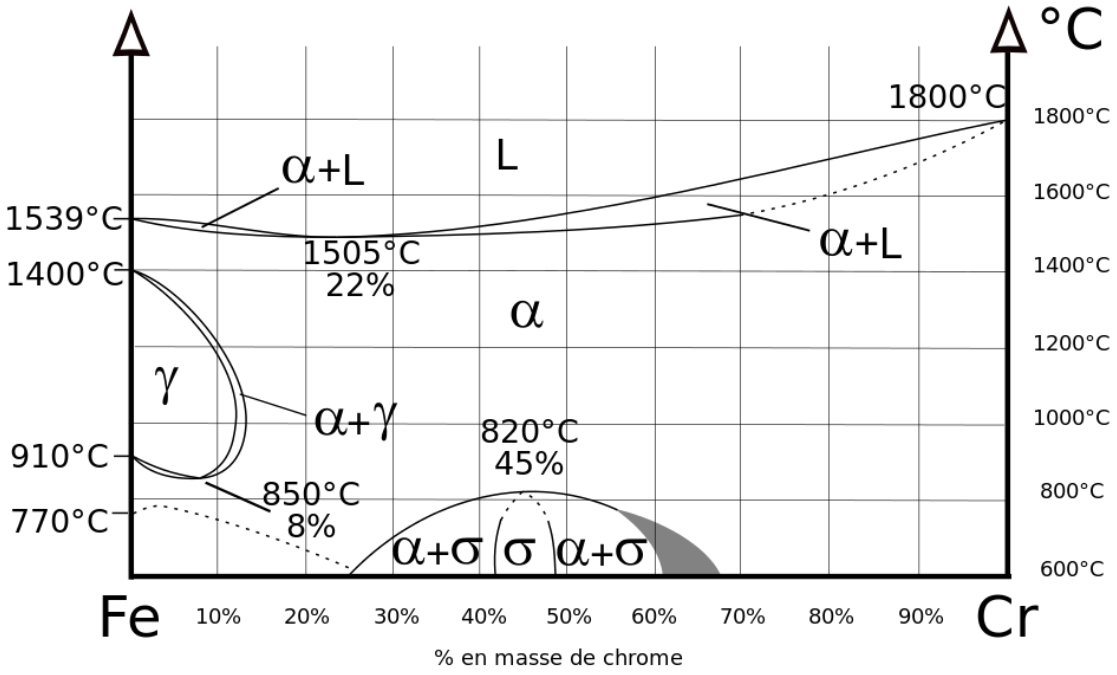


FIG. 1.5 : Diagramme de phase fer-chrome(20)

Le diagramme de phase Fe-Cr est essentiel pour comprendre comment les variations de pourcentage de chrome affectent la structure et les propriétés des aciers inoxydables. Voici les points clés :

1. Phases Principales :

   - Ferrite (α) : Phase stable à basse température pouvant contenir jusqu'à 12% de chrome(3) ;

- Austénite (γ) : Phase stable à haute température, se forme avec plus de 12% de chrome sous certaines conditions thermiques(3) ;
- Sigma (σ) : Phase intermétallique dure et fragile, apparaissant entre 40% et 60% de chrome ; elle est évitée en pratique car elle diminue la ductilité et la résistance à la corrosion(3).

2. Influence du Chrome :
   Le chrome augmente la résistance à la corrosion en formant une couche passive d'oxyde de chrome sur la surface de l'acier. L'ajout de chrome favorise la formation de ferrite et potentiellement de sigma, affectant la structure globale de l'alliage(3).

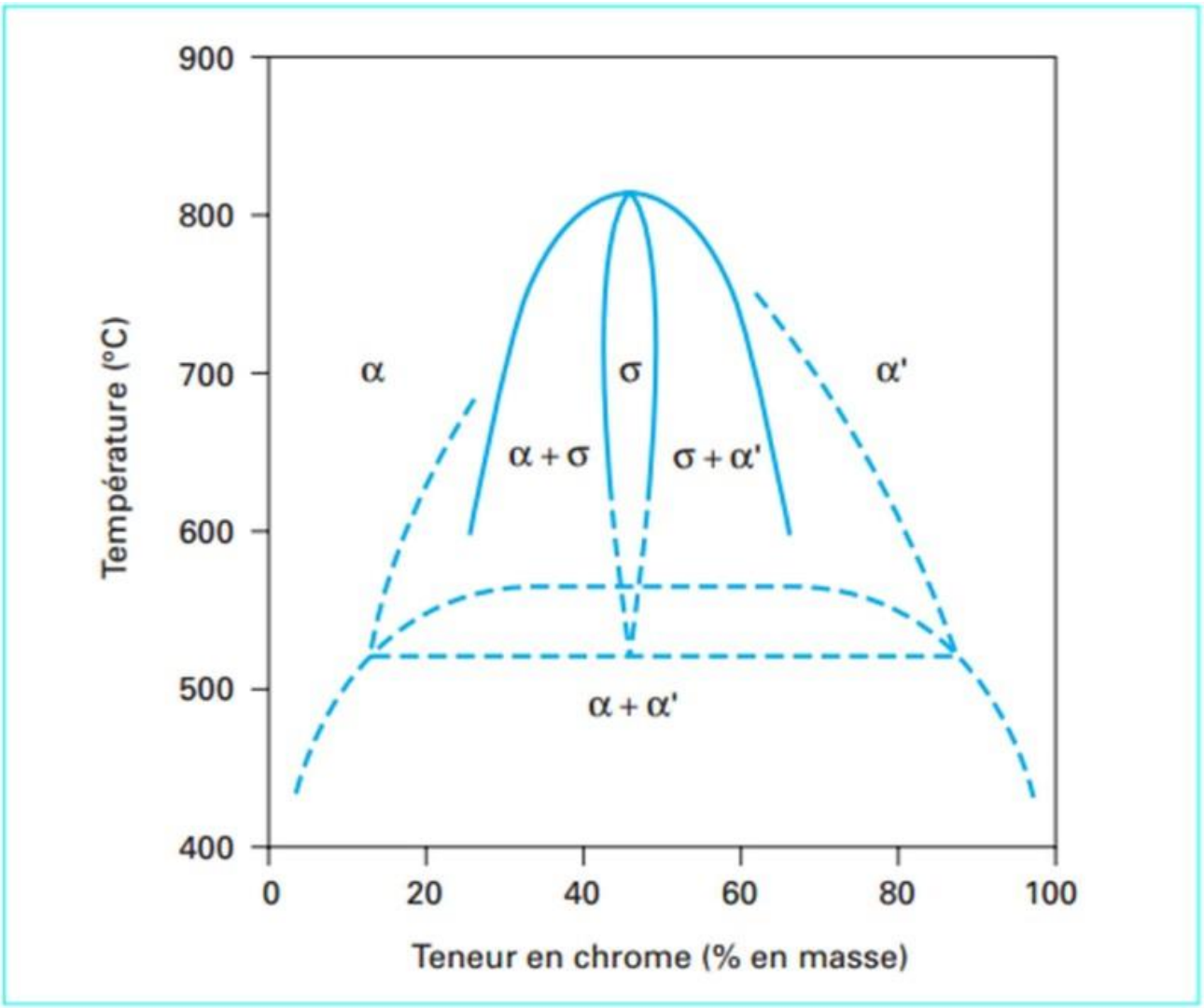


FIG. 1.6 : Diagramme d'équilibre fer-crhome à des températures inférieures(20)

3. Points Critiques :

- Point Eutectoïde : À environ 13% de chrome, transformation eutectoïde de l'austénite en un mélange de ferrite et de carbures de chrome(3).

- Solubilité du Chrome : La solubilité du chrome dans la ferrite diminue avec la baisse de la température, entraînant la précipitation de carbures de chrome qui affectent les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion(3).

4. Applications Pratiques :
   Le diagramme est essentiel pour les métallurgistes et les ingénieurs dans le développement et l'optimisation de nouveaux aciers inoxydables, permettant de prédire le comportement de l'alliage sous différentes conditions de service(3).

1.8.3 Diagramme Fe-Ni

Le diagramme Fe-Ni (figure 1.7) montre que le domaine de la phase γ s'étend avec l'augmentation de la teneur en nickel. Le nickel, étant un élément gammagène, adopte une structure cubique à faces centrées et favorise la formation de la phase austénitique en raison de l'isomorphisme.

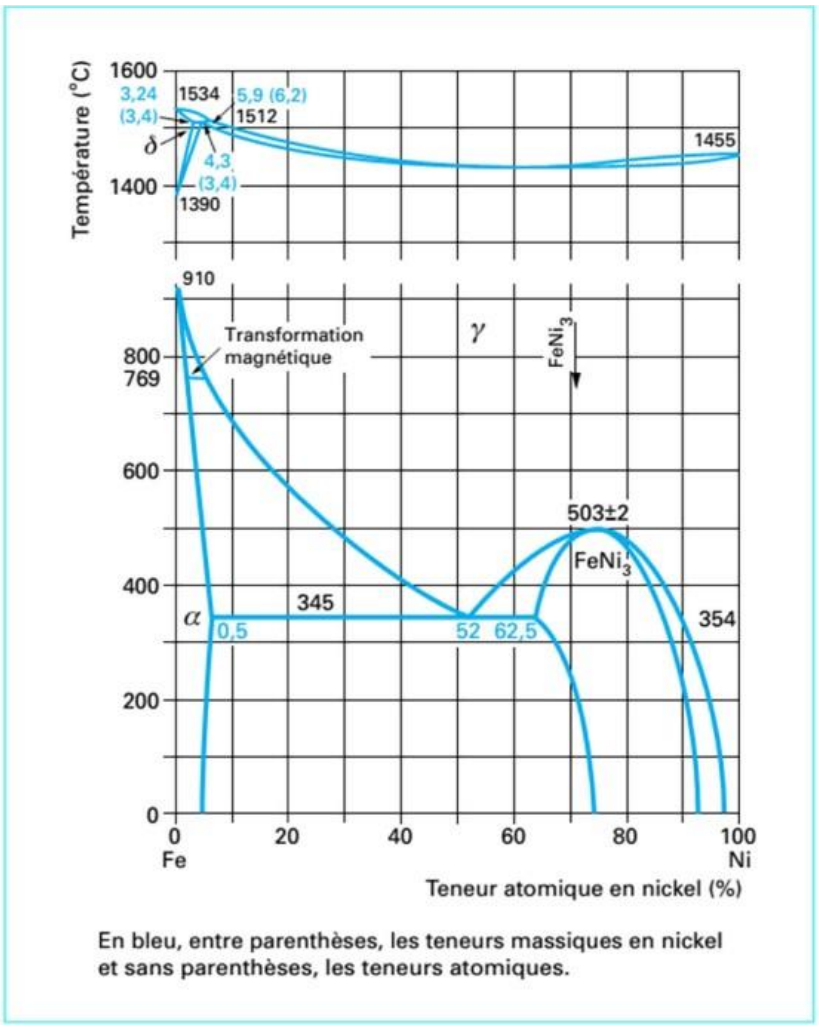


FIG. 1.7 : Diagramme Fe-Ni[20]

1.8.4 Diagramme Fe-Cr-Ni

L'ajout de nickel entraîne une augmentation de la boucle γ dans les alliages fer-chrome. La phase γ du système Fe-Cr présente une large plage de composition et de température, participant à des équilibres biphasés et triphasés. La figure 1.8, qui est une coupe du diagramme ternaire Fe-Cr-Ni, illustre clairement le déplacement de la boucle γ vers des teneurs plus élevées en chrome avec l'augmentation de la teneur en nickel.

1.9 Influence des éléments d'addition

Les éléments additionnels se répartissent en deux catégories : les alphagènes (comme le silicium, l'aluminium, le chrome, le molybdène, le tungstène, le titane et le niobium) et les gammagènes (comme le nickel, le manganèse, l'azote, le carbone, le cuivre et le cobalt). Parmi eux, certains ont des effets plus marqués, notamment l'azote et le carbone, dont l'effet gammagène est environ trente fois plus puissant que celui du nickel.

1.9.1 Éléments Alphagènes Principaux dans les Aciers Inoxydables

- **Chrome (Cr) :** Le chrome est un élément essentiel dans tous les aciers inoxydables, connu pour augmenter la résistance à la corrosion et pour stabiliser la structure ferritique. Il est particulièrement important dans les aciers inoxydables ferritiques et martensitiques(4) ;
- **Molybdène (Mo) :** Le molybdène améliore la résistance à la corrosion par piqures et crevasses, particulièrement en présence de chlorures, et aide à stabiliser la phase ferritique(4) ;
- **Silicium (Si) :** Utilisé pour améliorer la résistance à l'oxydation à haute température et pour optimiser les propriétés de fabrication, le silicium affecte également la fluidité du métal fondu(3) ;
- **Titane (Ti) et Niobium (Nb) :** Bien qu'ils ne soient pas traditionnellement classés comme alphagènes, ces éléments jouent un rôle crucial dans la prévention de la sensibilisation en se liant avec le carbone. Cette action réduit la formation de carbures de chrome aux joints de grains, influençant indirectement la distribution des phases ferritiques et austénitiques(3).

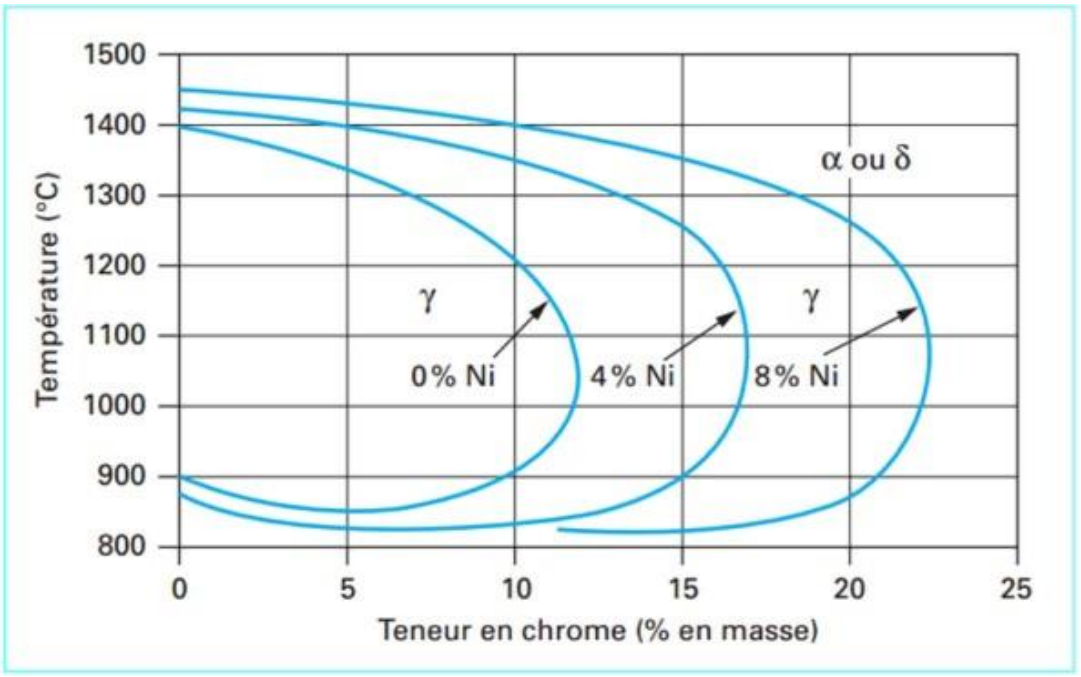


FIG. 1.8 : Coupes de diagramme de phases ternaire Fe-Cr-Ni[29].

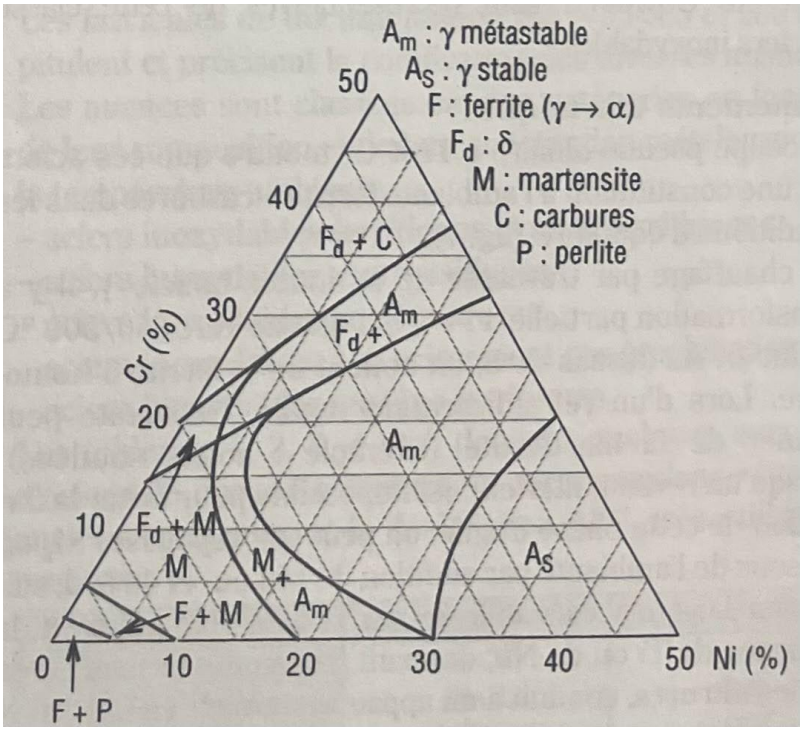


FIG. 1.9 : Constitution des alliages Fe-Ni-Cr à 0,1 % C à température ambiante après hypertrempe(21).

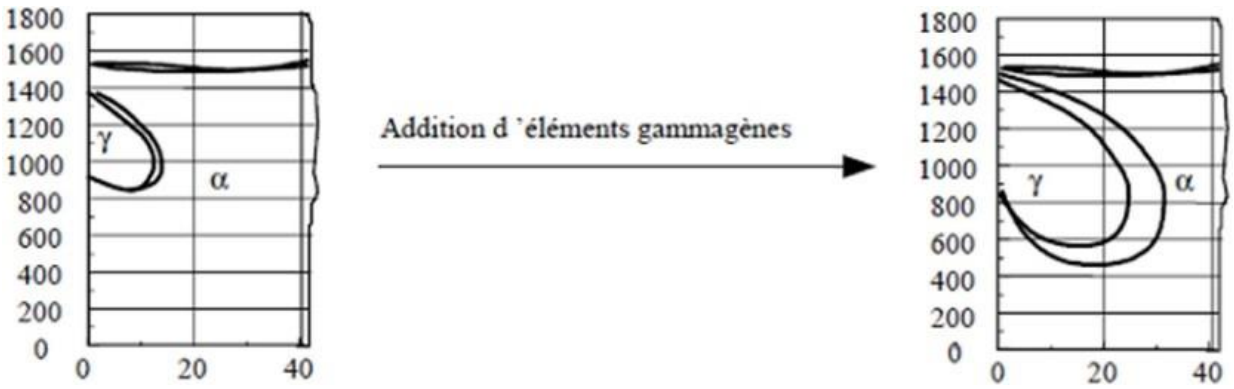


FIG. 1.10 : Diagramme Fer-Chrome – Influence de l'addition d'éléments gammagènes (21)

1.9.2 Principaux Éléments Gammagènes

- **Nickel (Ni) :** Le nickel est l'élément gammagène le plus courant et le plus efficace. Il favorise la structure austénitique cubique à faces centrées, qui est non magnétique et hautement ductile. Le nickel améliore également la résistance à la corrosion en milieu alcalin et réducteur(3) ;
- **Manganèse (Mn) :** Comme le nickel, le manganèse stabilise également la phase austénitique. Il est souvent utilisé comme substitut moins coûteux au nickel dans certains aciers inoxydables. Le manganèse augmente également la dureté et la résistance à l'usure, mais en quantités plus élevées, il peut rendre l'acier plus fragile(3) ;
- **Azote (N) :** L'azote est un stabilisateur efficace de la phase austénitique et augmente significativement la résistance à la corrosion, particulièrement la résistance à la corrosion par piqûres et crevasses. En plus de stabiliser l'austénite, l'azote améliore la résistance mécanique de l'acier sans réduire sa ductilité(4) ;
- **Carbone (C) :** Le carbone n'est pas seulement un élément essentiel pour augmenter la dureté et la résistance de l'acier par formation de carbures, mais dans des quantités contrôlées, il aide également à stabiliser la phase austénitique. Cependant, trop de carbone peut favoriser la formation de carbures de chrome aux joints de grains, ce qui peut diminuer la résistance à la corrosion(4).

Impact des Éléments Gammagènes :

Les éléments gammagènes sont cruciaux pour le développement des aciers inoxydables austénitiques, car ils permettent aux aciers de maintenir leur structure austénitique à température ambiante, les rendant non magnétiques et exceptionnellement résistants à la corrosion. Ils sont aussi importants pour améliorer la ductilité, ce qui est crucial pour les processus de fabrication comme le formage, le pliage, et le soudage.

1.10 Traitement Thermique

1.10.1 Introduction

Les traitements thermiques englobent une série d'opérations de chauffage et de refroidissement qui visent à modifier les propriétés des matériaux pour les rendre plus aptes à des applications spécifiques. Voici les principaux objectifs de ces traitements :

1. Amélioration des propriétés mécaniques :
    - Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique (Re, Rem, $A\%$) : Ces traitements renforcent la tenue des matériaux sous des charges mécaniques ;
    - Accroissement de la dureté : Ceci permet aux pièces traitées de mieux résister à l'usure et aux impacts, prolongeant ainsi leur durabilité et leur efficacité en service.

2. Raffinement de la structure du matériau : Affinement des grains et homogénéisation de la structure. Particulièrement utile pour les matériaux ayant subi le forgeage, ces ajustements aident à optimiser la microstructure pour un meilleur comportement mécanique ;

3. Élimination des tensions internes : Suppression des contraintes internes dues à l'écrouissage : Ceci est essentiel avant les opérations de déformation plastique à froid telles que l'emboutissage ou le fluotournage pour éviter des ruptures ou déformations inattendues. En plus du recuit de recristallisation, qui élimine les effets de l'écrouissage, il est important de noter que les traitements thermiques ne sont généralement pas appliqués aux métaux purs. Ils sont principalement utilisés sur certains alliages, notamment les aciers XC et les aciers alliés ZR, ainsi que sur des alliages non ferreux, où l'objectif est souvent d'augmenter la limite élastique et de réduire la fragilité. Typiquement, ces traitements ne modifient pas la composition chimique de l'alliage, mais optimisent ses propriétés physiques et mécaniques. (22)

1.10.2 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 1.11.)

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : 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).

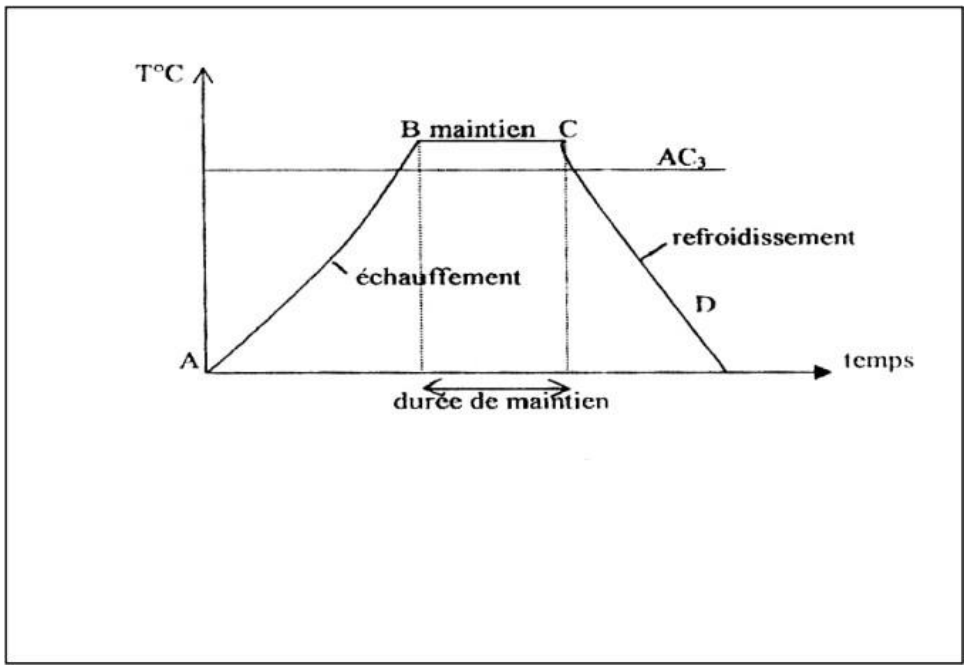


FIG. 1.11 : mode opératoire d'un traitement thermique (22)

1.10.3 Différents types de traitements thermiques

Les traitements thermiques se divisent en deux catégories principales : les traitements thermiques massiques (ou volumiques) et les traitements thermiques surfaciques.

- Les traitements thermiques massiques modifient les propriétés du matériau en profondeur, affectant l'ensemble de la masse du produit ;

- Les traitements thermiques surfaciques, en revanche, altèrent les propriétés du matériau uniquement à la surface, sur une profondeur limitée.

Ces deux méthodes sont choisies en fonction des exigences spécifiques de l'application et des propriétés mécaniques souhaitées pour le matériau (23). La figure 1.12 montre les classifications des traitements thermiques :

1.10.4 Gamme de traitement thermique

Les traitements thermiques sont des procédés cruciaux pour modifier la structure et les propriétés des alliages. Ils consistent à chauffer le matériau à une température précise, à le maintenir à cette température pendant un certain temps, puis à le refroidir rapidement ou lentement selon le type de traitement appliqué.

Parmi les traitements thermiques les plus courants, on trouve la trempe, le revenu et le recuit. Les caractéristiques spécifiques de chaque traitement dépendent largement de la température de maintien et de la vitesse de refroidissement, qui sont ajustées en fonction des propriétés mécaniques souhaitées et des applications envisagées.

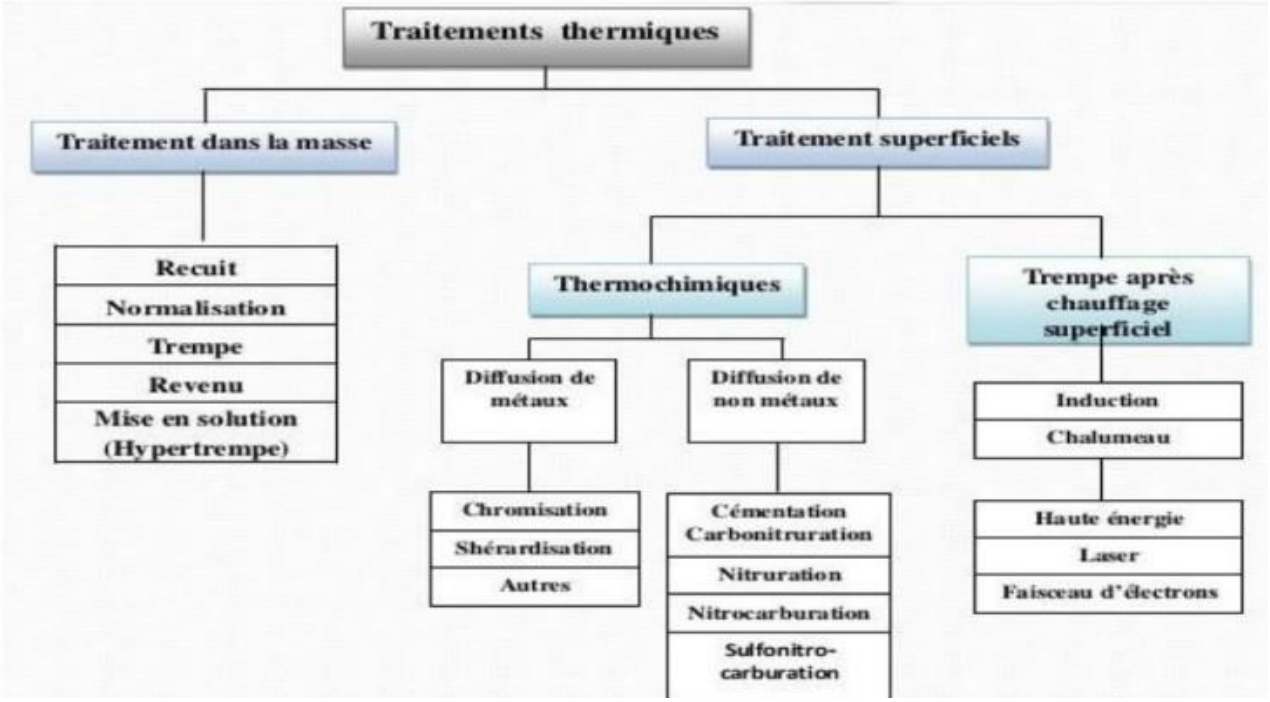


FIG. 1.12 : Classification des traitements thermiques (23)

1.10.5 Trempe

Après chauffage et un temps de maintien, les pièces subissent un refroidissement approprié pour sursaturer en carbone la maille cubique centrée à basse température, en passant par le domaine austénitique. La vitesse de refroidissement est ajustée selon le milieu de trempe utilisé, qui peut être de l'air immobile, de l'air pulsé, de l'huile, ou des bains de sels. Le but est d'obtenir une structure martensitique et d'éviter une transformation perlitique. La transformation de l'austénite doit se faire entièrement dans le domaine martensitique. La trempe permet ainsi de maximiser la dureté de l'acier (HRC = 60 à 65), préparant la structure pour le traitement de revenu (24).

Différents types de trempe

Dans le traitement thermique, il existe différents types de trempe, qui sont utilisés en fonction des propriétés souhaitées pour la pièce traitée. Voici les principaux types de trempe :

a. Trempe martensitique : le type de trempe le plus courant, consiste à refroidir rapidement la pièce après l'avoir chauffée à haute température. Ce procédé crée une structure cristalline appelée martensite, qui est extrêmement dure mais aussi très fragile. Pour améliorer la résistance aux fissures et à la rupture, les pièces traitées par trempe martensitique peuvent nécessiter un revenu ou un traitement de détente. Cette méthode est souvent utilisée pour les aciers à outils et les pièces de machines nécessitant une grande dureté et une haute résistance à l'usure ;

b. Trempe bainitique : Pour obtenir la bainite par trempe, l'acier austénitisé est refroidi à une température précise (240°C à 450°C) suffisamment rapidement pour éviter

la formation de ferrite ou de perlite. Il est ensuite maintenu à cette température jusqu'à transformation complète, puis refroidi à température ambiante. La température de trempe bainitique dépend de la microstructure et de la dureté souhaitées, ainsi que de la vitesse de transformation de l'acier. Ce procédé permet d'obtenir une microstructure plus fine et homogène que la trempe martensitique, améliorant ainsi les propriétés mécaniques du matériau ;

c. Trempe austénitique : Les aciers austénitiques, qui conservent leur structure lors du chauffage et du refroidissement, ne peuvent pas être trempés. Pour adoucir ces aciers, on utilise un procédé appelé hypertrempe. Ce procédé consiste à chauffer les pièces à environ 1 100 °C, puis à les refroidir rapidement pour éviter la précipitation des carbures entre 600 °C et 800 °C. En général, le refroidissement s'effectue dans l'eau.

Technologies de chauffage

Les trois types de trempe peuvent être réalisés dans divers milieux de chauffage, tels que les fours sous atmosphère contrôlée, les fours sous vide ou les bains de sel. Le choix de la technologie de chauffage dépend de la nature, de la taille et de la conductivité des pièces. Un graphique illustrant le cycle général du traitement par trempe est inclus ci-joint.

Il est essentiel de noter que la trempe est toujours suivie d'un ou de plusieurs traitements de revenu. Ces traitements visent à éliminer la fragilité du matériau, à supprimer les contraintes internes et à ajuster la dureté finale (25).

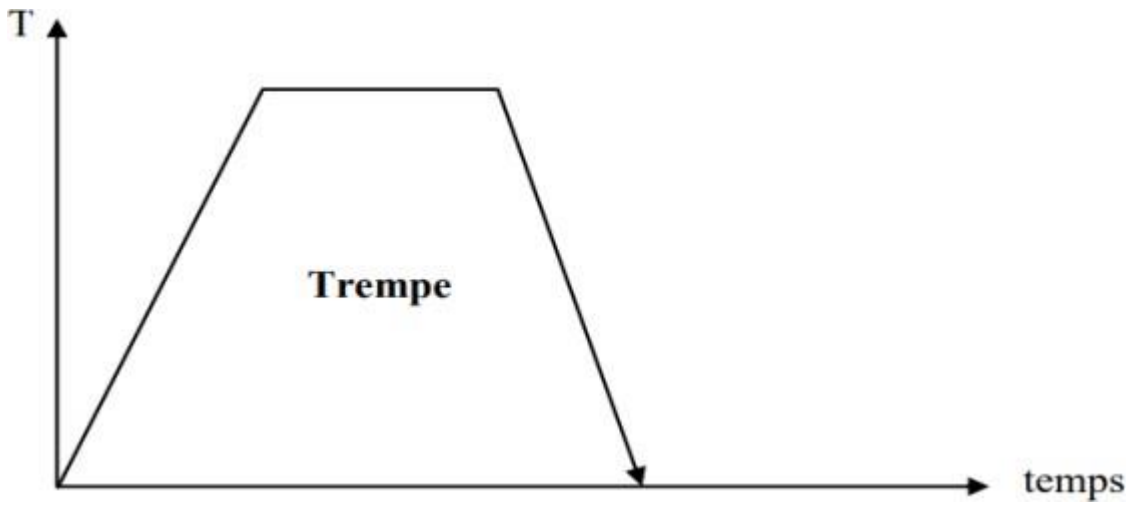


FIG. 1.13 : Cycle thermique lors d'une trempe (25)

Choix de temps de maintien

Il est crucial de maintenir le métal à la température de trempe pour assurer un chauffage homogène et la complétion des transformations de phase, tout en évitant un processus trop lent qui pourrait entraîner une augmentation de la taille des grains et une perte de carbone dans les couches superficielles des pièces.
La durée totale du chauffage (t_t) dépend de deux facteurs :

- Le temps d'échauffement à cœur ($t_{éc}$), qui est le temps nécessaire pour atteindre la température souhaitée. Ce temps varie selon la forme et les dimensions des pièces, la nuance du métal, le type de fours, etc.

- Le temps de maintien isotherme (t_{mi}), qui dépend de la composition et de l'état initial du métal.

Ainsi, la durée totale du chauffage (t_t) est la somme du temps d'échauffement à cœur ($t_{éc}$) et du temps de maintien isotherme (t_{mi}) (26).

Milieux de trempe

Le traitement thermique de trempe nécessite l'utilisation d'un liquide de trempe, choisi en fonction de la trempabilité de l'acier, parmi l'eau, l'huile ou l'air. Ce choix permet de réguler précisément la vitesse de refroidissement des pièces chauffées. La trempe n'est pas un traitement thermique final ; elle est généralement suivie d'un revenu. Le revenu réduit la fragilité et les contraintes internes, conférant à l'acier les propriétés mécaniques souhaitées.

1.10.6 Revenu

Le revenu est une étape finale du traitement thermique visant à corriger les défauts causés par la trempe et à obtenir les propriétés souhaitées en termes de dureté, de résistance à l'usure et de résistance à la rupture. Ce processus consiste à chauffer la pièce trempée à une température inférieure à celle de la trempe, mais suffisamment élevée pour permettre une transformation de la structure cristalline. Cette transformation réorganise les atomes de fer en une structure plus stable, réduisant ainsi la dureté et la fragilité de la pièce.

Le revenu est généralement effectué à des températures comprises entre 150 °C et 700 °C, en fonction des propriétés finales souhaitées et du type d'acier utilisé. Les pièces sont maintenues à cette température pendant une durée spécifique, puis refroidies lentement à l'air ambiant ou à l'aide d'un bain de refroidissement contrôlé pour éviter toute re-trempe.

Il existe plusieurs types de revenu, notamment le revenu de détente, le revenu intermédiaire et le revenu de durcissement. Chacun de ces types de revenu utilise une plage de températures et des durées de traitement spécifiques pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées.

Revenu à basse température

Le traitement thermique de revenu à basse température est généralement effectué en chauffant jusqu'à 250°C, suivi d'un refroidissement progressif. Ce procédé est principalement utilisé pour réduire les contraintes résiduelles internes causées par la trempe et pour transformer la martensite en martensite de revenu, améliorant ainsi la résistance à l'usure et la ductilité sans sacrifier significativement la dureté (58-63 HRC). Cette technique est couramment employée pour les outils de coupe et les instruments de mesure en aciers

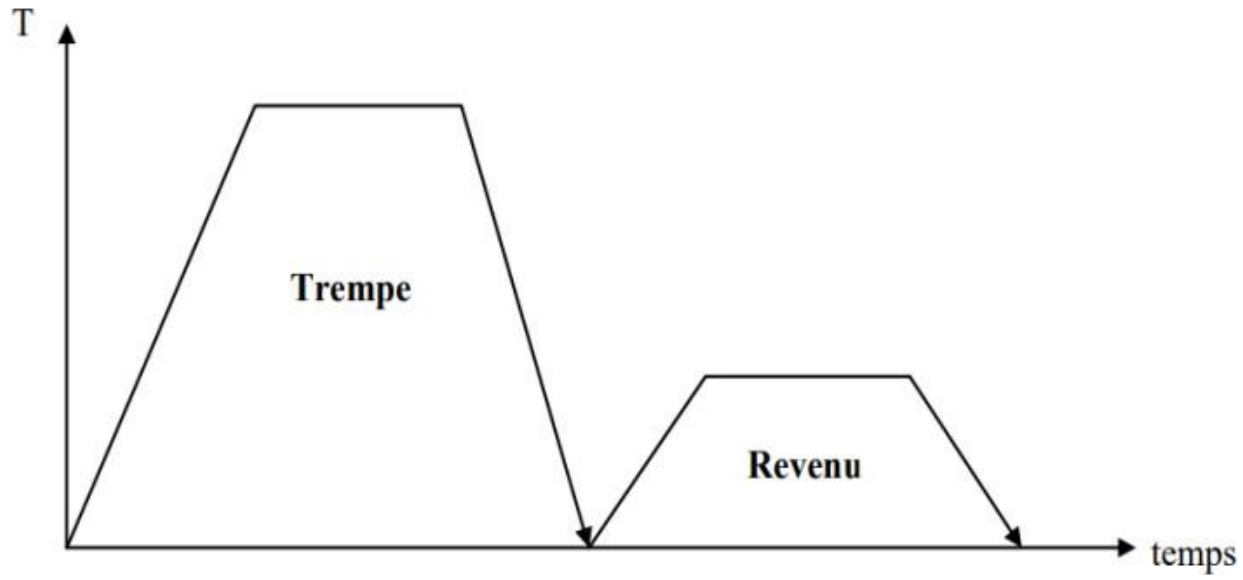


FIG. 1.14 : Cycle thermique complet d'une trempe et revenu (27)

faiblement alliés et au carbone. La durée du revenu peut varier de 1 à 3 heures selon les exigences spécifiques de l'application.

Revenu à température intermédiaire

Le procédé de revenu à température moyenne, réalisé entre 350 et 500°C, est utilisé pour les ressorts et les pièces estampées. Il procure une limite élastique plus élevée et une meilleure résistance à la fatigue. La structure obtenue est une combinaison de troostite de revenu et de martensite, avec une dureté comprise entre 40 et 50 HRC. Après un revenu à 400 ou 450°C, le refroidissement s'effectue dans l'eau, ce qui génère des contraintes de compression résiduelles à la surface.

Revenu à haute température

Le traitement de revenu à haute température, réalisé entre 500 et 680°C, permet d'obtenir une structure sorbite de revenu. Ce traitement améliore le rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier. La combinaison de la trempe suivie d'un revenu à haute température, connue sous le nom de traitement double d'amélioration, améliore significativement les limites de rupture et d'élasticité, la striction, et surtout la résilience par rapport à l'état normalisé ou recuit. Ce traitement est principalement utilisé pour les aciers de construction à teneur moyenne en carbone (0, 3% à 0, 5%) (27).

1.10.7 Recuit

Les aciers possèdent une caractéristique intrinsèque qui leur permet d'acquérir une large gamme de propriétés distinctes grâce à divers traitements thermiques. Les recuits, en général, visent à ramener les alliages à un équilibre physico-chimique et mécanique

optimal en éliminant les états hors d'équilibre résultant des traitements thermiques antérieurs. Ainsi, le recuit permet d'atteindre des valeurs maximales de ductilité (résilience et allongement) et des valeurs minimales de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture).

Le recuit a pour objectifs de :

- Diminuer la dureté d'un acier trempé ;
- Obtenir un maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques ;
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé ;
- Homogénéiser les textures hétérogènes ;
- Réduire les contraintes internes.

Le cycle thermique du recuit comprend les étapes suivantes :

- Une phase de chauffage jusqu'à atteindre la température de recuit, qui varie selon le type de recuit à effectuer ;
- Un temps de maintien isotherme à la température de recuit, ponctué d'éventuelles oscillations thermiques ;
- Un refroidissement extrêmement lent, généralement effectué à l'aide d'air stagnant. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit (28).

Avec :

- **Tr :** température de recuit.
- **tc :** temps de chauffage.
- **tm :** temps de maintien.
- **tr :** temps de refroidissement.

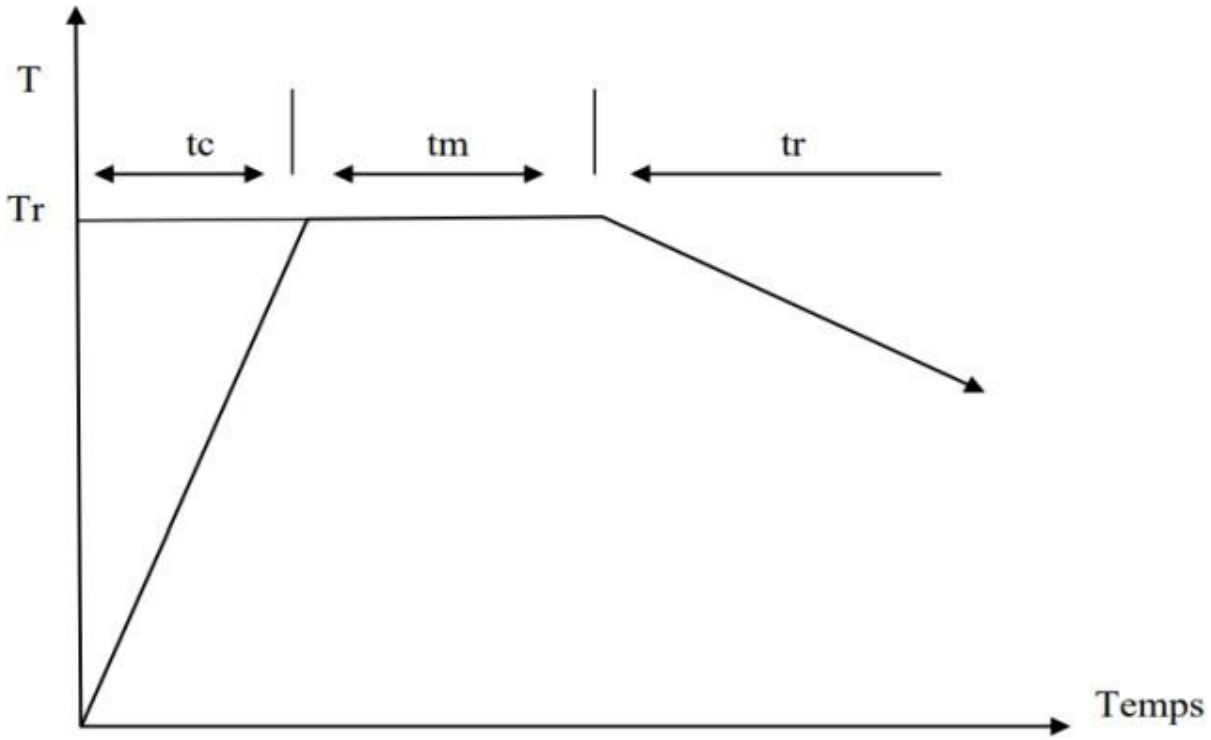


FIG. 1.15 : Cycle thermique d'un recuit (28)

Chapitre 2

Matériaux et Techniques expérimentales

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les diverses techniques expérimentales et de caractérisation employées dans ce travail. Nous discuterons le principe de fonctionnement et le mode opératoire de chaque appareil, ainsi que les paramètres expérimentaux utilisés.

2.2 Matériau utilisé

Le matériau, utilisé dans cette étude, est l'acier austénitique 316. Sa composition chimique est représentée dans le tableau 2.1

C%	Cr%	Ni%	Si%	Mn%	P%	S%	N%
Max 0,07	17-19,5	8-10,5	≤ 1	≤ 2	$\leq 0,045$	0,015	0,11

TAB. 2.1 : Composition chimique de l'acier inoxydable X5CrNi18-10.

2.3 Appareillage

2.3.1 Four de traitement thermique

Le four à chambre avec isolation en fibres électriques de haute précision est un four de laboratoire polyvalent, conçu pour tester des matériaux et effectuer des traitements thermiques tels que le revenu, le frittage ou la cuisson d'échantillons de céramique et de grès jusqu'à 1300 °C. Pour éliminer les gaz ou fumées dégagés pendant le traitement thermique, un système d'échappement peut être installé. Ce four est idéal pour les laboratoires scientifiques, les établissements d'enseignement, les ateliers de céramique, ainsi que pour des applications en médecine et dans l'industrie.



FIG. 2.1 : Four à chambre isolant de fibres électriques de haute précision.

2.3.2 Traitement Thermique

Un ensemble de traitement à été effectué sur cinq echantillons, comme suite :

- L'échantillon (1) Acier X5CrNi8-10 à l'état brut, sans traitement thermique préalable .
- L'échantillon (2) d'acier X5CrNi8-10 a été traité thermiquement par recuit à une température d'austénitisation de 1000 °C. Ensuite, l'échantillon a été refroidi lentement dans le four, suivi d'un revenu jusqu'à 450 °C, puis écroui (au marteau).
- L'échantillon (3) d'acier X5CrNi8-10 a été traité thermiquement à une température d'austénitisation de 1000 °C, avec un temps de maintien de 40 minutes. Cela a été suivi d'une trempe à l'eau pour la pièce (3), puis d'un revenu jusqu'à 450 °C.
- L'échantillon (4) d'acier X5CrNi8-10 a été traité thermiquement à une température d'austénitisation de 1000 °C, avec un temps de maintien de 20 minutes. Cela a été suivi d'une trempe à l'eau pour la pièce (4), puis d'un revenu jusqu'à 450 °C.
- L'échantillon (5) d'acier X5CrNi8-10 a été traité thermiquement à une température d'austénitisation de 1000 °C, avec un temps de maintien de 30 minutes. Cela a été suivi d'une trempe à l'eau pour la pièce (5), puis d'un revenu jusqu'à 450 °C.

2.3.3 Polisseuse

Le polissage est une étape cruciale dans la préparation des échantillons métallographiques pour l'analyse microstructurale. A cet effet, il a été procédé au polissage des échantillons d'Acier Austénitique 316 préparés auparavant. Cette section décrit la procédure de polissage d'un échantillon d'acier austénitique 316 en utilisant une polisseuse.

Matériel et Équipement :

- Échantillon d'acier austénitique 316;
- Polisseuse HITECH située dans le hall technologique. OUEZRA ;
- Disques de polissage (granulométrie décroissante : 240, 400, 600, 800, 1200) ;
- Suspensions de diamant (3 µm et 1 µm) ;
- Alcool isopropylique ;
- Chiffons de polissage ;
- Gants de protection.

Procédure de Polissage :

1. Préparation de l'Échantillon :
   - Découper l'échantillon d'acier austénitique 316 à la taille souhaitée ;
   - Nettoyer l'échantillon à l'eau et au savon pour éliminer les impuretés de surface.
2. Polissage Initial :
   - Monter le disque de polissage avec une granulométrie de 240 sur la polisseuse ;
   - Fixer l'échantillon sur le support de la polisseuse ;
   - Appliquer une pression modérée et polir l'échantillon pendant 5 à 10 minutes en utilisant de l'eau comme lubrifiant ;
   - Répéter l'opération avec des disques de granulométrie 400, 600, 800 et 1200, en réduisant progressivement la pression et la durée de polissage.
3. Polissage Finition :
   - Remplacer le disque par un chiffon de polissage et utiliser une suspension de diamant de 3 µm ;
   - Polir l'échantillon pendant environ 5 minutes, en veillant à ce que la surface devienne de plus en plus brillante ;
   - Passer à une suspension de diamant de 1 µm et polir pendant 3 minutes supplémentaires pour obtenir une surface miroir.
4. Nettoyage de l'Échantillon :
   - incer l'échantillon à l'eau distillée ;
   - Nettoyer avec de l'alcool isopropylique pour éliminer les résidus de polissage ;
   - Sécher l'échantillon soigneusement avec de l'air comprimé ou un chiffon propre.

Résultats :

Après le polissage, l'échantillon d'acier austénitique 316 doit présenter une surface lisse et brillante, exempte de rayures et de défauts visibles. Cette surface est maintenant prête pour les analyses microstructurales, telles que la microscopie optique ou électronique.



FIG. 2.2 : Polisseuse HITECH

2.3.4 Attaque chimique :

A la fin de ces étapes de préparation métallographie il est nécessaire de procéder à une attaque chimique des échantillons pour mettre en évidence la structure de ces derniers . les paramètres utilisés sont résumés dans le tableau 2.2 :

Composition de la solution	Duré d'attaque
30ml de HCL concentré 15ml de HNO3 45ml de Glycérine	4 min.a T° ambiante

TAB. 2.2 : Paramètres de l'attaque chimique réalisée.

2.4 Caractérisations structurales

2.4.1 Analyse par DRX (diffraction des rayons X)

nous utilisons, ainsi la diffraction des rayons X (DRX) pour analyser les quatre échantillons. La DRX est une technique essentielle en science des matériaux pour identifier les phases cristallines et évaluer la structure cristallographique des échantillons.

Le principe de la DRX repose sur l'interaction des rayons X avec les plans atomiques du cristal dans le matériau. Lorsque les rayons X frappent un cristal, ils sont diffractés selon des angles spécifiques qui dépendent de l'espacement des plans atomiques. Cette diffraction obéit à la loi de Bragg, formulée par l'équation $n\lambda = 2d \sin\vartheta$, où n est l'ordre de diffraction, λ est la longueur d'onde des rayons X, d est la distance entre les plans atomiques, et ϑ est l'angle de diffraction.
La détermination des distances entre les plans réticulaires associés aux réflexions par l'application de la relation de Bragg nécessite la connaissance des positions des pics.

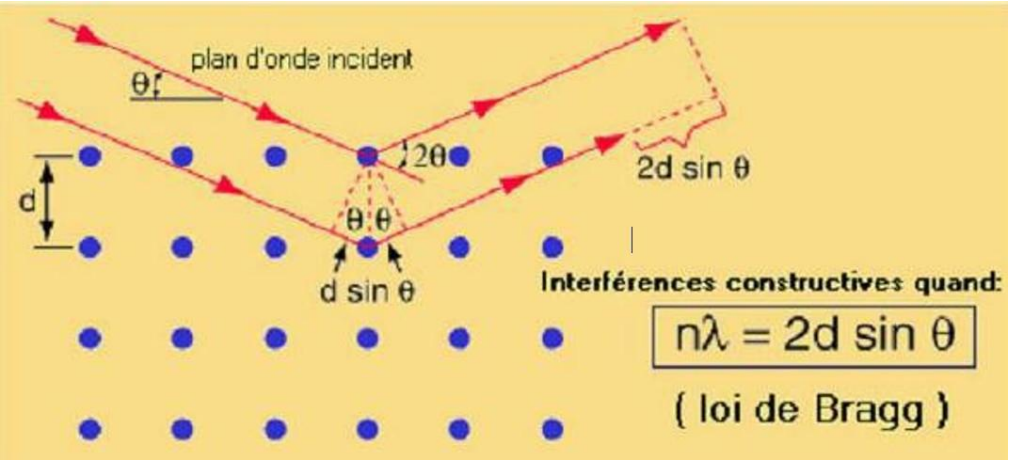


FIG. 2.3 : Schéma représentatif explique le principe de diffraction où d est la distance réticulaire des plans d'indices (h, k, l) et la longueur d'onde des rayons X utilisés.

Afin de caractériser la structure de nos échantillons, nous avons utilisé la diffraction des rayons X. Les diffractogrammes des rayons X pour les échantillons ayant subi différents types de traitement thermique des aciers 316 ont été enregistrés avec un diffractomètre Panalytical X'Pert Pro, équipé d'un tube anticathode en cuivre avec une longueur d'onde = 1,5406 Å, d'un détecteur linéaire et d'un monochromateur arrière (Pixel). En mesurant les angles et les intensités des pics de diffraction, il est possible de déterminer la structure cristalline et d'identifier les phases présentes dans le matériau. La DRX est particulièrement utile pour caractériser les modifications structurales induites par les traitements thermiques.

La DRX est effectuée en utilisant un diffractomètre situé au centre de recherche d'Ain Oussera, offrant des résultats précis et détaillés sur la structure cristalline des échantillons étudiés.

2.4.2 Logiciel highscore

HighScore est un logiciel avancé de traitement et d'analyse de données de diffraction des rayons X (DRX). Il est utilisé pour interpréter les données obtenues à partir de la DRX, permettant l'identification des phases cristallines, la détermination de la structure cristallographique et l'analyse quantitative des matériaux.

Le logiciel HighScore offre une interface intuitive et de puissants outils d'analyse, facilitant la manipulation des données, la comparaison avec des bases de données de référence et la visualisation des résultats. Il est couramment utilisé dans les laboratoires de recherche pour traiter les données DRX et obtenir des informations précises sur les échantillons analysés.

2.5 Etude morphologique

2.5.1 Microscope Optique (MO)

Dans notre recherche, nous avons utilisé les équipements du laboratoire de génie mécanique, notamment le microscope optique (OPTIKA) situé dans le hall technologique, pour caractériser le matériau. Cette caractérisation nous a permis de déterminer les propriétés mécaniques du matériau. Les photographiés des microstructures obtenues ont été réalisées au moyen d'une caméra du microscope reliée à un ordinateur.



FIG. 2.4 : Microscope optique de type « OPTIKA »

2.5.2 Microscopie à force atomique (AFM)

Dans notre travail de fin d'étude, nous utilisons la machine Bruker ICON SPM située au plateau technique de l'USTHB, pour effectuer la microscopie à force atomique (AFM). L'AFM est une technique de microscopie à sonde locale qui permet de visualiser la topographie de surfaces à l'échelle nanométrique.

Le principe de fonctionnement de l'AFM repose sur l'utilisation d'une pointe très fine, montée sur un levier flexible, qui interagit avec la surface de l'échantillon. Cette pointe

est déplacée à travers la surface de l'échantillon à l'aide d'un système de balayage contrôlé par des piézoélectriques. Les forces d'interaction entre la pointe et la surface (forces de Van der Waals, forces de contact, forces électrostatiques, etc.) provoquent une déflexion du levier.

Un laser est réfléchi sur le dos du levier et capté par un photodétecteur, permettant de mesurer, avec une grande précision, les déviations du levier et donc la topographie de l'échantillon. Cette méthode permet non seulement de créer des images en trois dimensions de la surface, à une résolution atomique, mais aussi de mesurer des propriétés mécaniques, électriques, et magnétiques à l'échelle nanométrique.

L'appareil Bruker ICON SPM utilisé dans notre étude est reconnu pour sa haute résolution et sa capacité à effectuer des mesures dans diverses conditions environnementales, ce qui le rend particulièrement adapté à nos analyses détaillées des surfaces des échantillons étudiés.

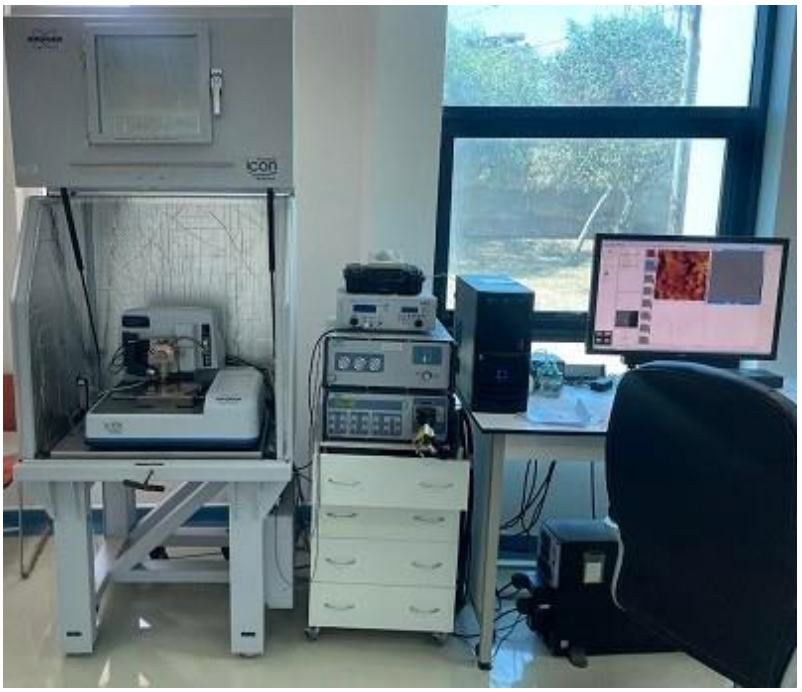


FIG. 2.5 : appareil Bruker ICON SPM

2.6 Etude mécanique

2.6.1 Etude par micro dureté

Dans notre travail de fin d'étude, pour l'étude mécanique et plus précisément la microdureté, nous avons utilisé l'appareil TUKON 1202 situé dans le hall technologique de l'USTHB. Le principe de fonctionnement de cet appareil repose sur la méthode Vickers. Cette méthode consiste à appliquer une charge précise sur une pointe diamantée de forme pyramidale, qui est ensuite enfoncée dans la surface du matériau à tester. La diagonale de l'empreinte laissée est mesurée optiquement, permettant de calculer la dureté du matériau. Cet appareil permet d'évaluer avec précision la dureté des échantillons, ce qui est crucial pour déterminer les propriétés mécaniques après différents traitements thermiques.



FIG. 2.6 : Wilson Hardness - Tukon 1102 / 1202

2.7 Etude magnétique

Dans notre travail de fin d'études, nous utilisons le Microsense EZ9 pour mener une étude approfondie sur les propriétés magnétiques des matériaux étudiés. Le Microsense EZ9 est un appareil de mesure magnétique de haute précision, largement utilisé dans les laboratoires de recherche pour ses capacités exceptionnelles à caractériser les propriétés

magnétiques des échantillons.

Cet appareil nous permet de mesurer avec précision la susceptibilité magnétique ainsi que les courbes d'hystérésis, essentielles pour comprendre le comportement magnétique des matériaux. Grâce à ses fonctionnalités avancées et à sa sensibilité élevée, le Microsense EZ9 nous fournit des données fiables et reproductibles, indispensables pour l'analyse et l'interprétation de nos résultats.

Le Microsense EZ9 est situé à la Faculté de Bab Ezzouar (l'USTHB) précisément dans la plateforme de recherche dédiée aux études magnétiques. L'accès à cet équipement de pointe nous permet de réaliser des mesures avec un niveau de précision exceptionnel, renforçant ainsi la qualité et la fiabilité de notre recherche.

Les figures suivantes illustrent l'appareil et les différentes étapes de notre travail, démontrant la méthodologie rigoureuse adoptée pour obtenir des résultats précis et fiables :

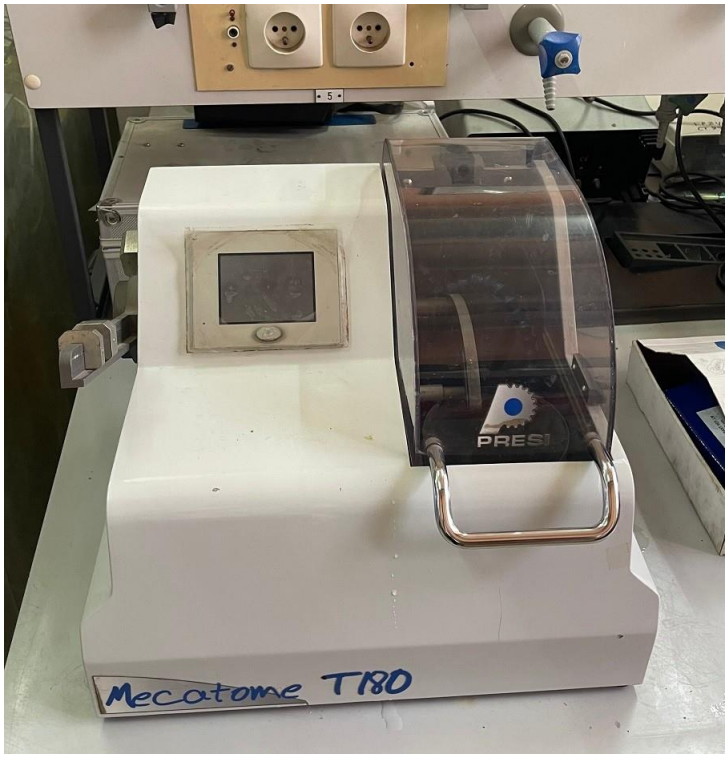


FIG. 2.7 : appareille de découpe mecatome T180



FIG. 2.8 : Balance ohaus

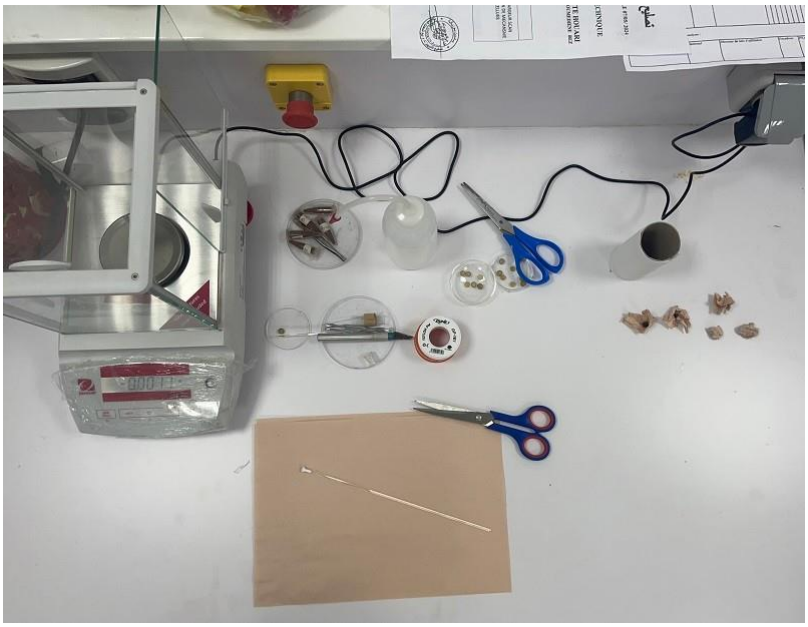


FIG. 2.9 : Préparation de l'échantillion

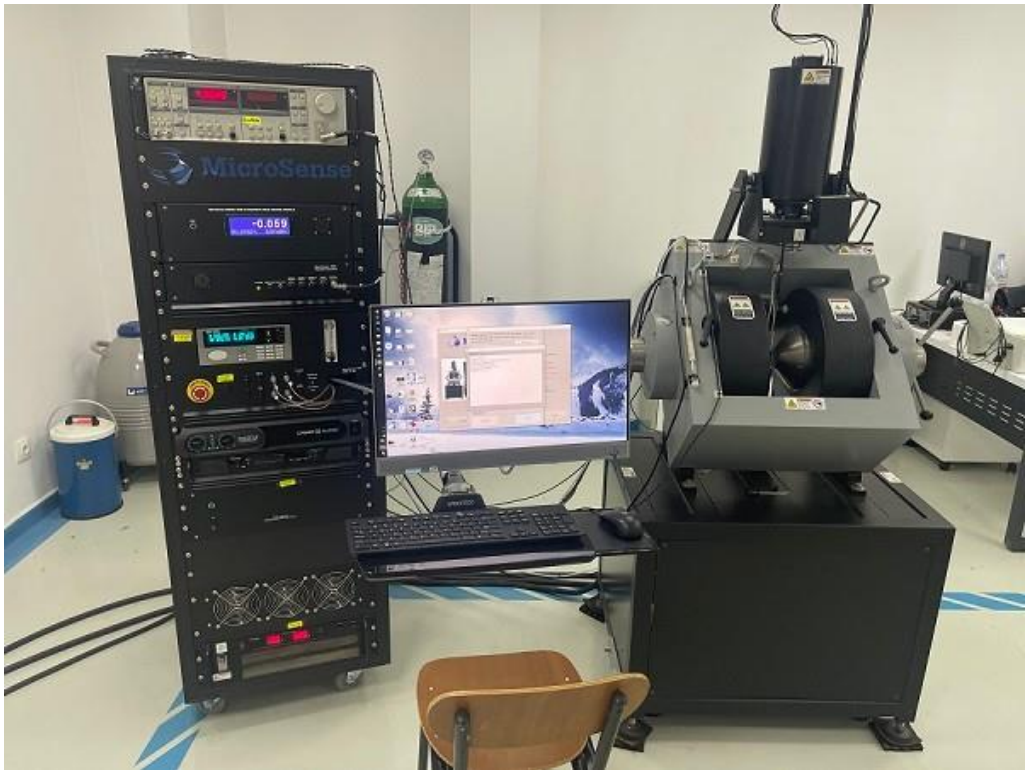


FIG. 2.10 : Appareille microsens EZ9

Chapitre 3

Résultats et discussion

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de notre étude sur les aciers inoxydables X5CrNi8-10 soumis à différents traitements thermiques et leur analyse structurale, morphologique, mécanique et magnétique. Les échantillons étudiés incluent des aciers dans différents états : brut, recuit et trempé à 1000°C et diverses durées de maintien.

Les analyses morphologiques ont été réalisées à l'aide de plusieurs techniques de microscopie. L'observation de la microstructure a été effectuée avec un microscope optique (MO), et un microscope à force atomique (AFM). Ces outils permettent de caractériser les surfaces des échantillons et de détecter les changements microstructuraux induits par les traitements thermiques.

Pour l'étude structurale, la diffraction des rayons X (DRX) a été utilisée afin d'identifier les phases présentes et de quantifier les transformations de phase résultant des différents traitements appliqués aux échantillons. Cette technique fournit des informations cruciales sur la structure cristalline et les modifications induites par la trempe et le recuit.

Les propriétés mécaniques ont été évaluées par des essais de microdureté, permettant de déterminer la dureté des différents échantillons et de corréler ces résultats aux modifications microstructurales observées. L'étude de la dureté est essentielle pour comprendre la résistance à l'usure et les performances mécaniques des aciers traités.

Enfin, les propriétés magnétiques des échantillons ont été analysées pour compléter notre compréhension des effets des traitements thermiques sur les aciers X5CrNi8-10.

Les sections suivantes détailleront les résultats obtenus pour chaque méthode d'analyse et discuteront des implications de ces résultats sur les propriétés globales des matériaux étudiés.

3.2 Etude structurale

3.2.1 Résultats de traitements de DRX

La figure 3.1 illustre l'identification des phases pour chaque échantillon avec le logiciel HighScore en utilisant le modèle de base de données F1 N1. Référence : 98-010-3556. Définies par les plans 43.827 (1,1,1) ; 51.054 (0,0,2) ; 75.088 (0,2,2).

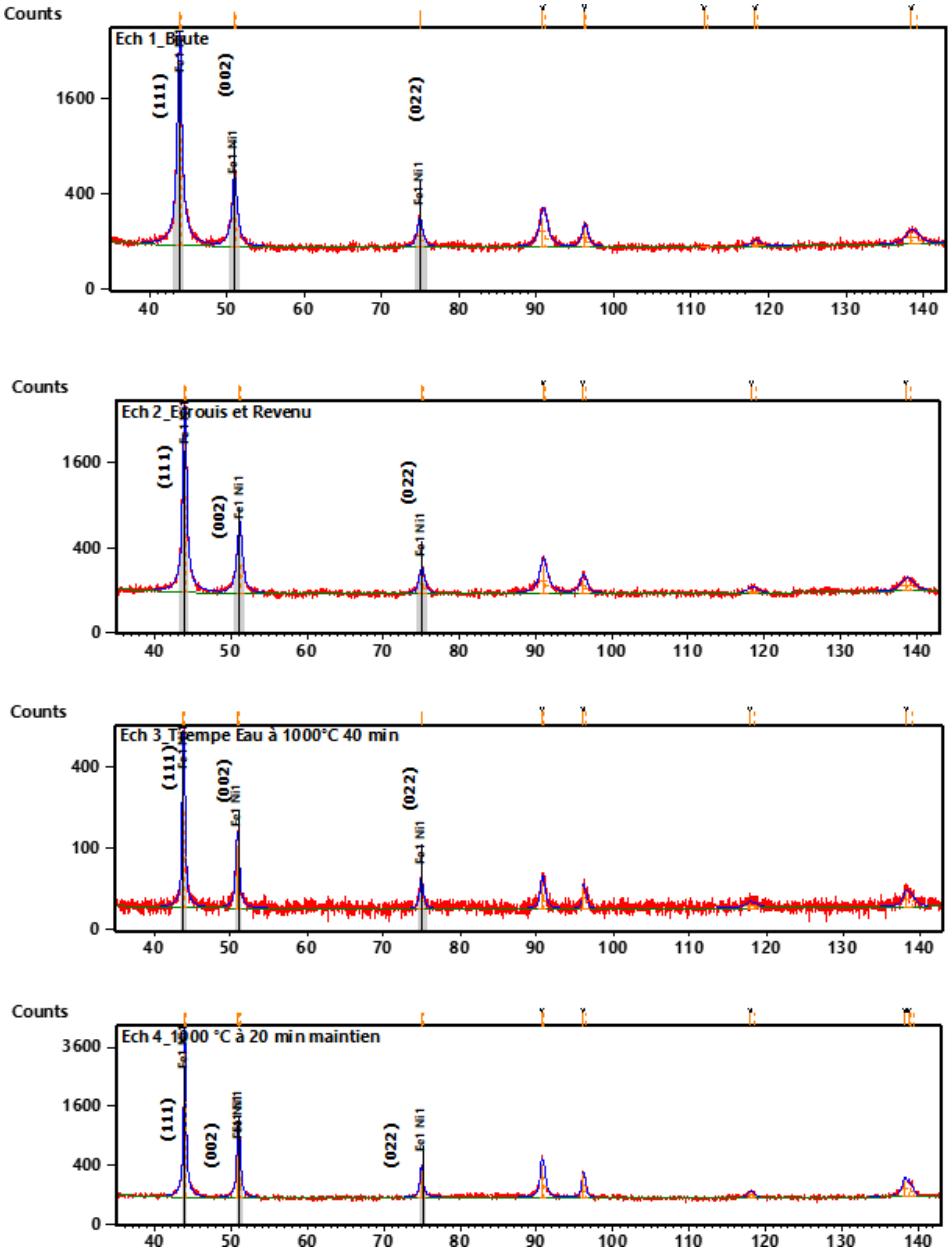


FIG. 3.1 : Pics identifiés de la phase austénitique γ métastable de l'acier inoxydable austénitique pour différents types de traitements.

La présentation des diagrammes de diffraction spécifiques à une seul phase austénitique métastable dans l'acier inoxydable austénitique pour différents types de traitements.

Les diffractogrammes des aciers inoxydables 316 ayant subi divers traitements ther-

miques sont présentés dans la figure 3.2 Ils permettent de comparer les résultats avant et après traitement ainsi que les différents types de traitement. On remarque au niveau du pic principal dans la figure 3.2 que le pic après un traitement d'hyper trempe révèle une augmentation de l'intensité et une réduction significative de la largeur. Aussi, l'élargissement des pics de fer (cfc) et la diminution de l'intensité des échantillons non trempés sont dus à deux effets : Formation d'une solution de Ni dans le fer et l'influence des contraintes de premier ordre.

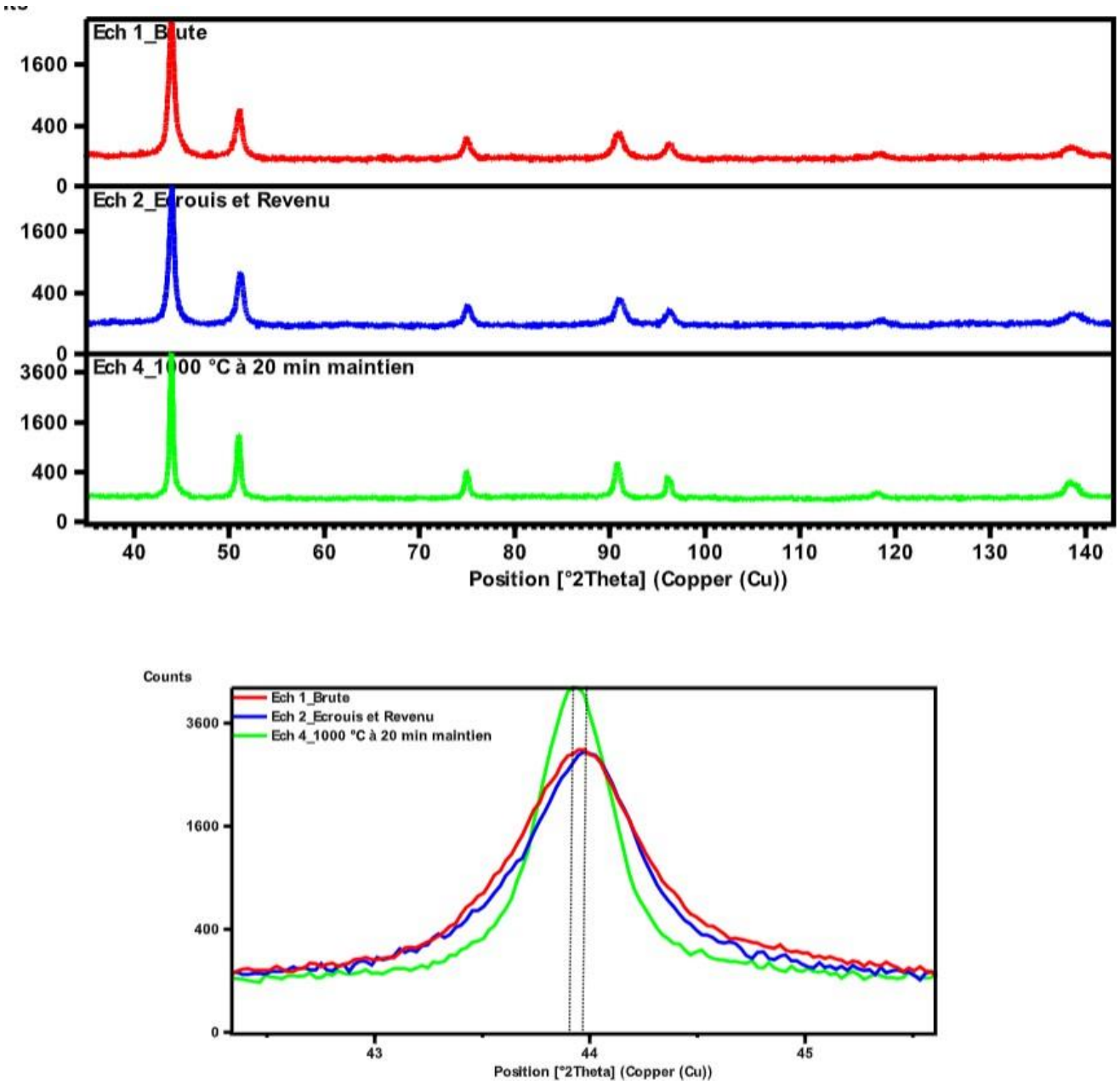


FIG. 3.2 : L'évolution des spectres de diffraction des rayons X de l'acier inoxydable austénitique 316 pour différents types de traitements.

Evolution du paramètre de maille :

L'évolution des paramètres de maille, a (nm), en fonction du traitement d'hyper trempe de l'acier inoxydable austénitique 316 est illustrée dans la figure 3.3, où la valeur de l'austénite (cfc) est notée pour la comparaison.

Echantillon	a(nm)	D (nm)	σ %
Ech 1	0.356821	14.87	0.69
Ech 2	0.356712	17.12	0.60
Ech 3	0.357048	29.28	0.35
Ech 4	0.356972	33.25	0.31

TAB. 3.1 : Tableau récapitulatif des résultats du traitement DRX.

Nous remarquons, d'après la figure 3.3 que les paramètres de maille augmentent après un traitement d'hyper trempe, comme observé par exemple pour les échantillons 3 et 4.

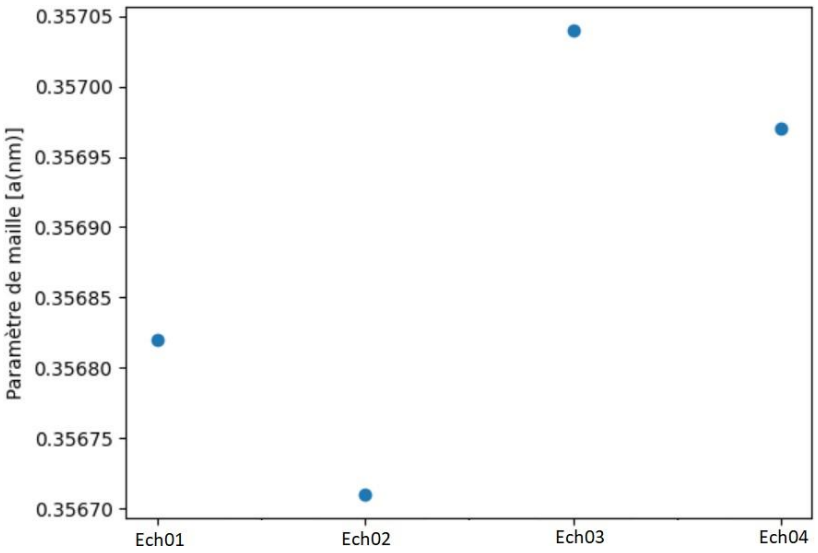


FIG. 3.3 : Evolution des paramètres de maille de chaque échantillon.

Cette augmentation de a (nm) est clairement traduite par le décalage des pics des alliages hyper trempé vers les petits angles et/où due à des conditions de traitement thermique plus intenses.

Calcul de la taille des cristallites :

Pour le calcul de la taille de grains cristallins (taille des cristallites), nous avons appliqué la méthode de Williamson Hall. Cette méthode prend en considération plusieurs pics. Pour notre étude, nous avons calculé la taille de cristallites de la phase majeure qui correspond à la phase austénitique. A partir des courbes représentées dans les figures 3.4 et 3.5 nous observons qu'il y'a une analogie de l'évolution de la taille des cristallites et les microdéformations.

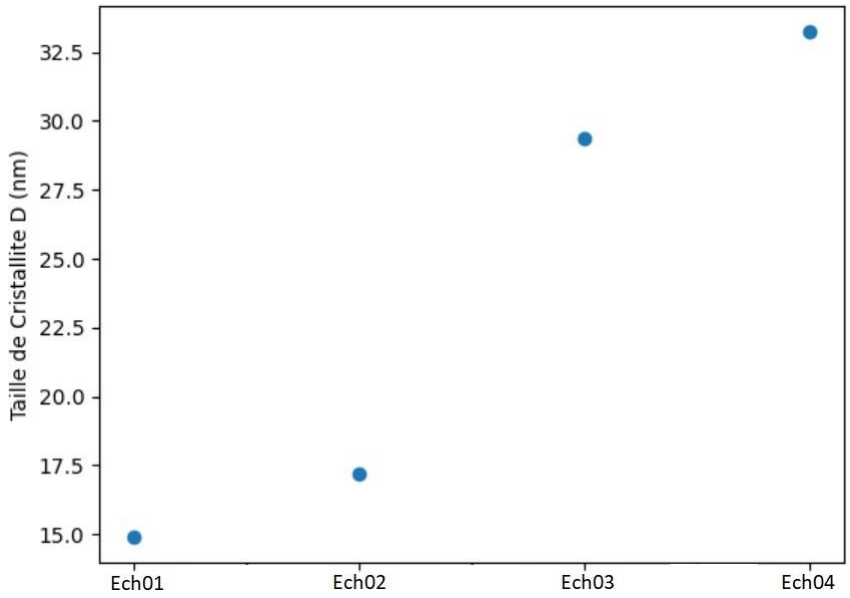


FIG. 3.4 : Evolution de la taille de cristallite des aciers inoxydables austénitique 316 pour différents types de traitements thermiques.

La taille des cristallites varie significativement entre les échantillons ayant subit différents types de traitement thermique. Les échantillons soumis à des traitements thermiques plus intenses (échantillons 3 et 4) ont des cristallites de taille plus grande. Ceci est cohérent avec le fait que des températures plus élevées ou des temps de maintien prolongés favorisent la croissance cristalline, ce qui est crucial pour améliorer certaines propriétés mécaniques comme la dureté et la résistance.

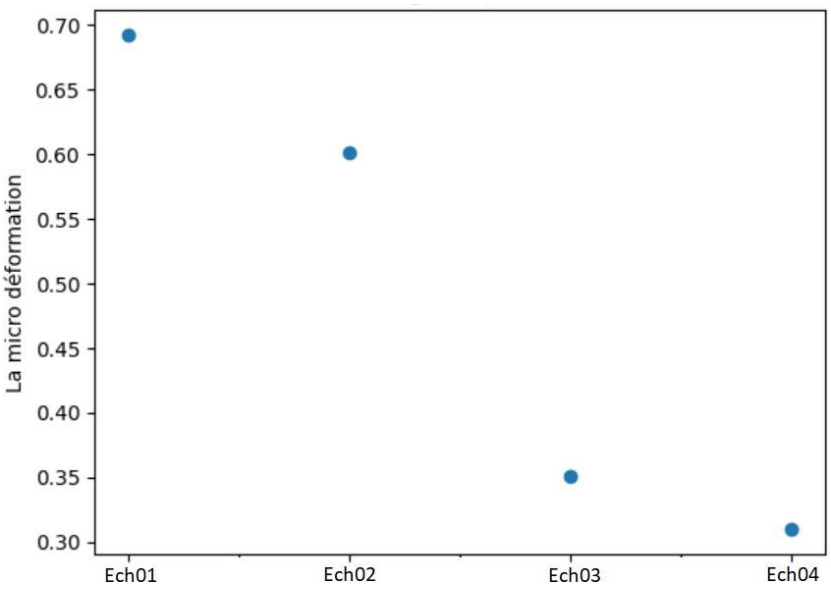


FIG. 3.5 : Nuage de points représentant la micro déformation de chaque échantillion

La microdéformation tend à diminuer avec l'augmentation de la taille des cristallites, comme le montrent les points du nuage. Les échantillons 3 et 4, qui ont les cristallite.

3.3 Analyse métallographique

3.3.1 Observation sur microscope optique

Dans le cadre de notre étude, nous avons réalisé une analyse morphologique des échantillons, à l'aide du microscope optique Optika, situé dans le hall technologique de l'université de Médéa. Ces échantillons ont été observé à deux niveaux de grossissement différents : 200× et 500×.

La microstructure suivant c'est de notre acier à l'état brut, comme le montre les figures (3.6) et (3.7)

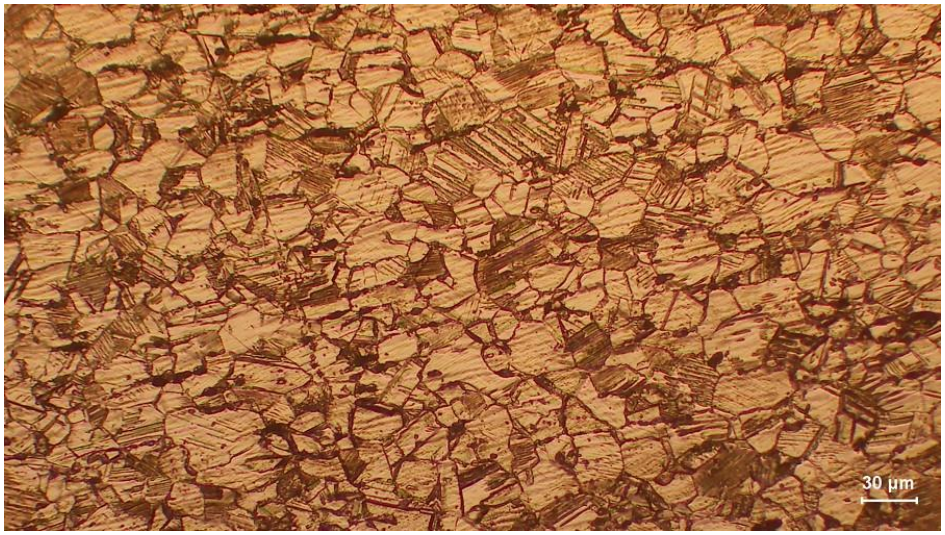


FIG. 3.6 : Microstructure de l'échantillion 01 brut (X200).

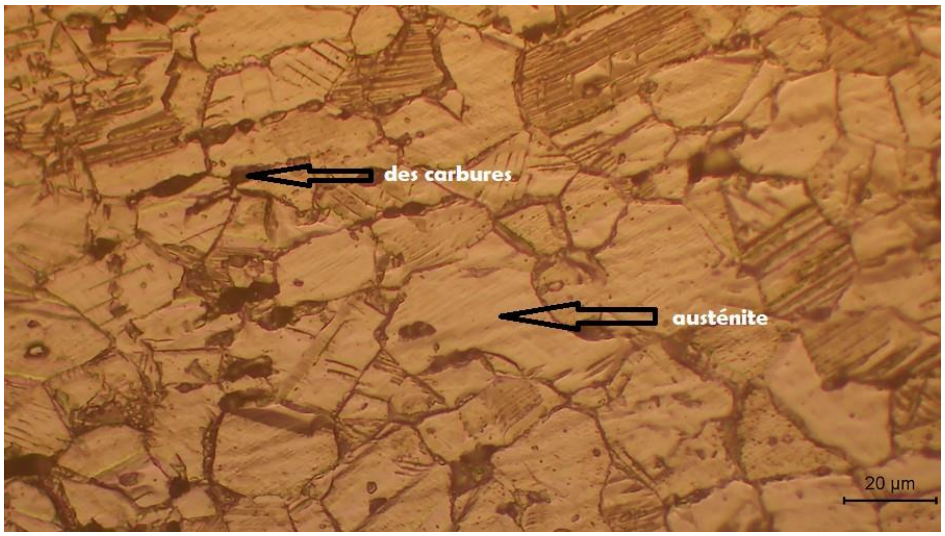


FIG. 3.7 : Microstructure de l'échantillion 01 brut (X500).

Après avoir fait le processus de recuit, nous avons remarqué que la microstructure de cette d'échantillon ne pas changé Ceci est montré dans les figures (3.8 et 3.9) suivantes :

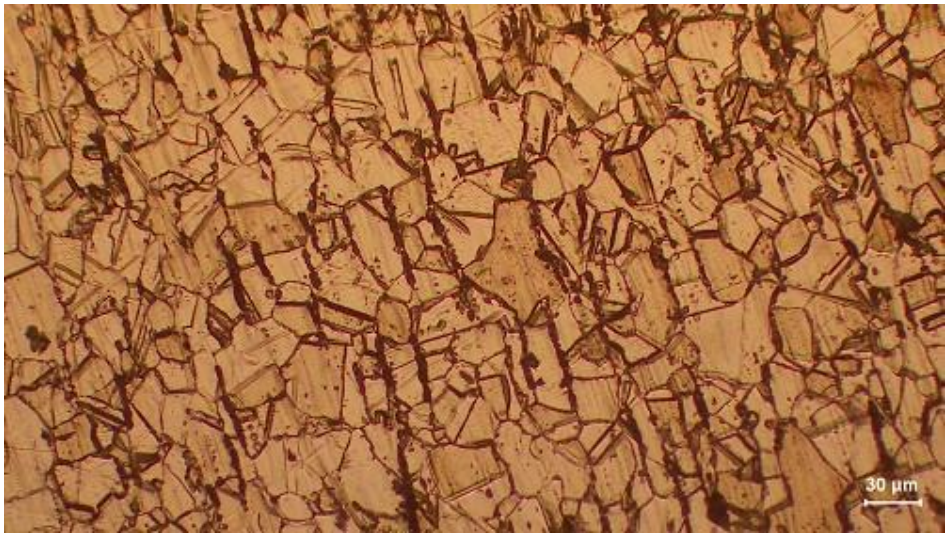


FIG. 3.8 : Morphologie Microscope Optique de l'acier inoxydable après recuit(X200)

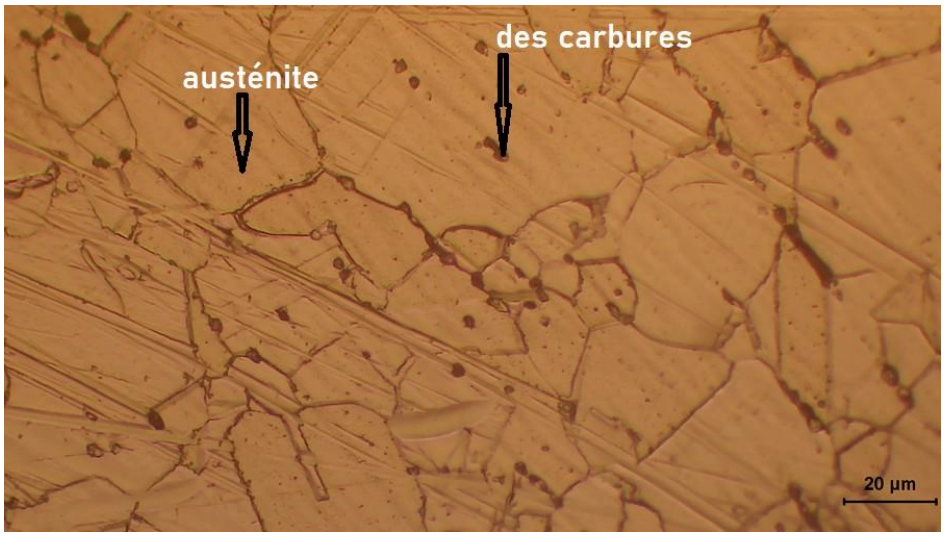


FIG. 3.9 : Morphologie Microscope Optique de l'acier inoxydable après recuit (X500).

Pour les échantillons Ech03 et Ech04, qui ont tous deux été trempés à une température de 1000°C, les temps de maintien ont varié : 40 minutes pour Ech03 et 20 minutes pour Ech04. Les résultats de l'analyse métallographique ont révélé des différences notables entre les deux échantillons :

Ech03 (maintien de 40 minutes) : Cet échantillon a montré un changement significatif dans la taille des grains, avec une largeur et une longueur accrues par rapport à l'échantillon brut. Le temps de maintien prolongé à haute température a permis une plus grande diffusion des atomes, entraînant une croissance notable des grains. Cette croissance est due à la réduction des contraintes internes et à l'augmentation de la mobilité atomique, facilitant l'agrandissement des grains. comme ullustré dans la figure (3.10) :



FIG. 3.10 : Morphologie Microscope Optique de l'acier inoxydable après trempe Ech03 (X200).

ECH04 (maintien de 20 minutes) : Bien que cet échantillon ait également montré des modifications dans la taille des grains, les changements ont été moins prononcés que ceux observés dans ECH03. Le temps de maintien plus court a limité la diffusion atomique et la croissance des grains, ce qui a conduit à des grains légèrement plus grands que ceux de l'échantillon brut, mais nettement plus petits que ceux de l'échantillon ECH03. comme ullustré dans les figures (3.11, 3.12) :

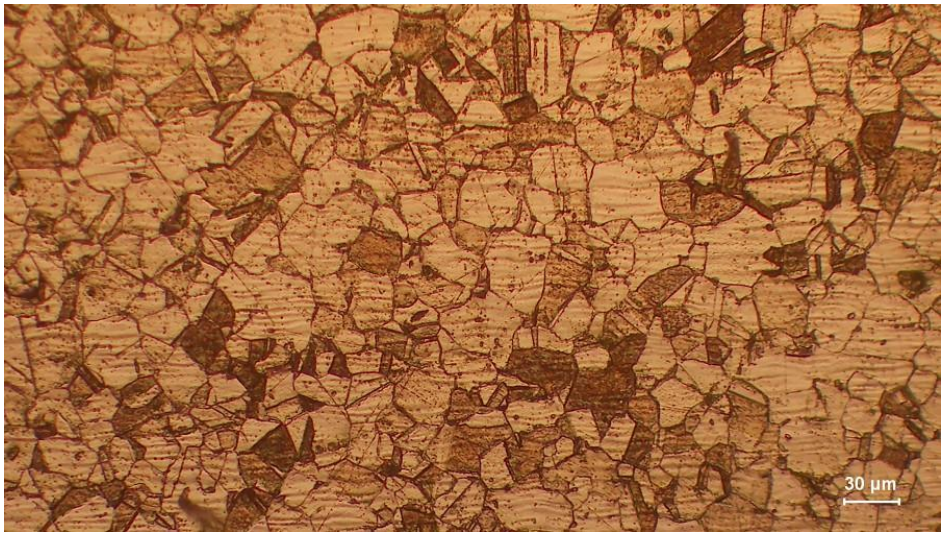


FIG. 3.11 : Morphologie Microscope Optique de l'acier inoxydable après trempe Ech04 (X200).

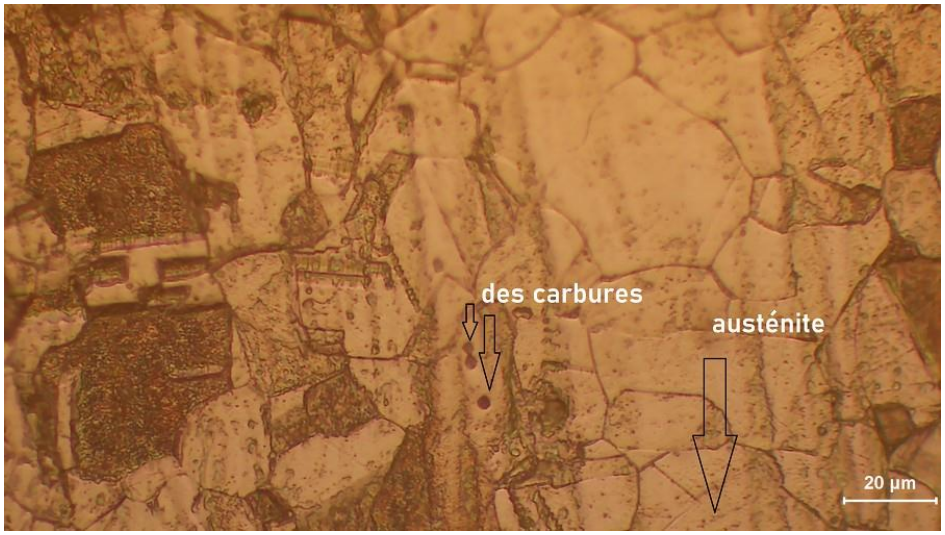


FIG. 3.12 : Morphologie Microscope Optique de l'acier inoxydable après trempe Ech04 (X500).

Le tableau ci-dessous résume la moyenne de la longueur en micromètres (µm) pour les échantillons Ech2, Ech3 et Ech4, représentant la longueur et la taille moyenne des grains.

Echantillon	Longueur moyenne(µm)
Ech 2	27.25
Ech 3	41.84
Ech 4	35.35

TAB. 3.2 : Longeur moyenne en (µm).

En conclusion, le temps de maintien à haute température joue un rôle crucial dans la détermination de la taille des grains lors du traitement thermique. Un maintien prolongé à 1000°C (comme dans ECH03) favorise une croissance plus importante des grains, tandis qu'un temps de maintien plus court (comme dans ECH04) limite cette croissance, produisant des grains de taille intermédiaire. Ces observations sont essentielles pour comprendre et contrôler les propriétés mécaniques et physiques des matériaux traités thermiquement.

3.3.2 Observation sur microscope a force atomique MFA

Dans le cadre de l'analyse morphologique, nous avons observé la présence de zones claires et sombres ainsi que de carbures dans les échantillons. Ces zones contrastées sont attribuables à des phénomènes spécifiques intervenus lors de la préparation des échantillons.

Les zones claires et sombres peuvent être le résultat d'une attaque chimique inhomogène lors de la préparation métallographique. En effet, certaines phases du matériau peuvent réagir différemment à l'agent chimique utilisé pour l'attaque, ce qui entraîne des variations de teinte et de contraste observées au microscope. Par ailleurs, ces différences peuvent également être dues à une dégradation partielle ou à des artefacts introduits

pendant le polissage des échantillons, où des phases plus tendres ou plus résistantes à l'attaque chimique peuvent apparaître différemment sous le microscope.

La présence de carbures, quant à elle, est indicative de la microstructure du matériau et des conditions thermiques et mécaniques qu'il a subies. Les carbures se forment généralement dans des zones où il y a une forte concentration de carbone et peuvent influencer de manière significative les propriétés mécaniques du matériau.

En résumé, les observations morphologiques des zones claires et sombres ainsi que des carbures sont cruciales pour comprendre la microstructure et les processus de fabrication des échantillons analysés. Ces caractéristiques peuvent fournir des informations essentielles sur les traitements thermiques, les compositions chimiques et les procédures de préparation appliquées aux matériaux.

Dans le cadre de notre étude sur la morphologie, nous avons réalisé une analyse sur le microscope à force atomique (AFM) sur les échantillons Ech1, Ech02, Ech03, et Ech04.

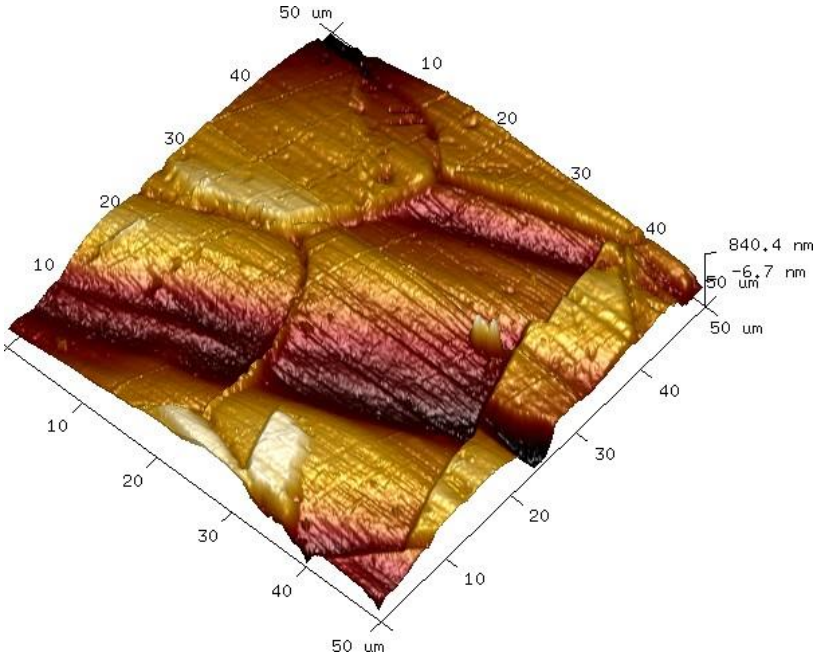


FIG. 3.13 : Morphologie Microscope a force atomique de l'échantillion 01 BRUT .

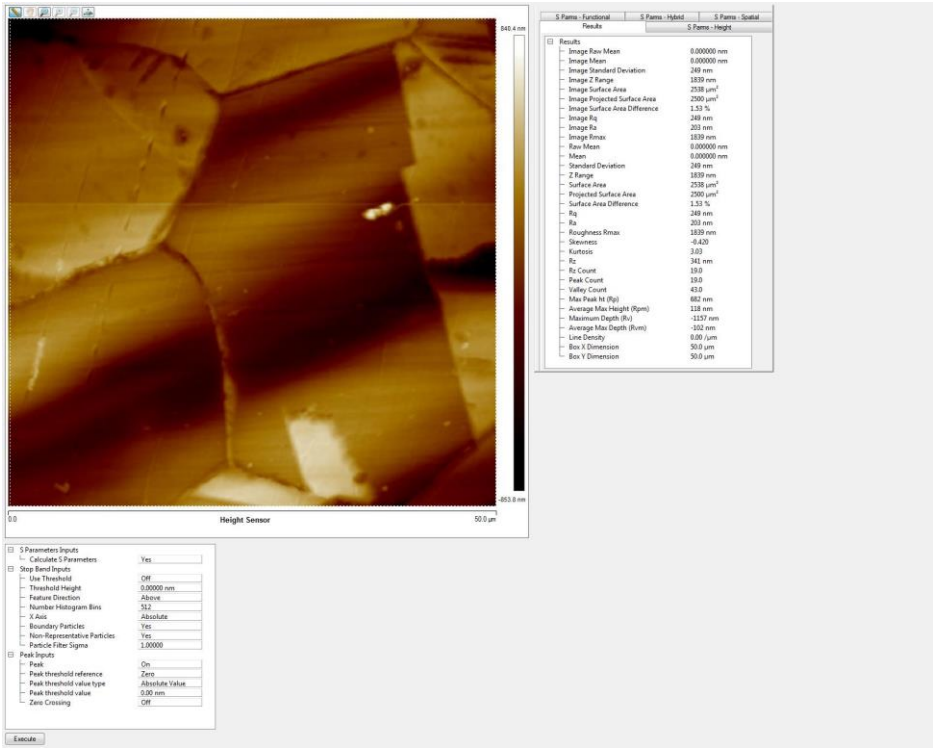


FIG. 3.14 : Capture d'écran du logiciel de l'appareil de microscope optique Bruker pour l'échantillon 1 BRUT

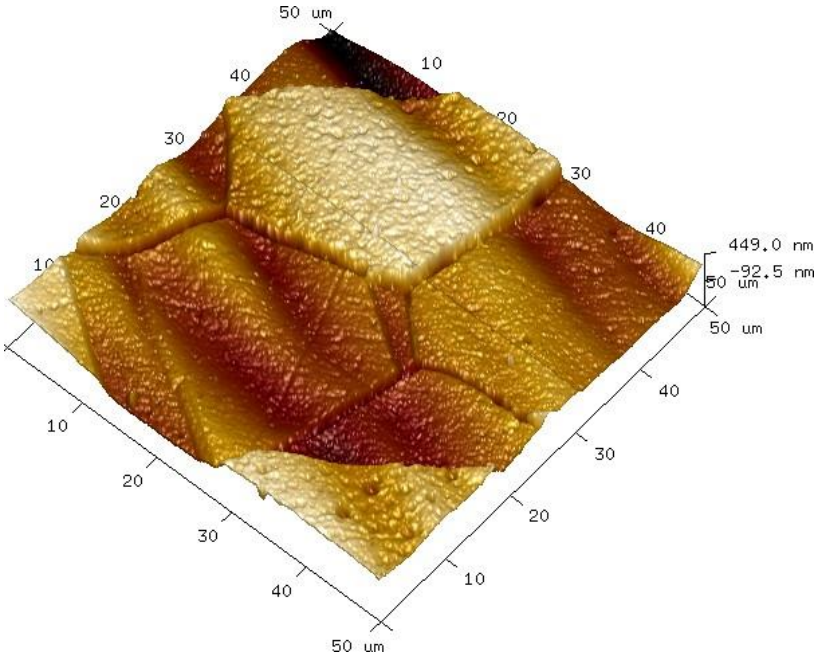


FIG. 3.15 : Morphologie Microscope a force atomique de l'échantillion 02 aprés recuit.

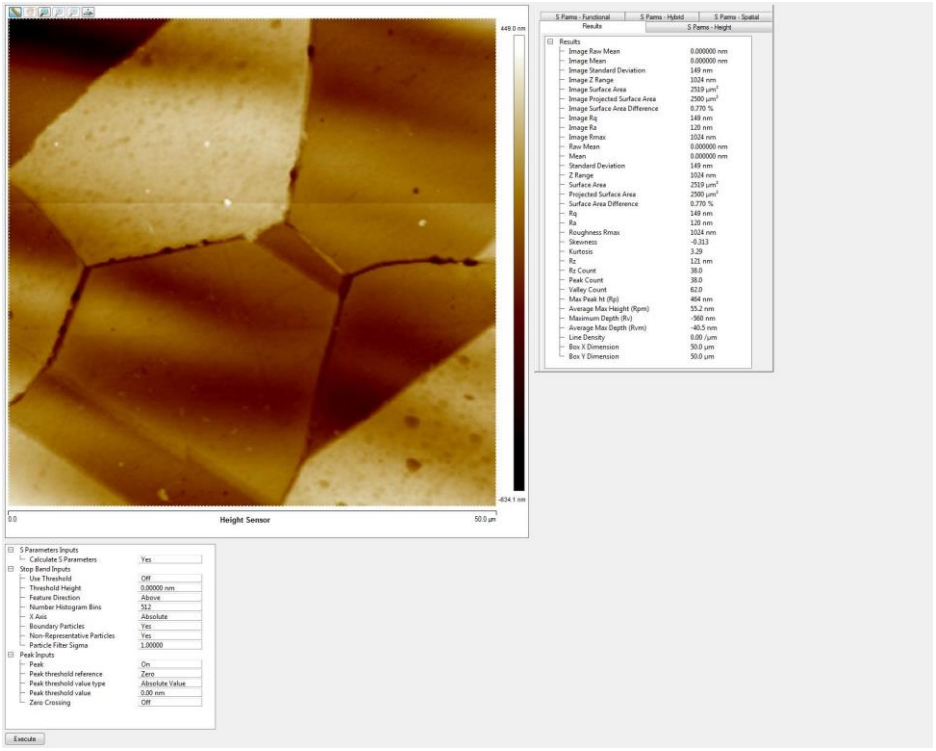


FIG. 3.16 : Capture d'écran du logiciel de l'appareil de microscope optique Bruker pour l'échantillon 2 aprés recuit

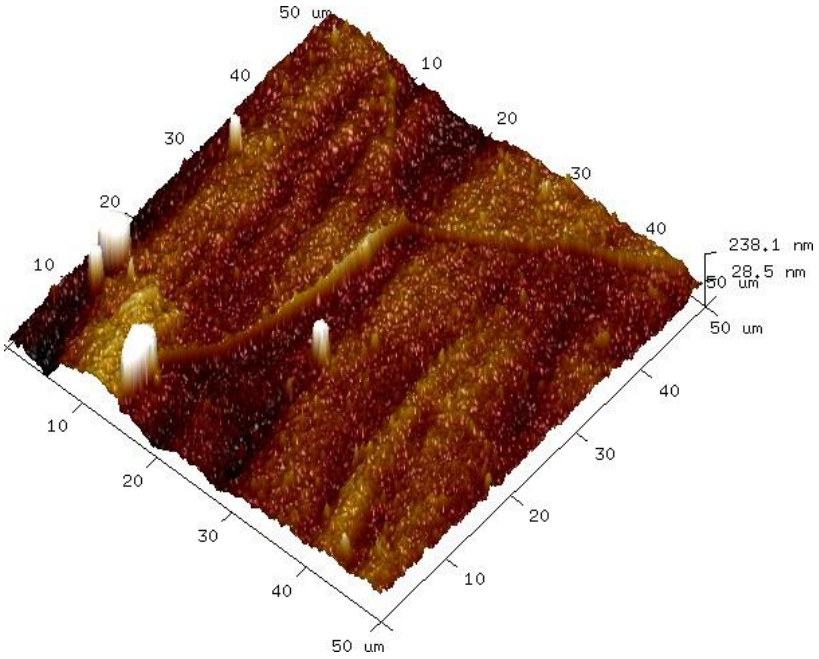


FIG. 3.17 : Morphologie Microscope a force atomique de l'échantillion 03 aprés trempe.

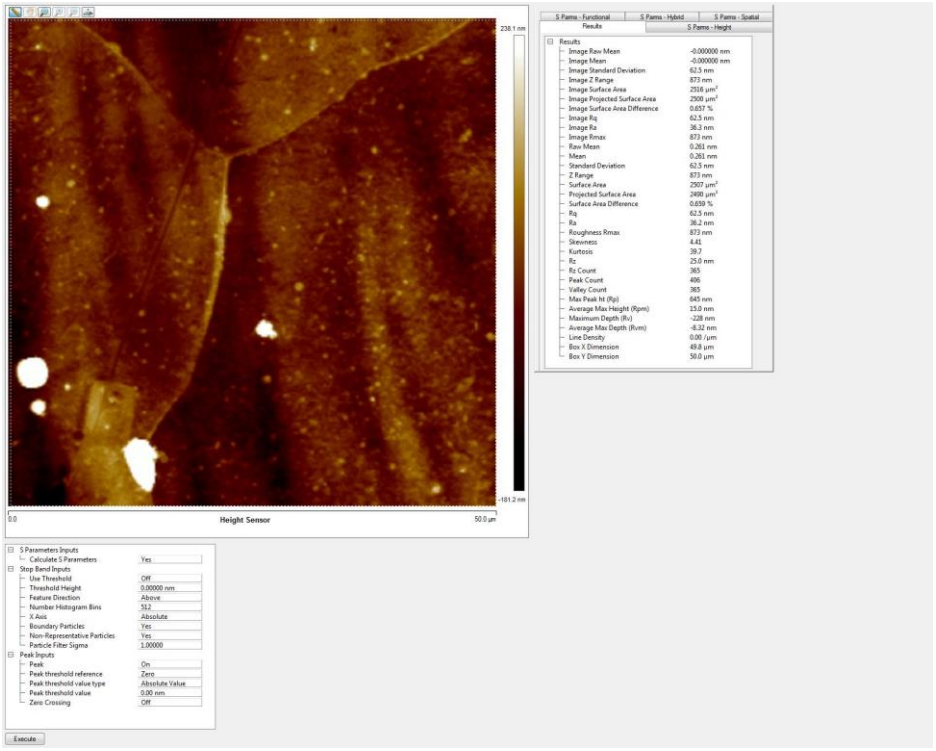


FIG. 3.18 : Capture d'écran du logiciel de l'appareil de microscope optique Bruker pour l'échantillon 03 aprés trempe.

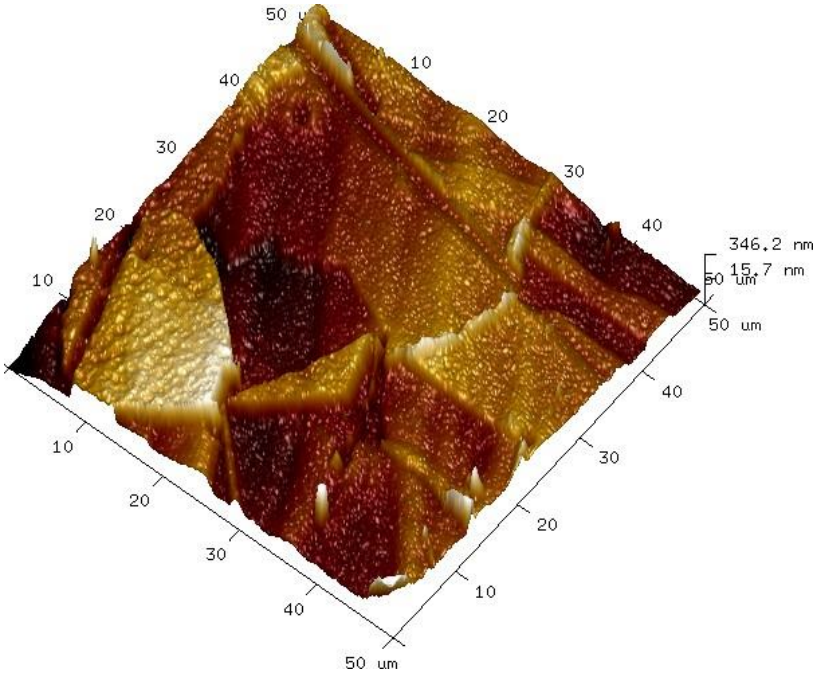


FIG. 3.19 : Morphologie Microscope a force atomique de l'échantillion 04 aprés trempe.

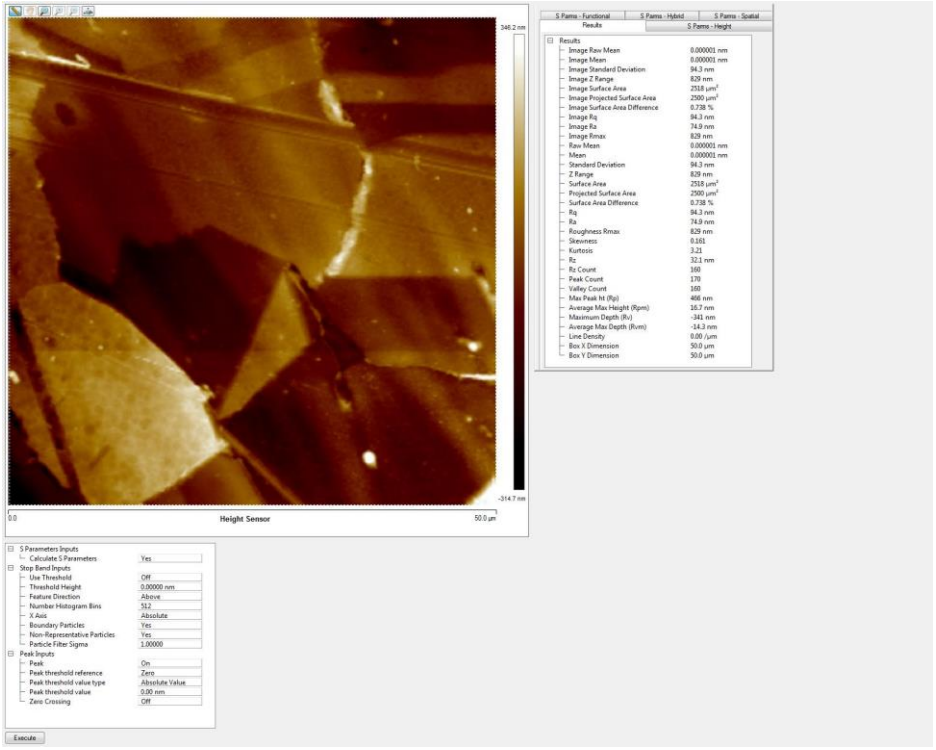


FIG. 3.20 : Capture d'écran du logiciel de l'appareil de microscope optique Bruker pour l'échantillon 4, aprés trempe

3.3.3 Le résultat de la rugosité (R)

- **Ech01:**
  - $R = \frac{Ra+Rq}{2}$
  - $R = \frac{203+249}{2}$
  - $R = 226$ nm
- **Ech02:**
  - $R = \frac{120+149}{2}$
  - $R = 134.5$ nm
- **Ech03:**
  - $R = \frac{74.9+94.3}{2}$
  - $R = 84.6$ nm
- **Ech04:**
  - $R = \frac{31.8+44.9}{2}$
  - $R = 38.35$ nm

L'analyse morphologique et de rugosité des échantillons d'acier X5CrNi8-10 dans différents états (brut, recuit, trempé) permet de comprendre l'impact des traitements thermiques sur la structure et la surface des matériaux.

Premièrement, l'observation de la taille des grains après trempe indique un phénomène de croissance de grains, où les grains de la structure cristalline tendent à augmenter en taille. Ce phénomène est courant lors de traitements thermiques à haute température, comme la trempe à 1000 °C, et peut être dû à la restructuration des dislocations et à la migration des joints de grains.

Deuxièmement,La diminution de la rugosité après trempe peut également être due

à l'agrandissement de la taille des grains. Lors du processus de trempe, les grains de la structure cristalline peuvent croître en taille en raison de la redistribution des atomes et de la réorganisation de la structure cristalline. Des grains plus grands peuvent présenter des surfaces plus régulières et moins de discontinuités, ce qui contribue à une diminution de la rugosité de la surface. Ainsi, l'agrandissement de la taille des grains peut être un facteur important contribuant à la réduction de la rugosité après trempe.

En conclusion, cette analyse met en évidence l'importance des traitements thermiques dans la modification des propriétés morphologiques et de surface des matériaux. Comprendre ces changements est essentiel pour optimiser les processus de fabrication et améliorer les performances des matériaux dans diverses applications.

3.4 Etude mécanique

3.4.1 Essai de Microdurté

Chaque échantillon a été placé sur le support, et une charge de 100g a été appliquée. Pour chaque échantillon, six empreintes ont été réalisées : trois dans la zone sombre et trois dans la zone blanche, permettant ainsi d'obtenir six mesures de la microdureté Vickers. La moyenne a été calculée pour chaque échantillon. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

	micro dureté HV	
Echantillons	**Zone claire**	**Zone sombre**
Ech 01	231.37	282.25
Ech 02	171.1	194.05
Ech 03	178.35	172.4
Ech 04	200.13	188.2
Ech 05	186.73	163.33

TAB. 3.3 : Résultats de mesure de la microdureté de l'acier inoxydable.

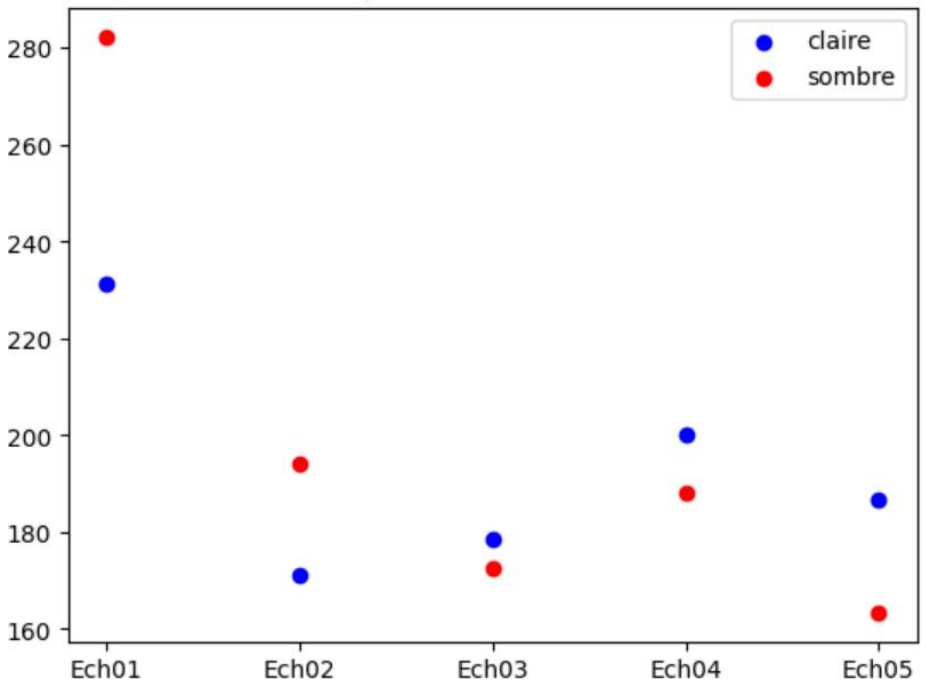


FIG. 3.21 : Variation de la microdureté moyenne HV en fonction des différents traitements thermiques

3.5 Etude magnétique

3.5.1 Caractérisation par Magnétisation à échantillon vibrant (VSM)

La rémanence magnétique (Mr) des échantillons varie en fonction du traitement thermique appliqué. L'état brut présente la plus faible valeur de Mr, tandis que l'état trempé avec un maintien de 20 minutes présente la plus haute valeur, indiquant une structure martensitique optimale pour les propriétés de rémanence magnétique. Les échantillons recuits et trempés avec différents temps de maintien montrent des variations dans la rémanence, probablement dues à des changements dans la taille des grains, la formation de phases et la présence de contraintes résiduelles. Les observations confirment que des traitements thermiques appropriés peuvent améliorer significativement les propriétés magnétiques des aciers inoxydables en modifiant leur microstructure et leurs contraintes internes.

Echantillon	Coercivité Hc Oe	Saturation de magnétisastion Ms emu/g	Rémanence Mr emu/g
Ech 1	52.74	1.925	0.063
Ech 2	51.3	1.98	0.092
Ech 4	35.06	2.68	0.208
Ech 5	91.12	1.89	0.128

TAB. 3.4 : Tableau récapitulatif de l'étude magnétique.

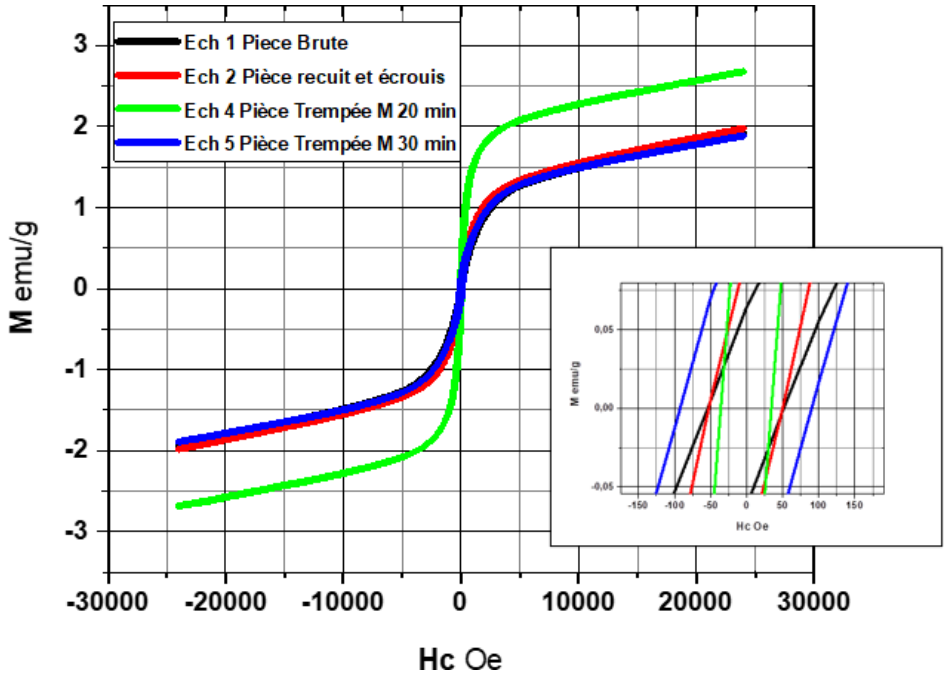


FIG. 3.22 : Courbes d'hystérésis (aimantation en fonction du champ appliqué) de l'acier inoxydable austénitique 316 pour différents types de traitements.

Dans notre étude, nous avons utilisé le VSM pour analyser les propriétés magnétiques de nos échantillons. Les résultats obtenus sont résumés comme suit :

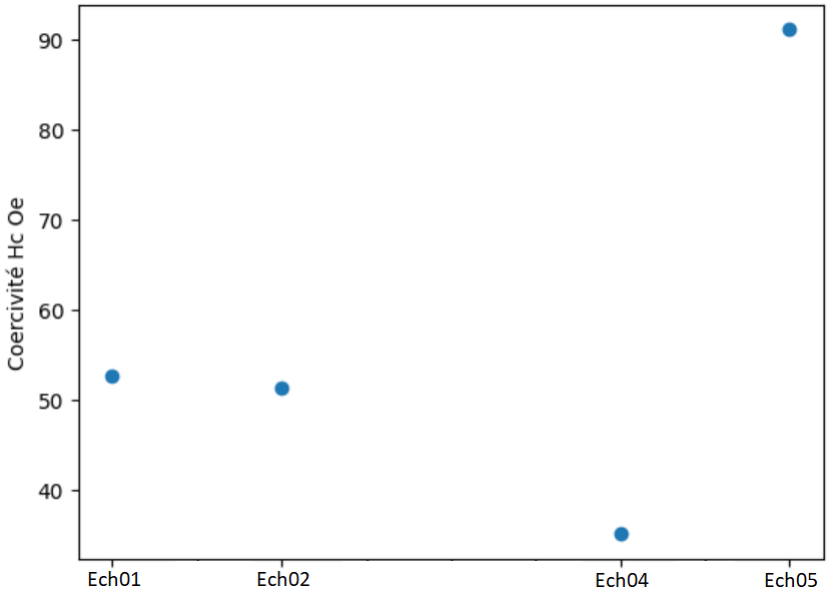


FIG. 3.23 : Nuage de points représentant l'évolution des paramètres mécanique de chaque echantillon.

Les valeurs de coercivité obtenues montrent des variations significatives entre les échantillons. Par exemple, l'échantillon Ech04 présente une coercivité beaucoup plus faible (35.06 Oe) comparée à l'échantillon Ech05, qui affiche la valeur la plus élevée de coercivité (91.12 Oe). Ces différences peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, tels que :

Microstructure : Les différences de traitement thermique et les variations de la taille des grains peuvent influencer les propriétés magnétiques. Un traitement thermique plus long, comme celui de l'échantillon Ech03 par rapport à l'Ech04, peut entraîner des modifications dans la structure cristalline et, par conséquent, affecter la coercivité.

Contraintes Résiduelles : Les contraintes internes générées pendant les processus de fabri-cation ou de traitement thermique peuvent également avoir un impact sur les propriétés magnétiques.

Composition Chimique : Les variations dans la composition chimique des échantillons peuvent influencer la distribution et la densité des dislocations, ce qui affecte la coerci-vité.

Ces résultats suggèrent que des échantillons ayant subi des traitements thermiques différents ou possédant des microstructures distinctes peuvent présenter des variations significatives dans leurs propriétés magnétiques. Cette analyse magnétique, combinée aux autres études microstructurales et mécaniques, permet de mieux comprendre l'impact des différentes conditions de traitement sur les propriétés globales des matériaux étudiés.

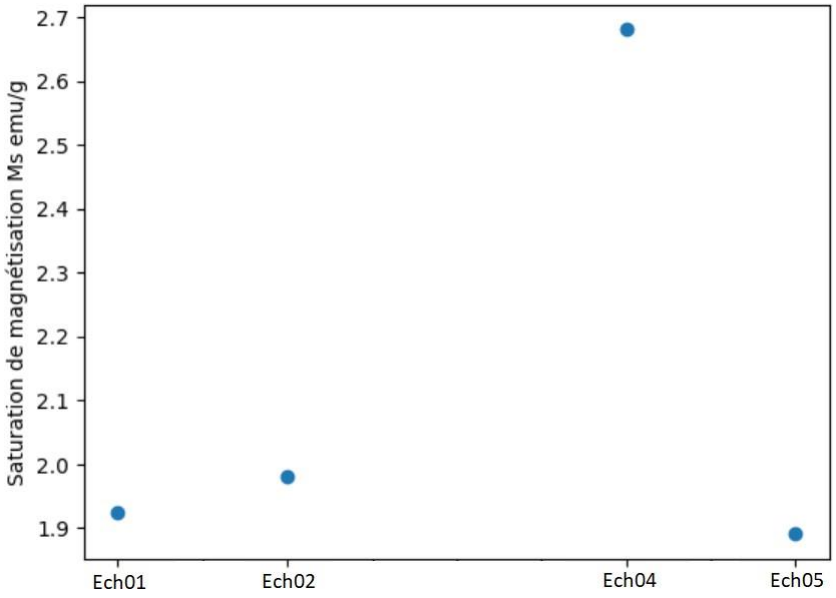


FIG. 3.24 : Nuage de points représentant la saturation de magnétisation Ms emu/g de chaque echantillon.

La saturation de magnétisation (Ms) des échantillons varie en fonction du traitement thermique appliqué. L'état brut présente la plus faible valeur de Ms, tandis que l'état trempé avec un maintien de 20 minutes présente la plus haute valeur, indiquant une structure martensitique optimale pour les propriétés magnétiques. Les échantillons recuits et trempés avec différents temps de maintien montrent des variations dans la magnétisation de saturation, probablement dues à des changements dans la taille des grains et la présence de contraintes résiduelles. Bien que les observations au microscope optique montrent une structure similaire pour les échantillons Ech01 et Ech02, la réduction des contraintes internes par le recuit peut expliquer la légère augmentation de Ms dans l'échantillon recuit

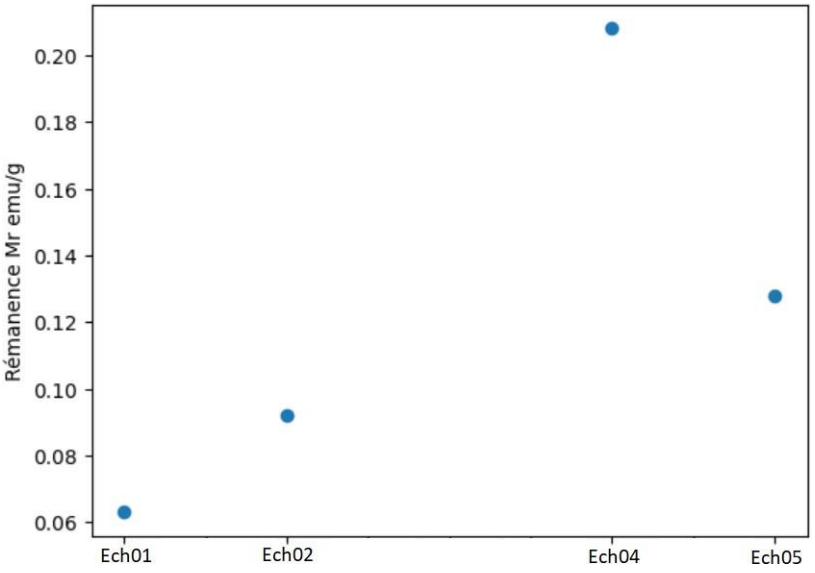


FIG. 3.25 : Nuage de points représentant la Rémanence Mr emu/g de chaque echantillon.

Interprétation des courbes :

- **Ech01 et Ech02 :** Les courbes pour ces échantillons montrent des comportements similaires, avec une aimantation qui varie de manière linéaire avec le champ magnétique appliqué (H). La coercivité (Hc), qui représente la mesure du champ magnétique nécessaire pour démagnétiser complètement le matériau, est faible, indiquant que ces échantillons sont facilement magnétisables et démagnétisables.
- **Ech05 :** L'échantillon Ech05 présente également un comportement similaire à Ech01 et Ech02, avec une faible coercivité et une aimantation linéaire par rapport au champ magnétique appliqué.
- **Ech04 :** En revanche, la courbe pour l'échantillon Ech04 montre un comportement différent. Elle présente une aimantation plus élevée pour un champ magnétique appliqué donné, indiquant une magnétisation plus forte. De plus, la coercivité est plus élevée, ce qui signifie qu'un champ magnétique plus important est nécessaire pour démagnétiser ce matériau. Cette différence peut être attribuée à la dispersion du nickel dans la matrice de l'acier inoxydable. La présence d'atomes de nickel libre peut influencer les propriétés magnétiques du matériau, en modifiant la structure magnétique et en augmentant la coercivité.

Discussion :

Les différences observées dans les courbes d'hystérésis des différents échantillons peuvent être attribuées aux variations de composition et de microstructure résultant des différents traitements. Les traitements thermiques, les processus de trempe et de recuit peuvent tous avoir un impact sur les propriétés magnétiques des aciers inoxydables. La présence de nickel libre dans l'échantillon Ech04 peut contribuer à une magnétisation plus forte et à une coercivité plus élevée.

Conclusion :

Les courbes d'hystérésis fournissent des informations précieuses sur les propriétés magnétiques des matériaux. Dans le cas de l'acier inoxydable austénitique 316, les différentes courbes obtenues pour les différents traitements montrent des variations significatives dans les propriétés magnétiques, ce qui peut être attribué aux variations de composition et de microstructure induites par les différents traitements.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a permis d'examiner en profondeur les propriétés structurales, microstructurales, mécaniques et magnétiques des aciers inoxydables austénitiques X5CrNi18-10 soumis à un traitement d'hyper trempe. En utilisant une variété de techniques expérimentales avancées, nous avons pu caractériser les modifications induites par ce traitement thermique sur les échantillons.

Les analyses structurales, effectuées par diffraction des rayons X, ont révélé des variations significatives dans les paramètres de maille et la taille des cristallites, démontrant l'effet de l'hyper trempe sur la structure cristalline des aciers. Les études microstructurales, conduites à l'aide de la microscopie optique, ont mis en évidence une transformation notable de la microstructure, caractérisée par des grains plus homogènes et une distribution plus uniforme des phases austénitiques.

Du point de vue mécanique, les essais de microdureté ont montré une amélioration de la dureté des échantillons hyper trempés, confirmant l'effet bénéfique du traitement thermique sur la résistance mécanique des aciers. En outre, l'analyse magnétique a révélé une réduction de la susceptibilité magnétique, ce qui est cohérent avec la formation d'une phase austénitique plus stable et homogène.

Les résultats obtenus ont des implications importantes pour l'application des aciers inoxydables austénitiques X5CrNi18-10 dans des environnements exigeants, tels que le transport du gaz naturel. L'amélioration des propriétés mécaniques et la stabilité structurelle accrue après hyper trempe rendent ces matériaux particulièrement adaptés pour des usages industriels nécessitant une haute résistance à la corrosion et une durabilité exceptionnelle.

En conclusion, cette étude démontre que le traitement d'hyper trempe est une méthode efficace pour optimiser les propriétés des aciers inoxydables austénitiques, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles applications et à une meilleure performance dans des conditions d'exploitation rigoureuses. Les perspectives futures incluent des études complémentaires pour explorer l'impact de divers paramètres de traitement thermique sur d'autres propriétés critiques et l'élargissement de cette approche à d'autres types d'aciers inoxydables.

Bibliographie

[1] S. W. Thompson, V. Parthasarathi, and K. O. Findley, "A comparison of bending-fatigue properties of surface-induction-hardened sae 1045 bar steels with and without vanadium and the influence of comparable low-temperature induction-tempering and furnace-tempering treatments," *Materials Science and Engineering : A*, vol. 807, p. 140812, 2021.

[2] E. R. White, "Advanced materials in high temperature applications," *Advanced Materials Science*, 2022.

[3] J. Davis, *Stainless Steels*. ASM International, 1994.

[4] D. Llewellyn, *Steels : Metallurgy and Applications*. Butterworth-Heinemann, 1994.

[5] D. Peckner and I. Bernstein, *Handbook of Stainless Steels*. McGraw-Hill, 1977.

[6] W. Strauss, "The development of austenitic stainless steels," *Journal of Metal Progress*, 1924.

[7] J. Davis, *ASM Specialty Handbook : Carbon and Alloy Steels*. ASM International, 1996.

[8] G. Totten, *Steel Heat Treatment : Metallurgy and Technologies*. CRC Press, 2006.

[9] G. Roberts *et al.*, *Tool Steels*. ASM International, 1998.

[10] D. A. Brahimi Behlouli and Hamza, "Caractérisation des couches de diffusion d'un acier inoxydable 17-7ph (cementation et nitruration)," Master's thesis, Université Blida 1, Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, 2014.

[11] H. Brearley, "The discovery of stainless steel," *Stainless Steel World*, 1915.

[12] D. T. Llewellyn, *Steels : Metallurgy and Applications*. Butterworth-Heinemann, 1996.

[13] M. J. Cieslak, *Welding Metallurgy of Stainless Steels*. Springer-Verlag, 1988.

[14] S. W. Thompson, *Properties and Selection : Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM International, 1990.

[15] J. Callister, W.D., *Materials Science and Engineering : An Introduction*, 9th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2014.

[16] G. Totten, *Steel Heat Treatment Handbook*, 2nd ed. CRC Press, 2007.

[17] R. Reed-Hill, *Physical Metallurgy Principles*, 4th ed. PWS Publishing, 1994.

[18] W. Smith, *Principles of Materials Science and Engineering*. McGraw-Hill, 1996.

[19] G. Dieter, *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill, 1986.

[20] A.-C. Bach, "Etude du piégeage de l'hydrogène dans un acier inoxydable austénitique dans le cadre de la corrosion sous contrainte assistée par l'irradiation," Ph.D. dissertation, Paris Sciences et Lettres (ComUE), 2018.

[21] J. Barralis and G. Maeder, *Structures-Propriétés et Normalisation*, 1997.

[22] F. Bounab, "Evolution microstructurales lors des traitements thermiques un acier faiblement alli," Ph.D. dissertation, 2013.

[23] M. Naima, *Fonderie et traitements thermiques Université de Batna02*, (2021).

[24] C. DJOUDI and A. A. HAMADOU, "Traitement thermique des aciers, concepts et applications," Ph.D. dissertation, UNIVERSITE KASDI-MERBAH OUARGLA.

[25] A. ZIOUCHE, "Elaboration et caracterisation des couchesminces sur les aciers par les methodes nondestructives," Ph.D. dissertation, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2018.

[26] M. LOKHMIDE, "traitement thermique des métaux," *Edition mir, moscow*, 1986.

[27] N. Cherifi and C. Bessah, "Influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques d'un acier à outils pour travail à chaud (x38crmov5-1)," Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2016.

[28] L. Mebarki, "Contribution à l'étude de précipitation du carbure dans les aciers fortement allies (frittée)," Ph.D. dissertation, Université de Batna 2-Mustafa Ben Boulaid, 2014.