

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

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA -01-
Faculté des sciences de l'ingénieur
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER EN MECANIQUE

Option : Matériaux et Traitement des Surfaces

Thème

INFLUENCE DES TRAITEMENTS
THERMIQUES SUR LA
MICROSTRUCTURE ET
RESISTANCE A LA CORROSION
ELECTROCHIMIQUE

❖ Promotrice : M^{me} KHELOUI KAHINA

Présenté Par :

- M^r BELKACEM HAMZA
- M^r HARIMA SOFIANE

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier « dieu » le tout puissant pour nous avoir donné le courage, la santé, et pour nous avoir permis de réaliser ce modeste travail

Je tiens à remercier chaleureusement ma promotrice : M^{me} KHELOUI KAHINA d'avoir accepté de diriger ce travail et de m'avoir prodigué des conseils scientifiques, ont été précieux et des orientations pour la réalisation de ce travail.

Des remerciements aux membres du jury, d'avoir accepté de juger ce travail.

A l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation ainsi que tout le personnel administratif qui, a participé au bon déroulement de ce travail,

Mes remerciements vont aussi à mes amis et mes collègues de la promotion 2024.

A tous ceux qui, par leur encouragement ou leur amitié.

Sommaire

Résumé

Liste des figures

Liste Des Tableaux

Introduction Générale 1

Chapitre I Généralités sur les aciers inoxydables

I.1 Introduction 3

I.2 Généralités 3

I.3 Historique des aciers inoxydables 5

I.4 Nuances d'acier inoxydable 5

I. 4.1 Aciers martensitiques 6

I.4.2 Aciers ferritiques 6

I.4.3 Aciers austénitiques 6

I.4.4 Aciers dits duplex 8

I.4.4 .1 Aciers austéno-ferritiques 8

I. 4.5 Aciers inoxydables à durcissement par précipitation 9

I. 5 Composition des aciers inoxydables 9

I.5.1 Équivalences des désignations 10

I.6 Comportement des aciers inoxydables 11

I.6.1 Comportement élastique 11

I.6.2 Comportement plastique 12

Chapitre II Matériaux Et Techniques Expérimentales

II.1 Matériaux utilisés et techniques expérimentales 13

II.2. Procède experimental 14

II.2.1 Découpage..... 14

II.2.2 Traitement thermique..... 16

II.2.3 Four des traitements thermiques..... 17

II.2.4 Attaque chimique..... 19

II.2.5 Essai de corrosion	20
II.3 Techniques de caractérisation	21
Chapitre III Interpretation des resultants	
III.1 Présenter le matériau.....	28
III.2 Traitements Thermiques.....	29
III.3 Les Résultats de corrosion	44
Conclusion Générale	
Références bibliographiques	

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma représentatif d'un acier inoxydable.....	4
Figure I.2 Aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304.....	7
Figure II.2 : Snyma: diagramme de phase fer-carbone.....	11
Figure II.1: Guillotine.....	15
Figure II.2 : Polisseuse.....	16
Figure II.3 : Four Nabertherm.....	18
Figure II.4 : Polisseuse de finition.....	21
Figure II.5 : microscope optique de marque CarlZeiss à plateau inversé.....	22
Figure III.1 : Polarisation potentiodynamique Tafel, 304 MB.....	29
Figure III.2 : refroidissement à l'air.....	32
Figure III.3 : refroidissement à l'eau.....	32
Figure III.4 : refroidissement à l'air.....	34
Figure III.5 : refroidissement à l'eau.....	34
Figure III.6 : résultats du microdureté.....	44
Figure III.7 : Polarisation potentiodynamique Tafel, AIR1000.....	44
Figure III.8 : Polarisation potentiodynamique Tafel, AIR1100.....	45
Figure III.9 : Polarisation potentiodynamique Tafel, EAU 1000.....	47
Figure III.10 : Polarisation potentiodynamique Tafel, EAU1100.....	47

Liste Des Tableaux

Tableau I.1 : Équivalences des désignations.....	10
Tableau II.1: composition chimique de l'acier 304.....	17
Tableau III.1 : Les résultats des essais de corrosion.....	38

Résumé

L'acier inoxydable 304 est l'un des aciers inoxydables austénitiques les plus couramment utilisés. Il est apprécié pour sa combinaison unique de propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion, ce qui en fait un matériau polyvalent et largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels.

L'acier inoxydable 304 est composé principalement de fer, avec des quantités significatives de chrome (18-20%) et de nickel (8-10.5%).

Les traitements thermiques peuvent modifier les propriétés de l'acier inoxydable 304 de manière significative.

Ce travail avait pour objectif les traitements thermiques sur les aciers inoxydables 304.

Abstract

Stainless steel 304 is one of the most commonly used austenitic stainless steels. It is valued for its unique combination of mechanical properties and corrosion resistance, making it a versatile material widely used in many industrial sectors. Stainless steel 304 is primarily composed of iron, with significant amounts of chromium (18-20%) and nickel (8-10.5%). Heat treatments can significantly alter the properties of stainless steel 304. This work aimed to study the heat treatments on stainless steels 304.

ملخص

الفَلَارِ الْوَقَامَ الصَّدَا 304 ُ أَذْ أَكْشَ الْفَلَارِ الْوَقَامَ الصَّدَا الْأَسْتَقَّةَ اسْتَخَذَا. ثَنَ تَقْنَنَ لَوْزَجَ الْفَذَّ هِيَ الْخِصَالُ الْوَكَاةُ فَهَاتِ الْتَاكَلُ، هُوَا جَعَلَ هَذِهِ هُنَعْدَةُ الْاسْتَخَذَاتِ تَسْتَحْدِمُ عَلَى طَاقِ أَسْعَ فِ الْعَدَّ هِيَ الْفَطَاعَاتِ الصَّاعِبِ نُكَيَّ الْفَلَارِ الْوَقَامَ الصَّدَا 304 بِشَكْلِ أَسَاسٍ هِيَ الْحَذُّ، هَع كَوَاتِ كِبِيَّةٌ هِيَ الْكَشْمُ (18-20%) الْكَلِيلُ (8-10.5%). وَكَيَّ أَى تَوْدِي الْوَالَجَاتِ الْحِصَاسُ إِلَى تَعْنِيَّ خِصَالُ الْفَلَارِ الْوَقَامَ الصَّدَا 304 بِشَكْلِ كِبِيَّ. كَانِ الْبِفِ هِيَ رَأَ الْعَوْلُ ُ دَسَاسَتِ الْوَالَجَاتِ الْحِصَاسُ عَلَى الْفَلَارِ الْوَقَامَ الصَّدَا 304

INTRODUCTION

Les aciers inoxydables 304, appartenant à la famille des aciers austénitiques, sont largement utilisés dans diverses applications industrielles en raison de leur excellente résistance à la corrosion, leur bonne formabilité et leur robustesse.

Ces propriétés font de l'acier inoxydable 304 un matériau de choix pour des secteurs allant de la construction à l'industrie alimentaire en passant par les équipements médicaux.

Les traitements thermiques jouent un rôle crucial dans l'optimisation des propriétés mécaniques et de la résistance à la corrosion des aciers inoxydables 304.

Différents procédés thermiques peuvent être appliqués, chacun ayant des effets spécifiques sur la microstructure et, par conséquent, sur les performances de l'acier.

Les traitements thermiques peuvent modifier la résistance à la traction, la dureté et la ductilité. Un recuit de solution maximise généralement la ductilité et la ténacité, tandis que des traitements inappropriés peuvent fragiliser l'alliage.

Une procédure adéquate, comme le recuit de solution, peut renforcer la résistance à la corrosion, tandis que des traitements comme la sensibilisation peuvent la réduire.

Les traitements influencent la taille des grains, la distribution des phases et la dissolution des précipités, affectant ainsi globalement les performances de l'acier.

Ce travail avait pour objectif les traitements thermiques sur les aciers inoxydables 304. Pour mener à bien notre étude, nous avons divisé le travail en une partie recherche bibliographique, dédié aux aciers inoxydable et les traitements thermiques, et une partie expérimentale, Conclusion Générale et Recommandations.

Chapitre I

Généralités sur les aciers inoxydables

Chapitre I

Généralités sur les aciers inoxydables

Introduction

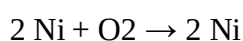
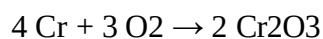
Dans ce chapitre à caractère théorique, nous présentons les aciers inoxydables et leurs caractéristiques générales, ensuite nous passons à leur comportement mécanique.

Généralités

Les aciers inoxydables, couramment appelés inox, jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc. Ce sont des aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui, au-delà de 12 % en solution (selon la teneur en carbone) dans la matrice, provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui confère à ces aciers leur inoxydabilité. [1]

D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier, et d'autres éléments comme le molybdène ou le titane qui améliorent la stabilité de l'alliage pour des températures autres que l'ambiante ainsi que des éléments à hauts points de fusion comme le vanadium et le tungstène accompagné en général d'une augmentation de la teneur en chrome, pour obtenir la résistance aux hautes températures au contact d'une flamme (aciers réfractaires). [2]

L'élément d'alliage auquel les aciers inoxydables doivent leur principale caractéristique est le chrome. Contrairement à ce que l'on croit généralement, ce métal est très réactif du point de vue chimique et il est en particulier très oxydable, mais son oxyde forme une véritable peau à la fois transparente et protectrice. Allié au fer et au nickel, il provoque la formation d'un composé de surface oxydé capable de ralentir ou même d'arrêter totalement la corrosion. Le chrome et le nickel s'oxydent ainsi :



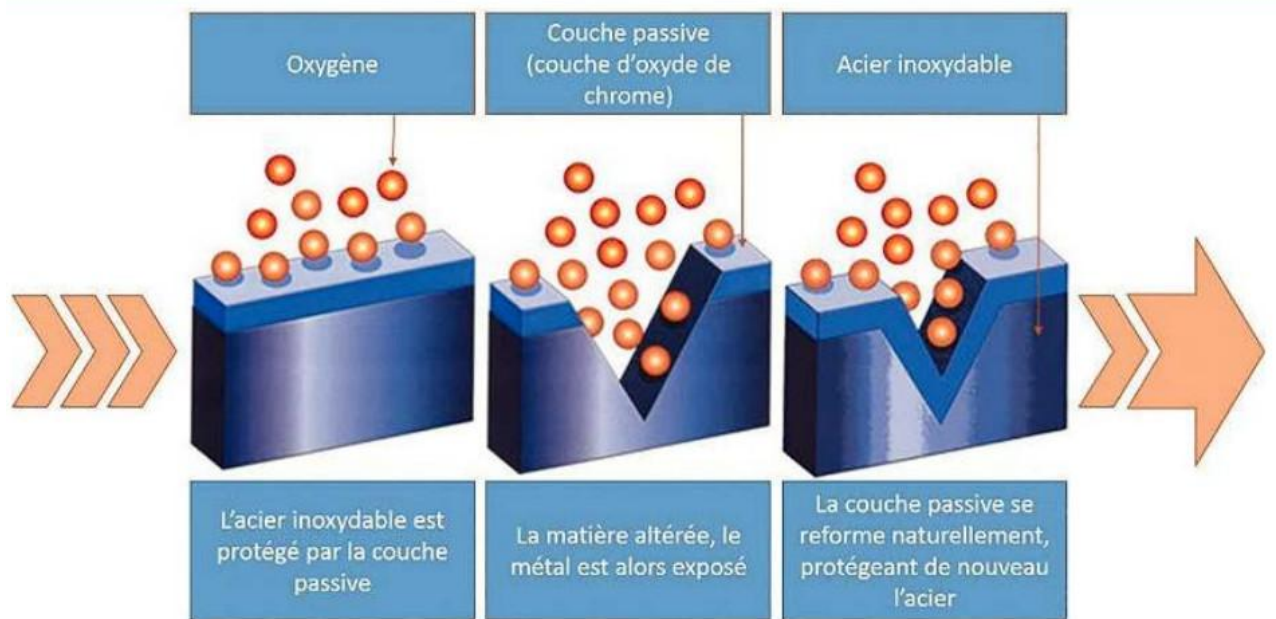


Figure I.1 : Schéma représentatif d'un acier inoxydable. [2]

Les aciers inoxydables sont utilisés dans des applications importantes comme matériau de construction dans divers environnements agressifs tels que dans l'industrie chimique, le dessalement et les déchets d'usines de traitement de l'eau et dans l'industrie pétrolière en raison de son excellente résistance à la corrosion générale, adéquates à des propriétés mécaniques à haute température, fabricabilité bonne et la soudabilité. [2]

La résistance supérieure à la corrosion de l'acier inoxydable est due à la présence d'une couche passive d'oxyde formée naturellement sur la surface de l'acier, compacte et plus ou moins parfaite.

Ce film passif est riche en chrome. Ces films passifs, cependant, sont souvent susceptibles de dégradation localisée sur le site du défaut dans des milieux en présence d'ions chlorure agressifs, provoquant des piqûres de corrosion qui détériorent la structure.

Ces ions chlorures accélèrent la dissolution active de l'alliage, retardent l'établissement de la passivité et surtout provoquent une destruction locale de la couche de passivité.

Historique des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont nés au début du 20^e siècle. Leur résistance à la corrosion est due à une teneur en chrome d'au moins 12%. Ces aciers permettent de répondre aux problèmes de corrosion sévère (industrie chimique, eau de mer...) ainsi qu'à la corrosion douce lorsque toute contamination est interdite (industrie agroalimentaire, pharmacie, industrie nucléaire...). Ils permettent aussi de résoudre les problèmes d'aspect de surface en milieu atmosphérique (bâtiment, mobilier...).

A la fin du 19^e siècle Brustlein et Boussingault ont, chacun de leur côté, mis en évidence le rôle du chrome sur la résistance à l'oxydation des alliages ferreux [Colombié, 1991]. Au tout début du 20^e siècle, Goldschmidt développe les premières nuances d'aciers inoxydables à bas carbone [Castro 1990]. Les grandes familles d'aciers inoxydables se développent progressivement.

Dès 1909, les principales nuances de base d'aciers martensitiques, ferritiques et austénitiques connues actuellement sont élaborées. Il faudra attendre 1931 pour voir apparaître les premières nuances d'aciers austéno-ferritiques.

Au contraire des aciers martensitiques qui sont formés par trempe de la phase austénitique, pour les nuances ferritiques, austénitiques et austéno-ferritiques, les transformations de phase ne touchent qu'une partie mineure du matériau. La phase principale reste principale. Leurs propriétés ne peuvent être améliorées par une trempe.

Nuances d'acier inoxydable

Il existe de nombreux types différents d'aciers inoxydables. Tous ne conviennent pas aux applications de construction, en particulier lorsqu'on envisage le soudage.

On compte cinq groupes fondamentaux d'aciers inoxydables, classés selon leur structure métallurgique : ce sont les groupes austénitique, ferritique, martensitique, duplex et durcis par précipitation.

I. 4.1 Aciers martensitiques

Ils sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13 % de chrome avec au moins 0,08 % de carbone.

D'autres nuances sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel. Exemples : X20Cr13, X46Cr13, X29CrS13. [2]

Aciers ferritiques

Ils ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 27 %), particulièrement intéressants en présence de soufre. Les aciers ferritiques sont parfois utilisés comme barrière de résistance à la corrosion (tôles plaquées, tôle revêtues, protégées (dites « claddées ») des parois d'équipements sous pression en acier utilisés dans les industries pétrochimique et chimique. Exemples : X6Cr17, X6CrMo17-1, X3CrTi17. [2]

Aciers austénitiques

L'inoxidabilité de certains aciers est due à la formation d'une couche d'oxyde de chrome protectrice à la surface de l'alliage métallique, appelée couche de passivation. La formation de cette couche de passivation nécessite une teneur en chrome de l'alliage au moins égale à 12%.

Les aciers inoxydables austénitiques sont des alliages de fer et de carbone qui contiennent, en général, de 0,02% à 0,1% de carbone, 17 à 20% de chrome, 7 à 25% de nickel, 2 à 5% de molybdène et d'autres éléments d'addition comme le cuivre, le silicium, le titane, le niobium ... (Cunat, 2000). [2]

Les éléments d'addition permettent d'améliorer la tenue à la corrosion ou les propriétés mécaniques du matériau. Depuis quelques décennies, le nickel coûteux, est progressivement remplacé par l'azote grâce à des procédés d'élaboration qui améliore sa

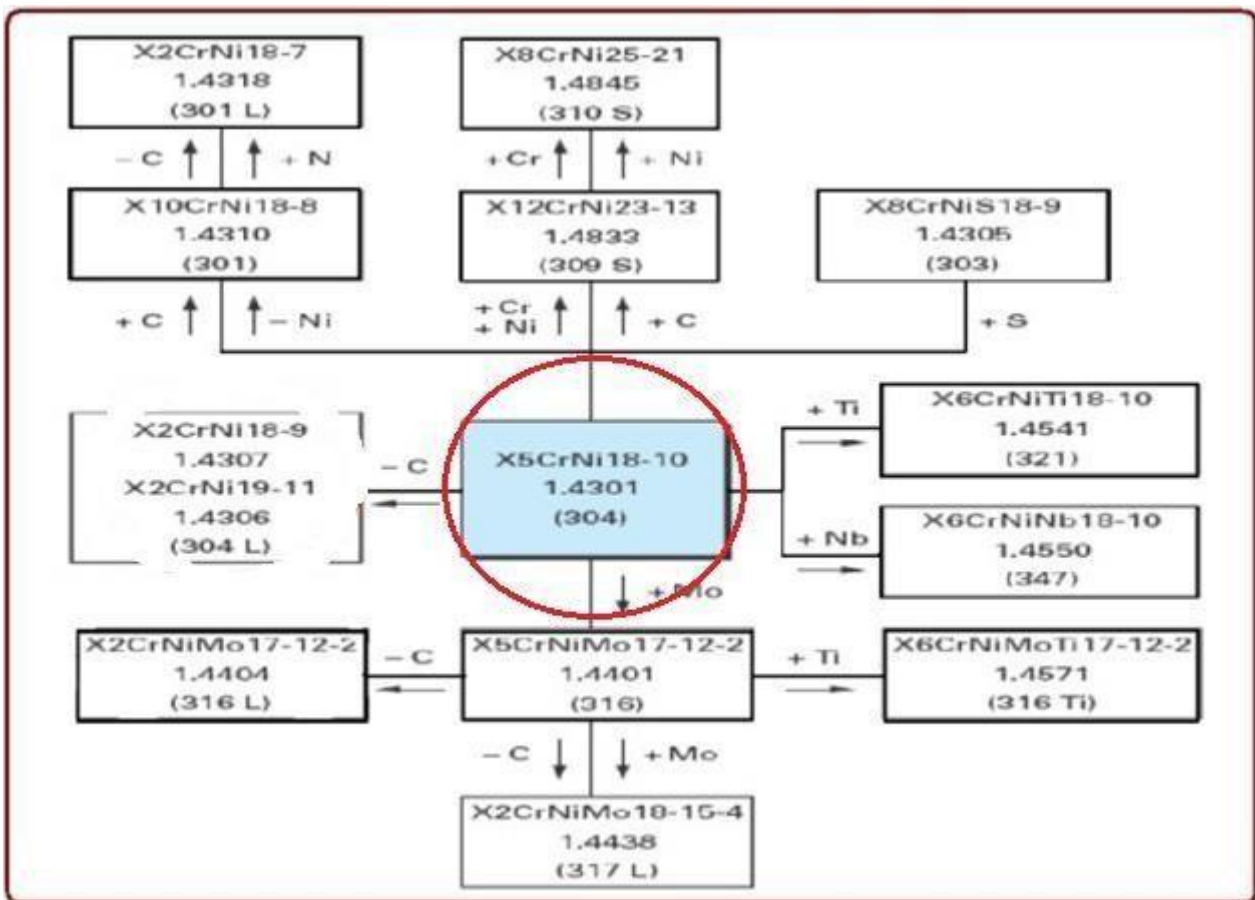


Figure I.2 Aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304 (Cunat 2000).

Solubilité dans l'acier liquide (Lacombe, Baroux, & Béranger, 1990).

Les nuances les plus couramment utilisées, souvent appelées nuances austénitiques standards, sont les nuances 1.4301 (connue sous l'appellation américaine 304) et 1.4401 (connue sous l'appellation américaine 316). Elles contiennent 17 à 18 % de chrome et 8 à 11 % de nickel. La nuance 1.4301 convient pour des sites ruraux, urbains et légèrement industriels alors que la nuance 1.4401, qui est plus fortement alliée, est bien adaptée à des sites industriels ou en atmosphère marine.

Aciers dits duplex

Les propriétés des aciers duplex sont dues, pour la plupart, à la structure biphasée de l'alliage. Ils combinent favorablement les propriétés mécaniques et de corrosion des aciers austénitiques et ferritiques.

Ceci se traduit par une limite d'élasticité élevée (entre 200 et 600 MPa) alliée à une ductilité satisfaisante (25 à 45%). La résistance à la rupture peut atteindre 850 MPa, pour des aciers duplex contenant 80% de ferrite [Desestret 1990].

Contrairement aux aciers ferritiques, ils n'ont pas de transition brutale ductile-fragile, ils peuvent donc être utilisés sans précautions particulières jusqu'à -50°C [Bavay 1990].

Les aciers duplex ont une grande résistance à la corrosion, en particulier en milieu agressif (acide, chloré ou marin). Ils possèdent, de plus, une excellente coulabilité, c'est pourquoi ils constituent la majorité de la production de pièces moulées en acier inoxydable.

La production de tôles fortes ou minces, de produits longs ou de tubes est moins développée en raison des précautions particulières à mettre en œuvre, car la teneur en ferrite et la taille de grains visés dépendent étroitement des conditions de refroidissement.

I.4.4 .1 Aciers austéno-ferritiques

Ils ont des propriétés de résistance à la corrosion intergranulaire ainsi qu'à la corrosion en eau de mer remarquables et présentent, pendant l'essai de traction, un palier élasto- plastique. Ils ont un comportement mécanique semblable aux aciers de construction. La transformation liquide / solide se traduit par une solidification en phase ferritique (ferrite delta) puis d'une seconde transformation, à l'état solide, en austénite. Ils devraient donc, en conséquence, être dénommés aciers ferrito-austénitiques.

Le simple fait de désigner correctement ces aciers permet de tout de suite comprendre qu'un refroidissement lent, pendant le soudage, permettra à un maximum de phase ferritique de se transformer en phase austénitique et réciproquement, un refroidissement rapide aboutira à un gel de la ferrite laissant peu de possibilités à la transformation austénitique. Exemple : X2CrNiN23-4.

I. 4.5 Aciers inoxydables à durcissement par précipitation

Il s'agit d'une famille d'aciers inoxydables dont les caractéristiques mécaniques sont obtenues à l'issue d'un traitement de durcissement secondaire suivant un traitement thermique de trempe ou d'hypertrempe.

Il existe trois groupes d'aciers inoxydables à durcissement par précipitation.

- a) Aciers martensitiques à transformation directe.
- b) Aciers semi-austénitiques ou à transformation martensitique Indirecte.
- c) Aciers austénitiques à durcissement par durcissement secondaire.

I. 5 Composition des aciers inoxydables

Pour être classé dans la catégorie inoxydable, un acier doit contenir au moins 10,5 % de chrome et moins de 1,2% de carbone (Norme EN 10020).

Les aciers inoxydables les plus courants :

X2CrNi18-10 (AISI 304L) : C : 0,02 %, Cr : 17 à 19 %, Ni : 9 à 11 %, utilisés pour la réalisation d'ouvrages toutes qualités ;

X2CrNiMo17-12 (AISI 316L) : C : 0,02 %, Cr : 16-18 %, Ni : 11-13 %, Mo (molybdène) : 2 %, utilisés dans les industries chimiques, pharmaceutique, pétrolières, agro-alimentaires et aussi intensément en milieu nautique ;

X8Cr17 (AISI 430) : C : 0,08 %, Cr : 16-18 %, utilisés pour les articles de ménage, l'électroménager, les éviers ;

X6CrTi12 (AISI 409) : C : 0,06 %, Cr : 11-13 %, Ti (titane), utilisé dans les échappements automobiles, fourneaux etc. (Analyse chimique en % pondéral).

La plupart des aciers inoxydables utilisés sont conformes à des normes : Européennes (norme EN 10088) ;

Américaines (normes de l'ASTM) ; L signifie low carbon (bas carbone), H signifie High carbon (haut carbone).

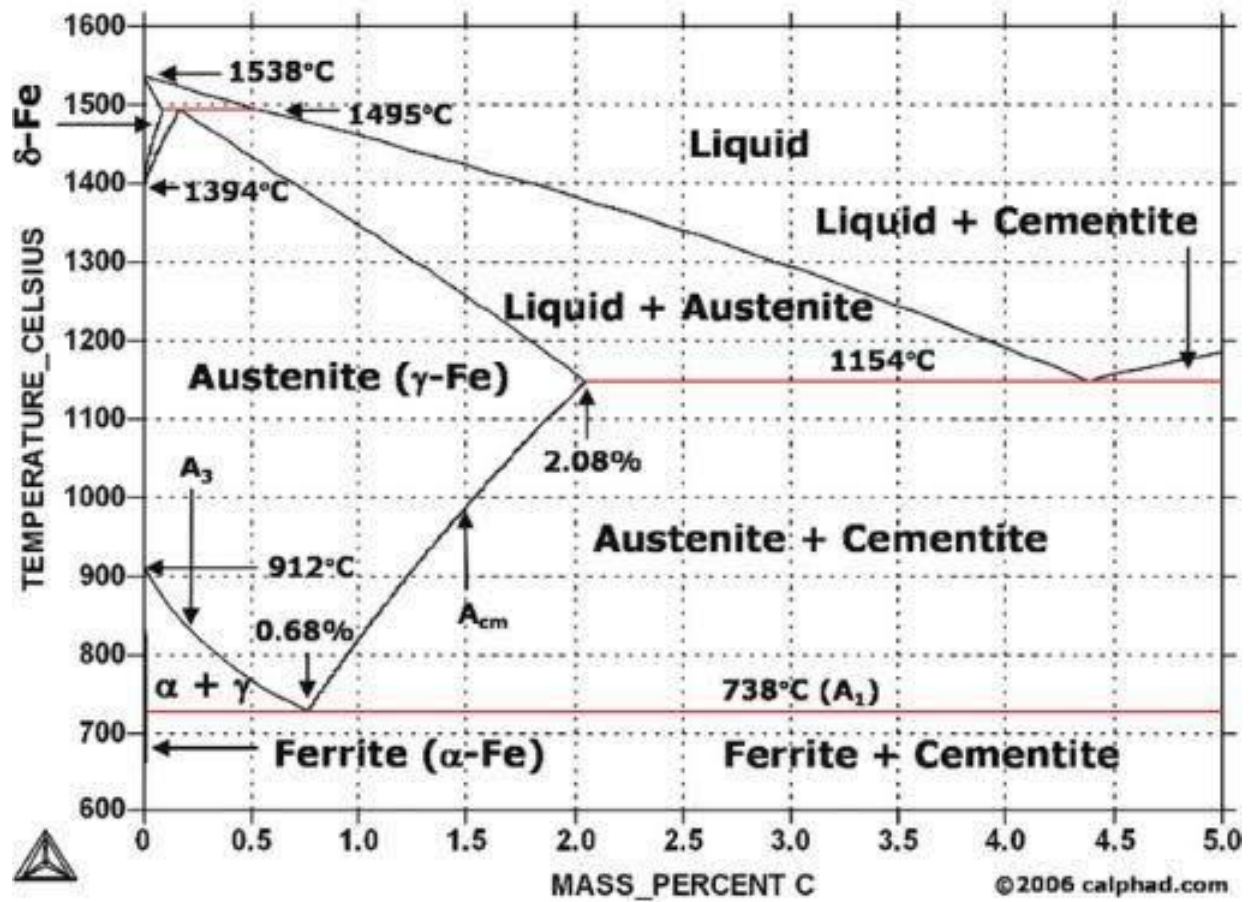
Les normes d'autres pays existent également mais sont peu connues internationalement.

Concernant le tableau d'équivalence ci-dessous il faut remarquer que la nuance américaine de type 316 autorise une teneur en molybdène de 3% maximum ce qui peut poser un problème de conformité lorsque la spécification préconise une norme européenne qui limite la teneur en molybdène à 2,5 %.

I.5.1 Équivalences des désignations

Tableau I.1 : Équivalences des désignations.

Afnor NF A 35573 (France)	EN 10027 (européenne)	AISI (États -Unis)	Composition								
			% C	% Cr	% Ni	% Mo	% Si	% Mn	% P	% S	Autres
X12CrNi18-09	Z10CN18-09	302	0,12	16 à 18	6 à 8	—	1	2	0,04	0,03	—
X12CrNi18-08	Z10CNF18-09	303	≤ 0,12	17 à 19	8 à 10	0,6	1	2	0,06	≥ 0,15	—
X5CrNi18-09 1.4301	Z6CN18-09	304	0,07	17 à 19	8 à 10	—	1	2	0,04	0,03	—
X2CrNi18-09 1.4307	Z2CN18-10	304 L	0,03	17 à 19	9 à 11	—	1	2	0,04	0,03	—
X5CrNi19-11 1.4303	Z8CN18-12	305	0,1	17 à 19	11 à 13	—	1	2	0,04	0,03	—
X7CrNi23-14	Z12CNS25-13	309	0,2	22 à 25	11 à 14	—	1	2	0,04	0,03	—
X12CrNiSi25-20	Z12CNS25-20	310	0,15	23 à 26	16 à 21	—	1	2	0,04	0,03	—
X5CrNiMo18-10 1.4401	Z6CND17-11	316	0,07	16 à 18	10 à 12,5	2 à 2,5	1	2	0,04	0,03	—
X2CrNiMo18-10 1.4404	Z2CND17-12	316 L	0,03	16 à 18	10,5 à 13	2 à 2,5	1	2	0,04	0,03	—
X10CrNiMoTi18-10 1.4571	Z6CNDT17-12	316 Ti	0,1	16 à 18	10,5 à 13	2 à 2,5	1	2	0,04	0,03	—
X10CrNiTi18-09 1.4541	Z6CNT18-10	321	0,12	17 à 19	10 à 12	—	1	2	0,04	0,03	—
X7Cr13 1.4003	Z6C13	403	0,08	11,5/13,5	—	—	1	1	0,04	0,03	—
X10Cr13 1.4006	Z12C13	410	0,08/ 0,15	11,5/13,5	—	—	1	1	0,04	0,03	—
X12CrS13	Z12CF13	416	0,08/ 0,15	12 à 14	0,5	0,15/ 0,6	1	1,5	0,06	≥ 0,15	—
X20Cr13 1.4021	Z20C13	420	0,16 /0,25	12	—	—	≤ 1	≤ 1,5	≤ 0,04	≤ 0,015	—
X30Cr13	Z30C13	420 B	0,3	12 à 14	—	—	1	1	0,04	0,03	—
X6Cr17 1.4016	Z8C17	430	0,08	16/18	0,5	—	1	1	0,04	0,03	—
X12CrMoS17	Z10CF17	430 F	0,12	16/18	0,5	0,2/ 0,6	1	1,5	0,06	≥ 0,15	—
X22CrNi17 1.4057	Z15CN16-02	431	0,1/ 0,2	15/17	1,5/3	—	1	1	0,04	0,03	—
X105CrMo17	Z100CD17	440 C	1	17	—	—	—	1	—	—	—



shyma: diagramme de phase fer carbone

Chapitre II

Matériaux Et Techniques Expérimentales

Chapitre II

Matériaux et techniques expérimentale

II.1 Matériaux utilisés et techniques expérimentales :

Matériaux :

Les matériaux qu'on a utilisés sont des aciers inoxydables 304,

L'acier 304 appartenant à la famille d'aciers inoxydable qui ont pour propriétés d'être résistant à la corrosion et ainsi éviter l'apparition de rouille.

L'acier 304 est la nuance la plus répandue parmi les aciers inoxydables représentant plus de 50 % de la production mondiale. Les deux éléments d'addition principaux sont le Chrome (entre 18 % et 20 %) et le Nickel (entre 8 et 11 %) qui ont une forte influence sur la résistance à la corrosion.

Composition :

Tableau II.1: composition chimique de l'acier 304.

C	Cr	Ni	Mn	Si	N
≤ 0,008	18,0 – 20,0	8,0 – 11,0	≤ 2,00	≤ 0,75	≤ 0,10

Applications

L'acier inoxydable 304 a une bonne résistance à la corrosion atmosphérique et à l'oxydation. La teneur élevée en alliage nickel-chrome lui confère une excellente résistance à la corrosion et est largement utilisé dans l'industrie alimentaire comme acier inoxydable de qualité alimentaire standard.

L'acier inoxydable 304 trouve utilisations dans les domaines suivants :

Industrie alimentaire : vaisselle et ustensiles de cuisine, cuiseurs à vapeur, casseroles, fourchettes, baguettes, plaques de cuisson, grilles de barbecue, contenants pour produits laitiers, paniers de stérilisation.

- Appareils électroniques : tambour de machine à laver, coque de montre et de téléphone portable, four à micro-ondes, couvercle de hotte, armoire de commande, boîtier de pompe à eau, etc.
- Matériel médical : armoires médicales, chariots médicaux, conteneur de stérilisation, table de travail, etc.
- Outils de quincaillerie : vis et écrous en acier inoxydable, ressort en acier, tissu de quincaillerie, moustiquaires, ciseaux, robinets, pommes de douche, écran de sécurité ;
- Usines de traitement d'eau : vannes, brides, conduites d'eau, équipements de purification d'eau.
- Industrie pétrochimique : équipements de filtration.

II.2. Procède expérimental :

II.2.1 Découpage

Le découpage de l'acier inoxydable de type 304, souvent désigné simplement par "acier 304", est une opération courante dans divers secteurs industriels en raison des excellentes propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion de cet alliage. Voici quelques méthodes couramment utilisées pour découper l'acier 304 :

1. **Découpe au laser** : C'est l'une des méthodes les plus précises et les plus couramment utilisées pour découper l'acier inoxydable. Le laser concentre une grande quantité d'énergie sur une petite zone, permettant des coupes nettes et précises sans contact physique direct avec le matériau.
2. **Découpe au plasma** : Cette méthode utilise un jet de plasma haute énergie pour fondre et souffler à travers le matériau, permettant des coupes rapides sur des épaisseurs plus importantes d'acier inoxydable, y compris le type 304.
3. **Découpe au jet d'eau** : L'eau pressurisée mélangée à un abrasif est utilisée pour découper l'acier inoxydable en projetant un jet à haute vitesse sur le matériau. C'est une méthode adaptée aux matériaux sensibles à la chaleur et aux coupes nécessitant une grande précision.
4. **Découpe mécanique** : L'utilisation de scies à ruban, de cisailles ou de fraises est possible pour le découpage de feuilles plus minces d'acier inoxydable 304,

bien que ces méthodes puissent nécessiter des opérations de finition supplémentaires pour obtenir une surface lisse.

5. **Découpe par électroérosion (EDM) :** Cette méthode utilise des décharges électriques pour éroder progressivement le matériau, adaptée aux coupes de formes complexes et aux matériaux très durs comme l'acier inoxydable.



Figure II.1: Guillotine.

Polissage mécanique

Le polissage est effectué au labo SDM à l'aide d'une polisseuse à pour but d'éliminer l'irrégularité de surface et donne une surface plus ou moins lisse, La polisseuse utilisée est montrée dans la figure,

Le polissage a été fait en deux étapes :

- Pré polissage.
- Polissage de finition.

Pré polissage.

Il a été fait par frottement de l'échantillon sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fins. Le polissage est fait sous eau (ou avec arrosage) pour éliminer tout risque d'échauffement de l'échantillon.

❖ Granulométries du papier abrasi utilisé : **200-400-600-800-1000-1200-2000**.

Une durée de polissage que l'on peut estimer à 5 minutes par granulométrie.



Figure II.2 : Polisseuse.

II.2.2 Traitement thermique

Le traitement thermique de l'acier inoxydable 304, également connu sous le nom d'acier AISI 304, est une étape cruciale pour ajuster ses propriétés mécaniques et structurales en fonction des exigences spécifiques d'application. Voici les principaux traitements thermiques appliqués à l'acier 304 :

1. Recuit (Annealing) :

- **Objectif** : Réduire la dureté, améliorer la ductilité et éliminer les contraintes internes résultant du travail à froid ou des traitements mécaniques.
- **Processus** : Chauffage à une température entre 1010°C et 1120°C, suivi d'un refroidissement contrôlé généralement dans un four pour éviter la formation de martensite.

2. Revenu (Tempering) :

- **Objectif** : Réduire la fragilité causée par le durcissement, tout en maintenant une dureté et une résistance adéquates.
- **Processus** : Chauffage à des températures inférieures à celles du recuit, généralement entre 400°C et 800°C, suivi d'un refroidissement contrôlé.

3. Durcissement par trempe (Quenching) :

- **Objectif** : Augmenter la dureté et la résistance de l'acier en refroidissant rapidement depuis une température élevée.
 - **Processus** : Chauffage à une température critique, puis refroidissement rapide dans de l'eau, de l'huile ou de l'air pour obtenir une structure martensitique.
4. **Durcissement par précipitation (Precipitation Hardening)** :
- **Objectif** : Renforcer l'acier inoxydable par la formation de précipités de carbures ou d'autres phases dans la matrice austénitique.
 - **Processus** : Chauffage à une température spécifique, suivie d'un refroidissement contrôlé pour induire la précipitation des phases renforçantes.

II.2.3 Four des traitements thermiques

Les fours de traitement thermique Nabertherm sont largement utilisés dans l'industrie pour diverses applications de traitement thermique, y compris pour les aciers inoxydables comme l'acier 304. Voici quelques points clés sur les fours de traitement thermique Nabertherm :

1. **Types de fours** : Nabertherm propose une gamme variée de fours adaptés à différents processus thermiques, tels que le recuit, le revenu, la trempe, la fusion, la cémentation, etc. Chaque type de four est conçu pour répondre à des besoins spécifiques en termes de taille, de température maximale, de type de contrôle et de précision.
2. **Contrôle de la température** : Les fours Nabertherm sont équipés de systèmes de contrôle avancés pour assurer une régulation précise de la température tout au long du processus thermique. Cela est essentiel pour obtenir des résultats reproductibles et contrôler les phases de transformation de l'acier inoxydable 304.
3. **Construction et isolation** : Les fours Nabertherm sont fabriqués avec des matériaux de haute qualité pour assurer une isolation thermique efficace, minimisant les pertes de chaleur et améliorant l'efficacité énergétique. La construction robuste et les matériaux résistants aux hautes températures permettent une utilisation prolongée et fiable.
4. **Sécurité et convivialité** : Les fours sont conçus pour garantir la sécurité des opérateurs lors de l'utilisation, avec des fonctionnalités telles que des systèmes de sécurité contre les surchauffes, des contrôles ergonomiques et une facilité d'utilisation grâce à une interface conviviale.
5. **Applications spécifiques** : En fonction du modèle spécifique, les fours Nabertherm peuvent être utilisés pour diverses applications de traitement thermique des métaux, notamment le

traitement de l'acier inoxydable 304 pour améliorer ses propriétés mécaniques, sa résistance à la corrosion et sa structure cristalline.



Figure II.3 : Four Nabertherm



Figure II.4 : Polisseuse de finition

II.2.4 Attaque chimique

L'acier inoxydable 304 est réputé pour sa bonne résistance à la corrosion, en particulier contre la corrosion chimique dans de nombreux environnements. Cependant, il peut être attaqué chimiquement dans certaines conditions spécifiques. Voici quelques exemples d'attaques chimiques auxquelles l'acier 304 peut être susceptible :

1. Corrosion par les acides forts :

- L'acier inoxydable 304 peut être attaqué par des acides forts tels que l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide sulfurique (H₂SO₄) à haute concentration, et l'acide nitrique (HNO₃) concentré. Ces acides peuvent dissoudre la passivation naturelle de la surface et provoquer une corrosion uniforme ou localisée.

2. Corrosion par les chlorures :

- En présence de chlorures (par exemple dans des environnements marins ou industriels contenant des sels), l'acier 304 peut subir une corrosion sous forme de piqûres ou de fissures, connue sous le nom de corrosion par piqûres.

3. Corrosion par les bases fortes :

- Les bases fortes comme l'hydroxyde de sodium (NaOH) à haute concentration peuvent attaquer l'acier inoxydable 304, surtout à haute température, provoquant une corrosion et une dégradation de la surface.

4. Corrosion intergranulaire :

- À des températures élevées (typiquement entre 450°C et 850°C), l'acier 304 peut être sujet à une corrosion intergranulaire. Cela se produit lorsque le carbone précipite aux joints de grains, affaiblissant les propriétés de résistance à la corrosion.

5. Corrosion dans des environnements spécifiques :

- Certains environnements industriels peuvent contenir des composés spécifiques qui peuvent attaquer l'acier 304, comme le dioxyde de soufre (SO₂) dans les industries chimiques.

Pour évaluer la résistance de l'acier 304 à une attaque chimique spécifique, des tests de corrosion appropriés sont effectués, tels que des essais de bain de réactifs, des essais d'immersion, des essais en milieu corrosif, etc. Ces tests aident à déterminer les conditions dans lesquelles l'acier 304 peut être utilisé en toute sécurité et à identifier les mesures de protection nécessaires pour prévenir la corrosion dans des environnements agressifs.

II.2.5 Essai de corrosion

L'acier inoxydable 304 est réputé pour sa bonne résistance à la corrosion dans de nombreuses conditions environnementales, en particulier en présence d'oxygène, ce qui lui permet de rester largement utilisé dans diverses applications industrielles et domestiques. Cependant, pour évaluer sa résistance à la corrosion dans des conditions spécifiques, des essais sont souvent nécessaires. Voici quelques méthodes couramment utilisées pour tester la corrosion de l'acier 304 :

1. Essai de brouillard salin (Salt Spray Test) :

- **Objectif** : Évaluer la résistance à la corrosion par exposition à un environnement de brouillard salin.
- **Méthode** : L'échantillon est placé dans une chambre où il est exposé à une atmosphère de brouillard salin (solution de chlorure de sodium) pendant une période spécifiée. Les changements de masse, l'apparence et les défauts de corrosion sont évalués après la période d'exposition.

2. Essai de corrosion en immersion :

- **Objectif** : Évaluer la résistance à la corrosion en immergeant l'échantillon dans un liquide corrosif, souvent une solution saline ou un acide dilué.
- **Méthode** : L'échantillon est plongé dans le liquide corrosif à une température et pour une durée spécifique. Après immersion, l'échantillon est examiné visuellement pour détecter toute forme de corrosion ou de perte de masse.

3. Essai électrochimique :

- **Objectif** : Évaluer les propriétés électrochimiques de l'acier 304, y compris la polarisation et la résistance à la corrosion électrochimique.
- **Méthode** : L'échantillon est soumis à des cycles de potentiel électrochimique dans un électrolyte approprié. Les courbes de polarisation et d'autres paramètres électrochimiques sont mesurés pour évaluer la résistance à la corrosion.

4. Essai de corrosion sous contrainte (Stress Corrosion Cracking, SCC) :

- **Objectif** : Évaluer la susceptibilité de l'acier 304 à la corrosion sous contrainte.
- **Méthode** : L'échantillon est soumis à une contrainte mécanique constante dans un environnement corrosif spécifique. Les fissures et les dommages résultant de la corrosion sous contrainte sont examinés après une période d'exposition.

II.3 Techniques de caractérisation :

Microscope optique

Le microscope qui se trouve dans notre laboratoire est équipé de quatre objectifs d'agrandissement de 20X jusqu'à 100X, un oculaire de 10X (alors si on est en train de voir avec un objectif de 20X accouplé à l'oculaire de 10X alors l'agrandissement de la microstructure est de 200X. La figure III.7 montre le microscope optique de marque CarlZeiss à plateau inversé. Il est équipé d'un appareil photo numérique afin de photographier les microstructures obtenues.



Figure II.5 : microscope optique de marque CarlZeiss à plateau inversé.

Microdureté :

La microdureté est une mesure de la résistance à la pénétration d'un matériau à une échelle très petite, souvent utilisée pour caractériser des propriétés locales comme la dureté superficielle ou les variations de dureté à travers un matériau. Pour mesurer la microdureté de l'acier inoxydable 304, plusieurs méthodes sont utilisées, les plus courantes étant les tests Vickers et Knoop. Voici comment ces tests s'appliquent à l'acier 304 :

1. Test de microdureté Vickers :

- **Principe :** Un indentateur de forme pyramidale à base carrée est enfoncé dans la surface du matériau avec une force précise. La diagonale de l'empreinte résultante est mesurée pour calculer la dureté.

- **Application à l'acier 304** : Ce test est utilisé pour évaluer la dureté superficielle de l'acier 304, ce qui peut être particulièrement utile pour détecter les variations de dureté à travers les zones traitées thermiquement ou affectées par des procédés de fabrication spécifiques.

2. Test de microdureté Knoop :

- **Principe** : Un indentateur de forme pyramidale allongée est utilisé pour effectuer une petite pénétration dans la surface du matériau. La longueur de l'empreinte est mesurée pour calculer la dureté Knoop.
- **Application à l'acier 304** : Ce test est souvent utilisé pour des mesures plus localisées de la dureté, comme dans les zones critiques où une évaluation précise de la dureté est nécessaire, par exemple près des joints soudés ou des zones sujettes à la corrosion.

Dans le cas spécifique de l'acier inoxydable 304, la microdureté peut varier en fonction du traitement thermique, de l'état de surface et d'autres paramètres de fabrication. Les résultats de ces tests de microdureté aident à évaluer la qualité et les performances du matériau dans des applications où la résistance à l'usure ou la résistance mécanique locale sont critiques.

Ont réalisé les essais de dureté au niveau du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle (CSC), l'équipement utilisé pour cet essai est un du romètre de type Vickers de marque INNOVATEST(NEMESIS9000) dont le poids varie entre 10 et 150kg.



Figure II.6 : machine de dureté INNOVATEST(NEMESIS9000)

Dans notre cas, on a effectué cet essai sur des échantillons enrobés, on a pris deux points de chaque échantillon, et la force utilisée est de 10kg.

La dureté :**1. Valeurs de dureté :**

Les valeurs varient entre 125,89 HV (minimum) et 170,30 HV (maximum).

La moyenne générale est de 157,02 HV.

Cette plage est typique pour l'acier inoxydable 304, qui est considéré comme un matériau de dureté moyenne.

2. Uniformité et qualité :

L'écart type (SD) est de 17,20, ce qui indique une variation modérée entre les mesures.

L'étendue des valeurs (Etendue) est de 44,41, ce qui reflète la différence entre la valeur minimale et maximale.

Cela peut être lié à des micro-variations dans la structure du matériau ou des contraintes internes.

3. Précision :

L'absence de limites admissibles (USL et $LSL = 0$) montre que le test a été effectué sans référence à des spécifications précises.

L'indice de capacité (Cpk) est de -3,04, ce qui peut indiquer que certaines valeurs ne respecteraient pas une norme stricte si elle était définie.

4. Applications pratiques :

L'acier inoxydable 304 possède une dureté relativement faible comparée aux aciers au carbone ou alliés, mais il est apprécié pour sa résistance à la corrosion et ses propriétés mécaniques équilibrées.

Ces résultats semblent acceptables si l'objectif est une bonne résistance à la corrosion plutôt qu'une forte résistance mécanique.

5. Recommandations :

Si les variations sont problématiques pour certaines applications (par exemple, outils de coupe ou environnement sous haute pression), il pourrait être utile d'améliorer l'uniformité par des traitements thermiques ou un contrôle rigoureux du processus de fabrication.

Réaliser des tests supplémentaires sur d'autres échantillons peut confirmer l'uniformité des résultats sur l'ensemble du lot.

En analysant les résultats du test de dureté pour l'acier inoxydable 304, voici une interprétation plus approfondie :

1. Les valeurs et résultats :

Valeurs mesurées : Elles varient entre 125,89 HV et 170,30 HV, avec une moyenne de 157,02 HV.

Ces valeurs sont typiques pour l'acier inoxydable 304, un matériau de dureté moyenne adapté à de nombreuses applications.

L'étendue des valeurs (44,41) montre une certaine variation de dureté sur l'échantillon.

2. Signification des variations :

Écart type ($SD = 17,20$) : Cela indique des variations modérées entre les mesures.

Ces variations peuvent être dues à :

Des différences microstructurales : telles qu'une variation dans la taille des grains ou la cristallisation.

Des contraintes internes : causées par les procédés de fabrication (par exemple, le formage ou le soudage).

3. Performance selon les applications :

L'acier 304 est principalement utilisé pour des applications nécessitant une haute résistance à la corrosion plutôt qu'une grande dureté (par exemple, les ustensiles de cuisine, les tuyaux, l'industrie alimentaire).

Les valeurs mesurées sont adéquates pour ce type d'utilisation. Toutefois, si une résistance mécanique élevée est requise, il pourrait être nécessaire d'optimiser le matériau.

4. Points d'attention :

Indice de capacité ($Cpk = -3,04$) :

Cela indique que la répartition des valeurs ne correspond pas à des spécifications strictes, bien qu'aucune limite supérieure (USL) ou inférieure (LSL) ne semble avoir été définie.

Si des tolérances strictes sont requises, il est important de comprendre les causes de ces variations.

Les variations peuvent être problématiques pour des applications nécessitant une uniformité élevée (par exemple, des outils de coupe ou des pièces sous forte contrainte).

5. Recommandations pour l'amélioration :

Amélioration des procédés de fabrication :

Les variations pourraient être dues à des défauts dans le processus, il est donc essentiel d'optimiser des étapes comme le refroidissement ou le recuit.

Validation sur d'autres échantillons :

Réaliser des tests sur plusieurs échantillons permettra de confirmer si ces résultats représentent tout le lot ou une partie spécifique.

Analyses complémentaires :

Des techniques comme la microscopie ou l'analyse spectrale (EDS) pourraient fournir des informations sur la distribution des éléments et les propriétés du matériau.

Conclusion :

Les résultats de dureté sont conformes aux attentes pour l'acier 304 dans ses applications classiques. Cependant, si des exigences mécaniques plus élevées sont nécessaires, il serait judicieux d'améliorer l'uniformité du matériau par des traitements thermiques ou d'envisager une autre nuance d'acier.

Chapitre III

Interprétation des résultats

Chapitre III

Interprétation des résultats

III.1 Présenter le matériau

L'acier 304 est un matériau polyvalent et durable, apprécié pour sa résistance à la corrosion, sa facilité de fabrication et sa capacité à maintenir des propriétés mécaniques satisfaisantes dans une large gamme d'applications industrielles et commerciales.

Etude Microscopique de l'acier 304 (MB)

III.2 Traitements Thermiques :

Résultats Microscopiques après traitement thermique :

La métallographie nécessite une attaque chimique des échantillons pour mettre en évidence la structure de ces derniers. Nous plaçons l'échantillon dans une solution « d'acide oxalique » de concentration de 30% pendant 60s.

Traitement de mise en solution

Chauffage l'échantillon à la température :

✓ à 1000 °C

Après 1H :

✓ à 1100 °C

Avec un temps de Maintien de 40min.

Trempe à air, eau, pour chaque température.

Polissage

NB : Après chaque étape de traitement en fassent le polissage.

Traitement de durcissement :

a). Traitement thermique N°1:

- Chauffage de l'échantillon à la température : (1000 °C)
- Un Temps de Maintien de 40min.
- Trempe à air pour l'échantillon.

b) • Traitement thermique N°2 :

- Chauffage de l'échantillon à la température : (1000 °C).
- Un maintien de 40min.
- Trempe à l'eau pour l'échantillon.

Après 1H :

c). Traitement thermique N°3 :

- Chauffage de l'échantillon à la température : (1100°C)
- Avec un temps de Maintien de 40 min.
- Trempe à air.
- Refroidissement à l'air

d) • Traitement thermique N°4 :

- Chauffage de l'échantillon à la température : (1100°C)
- Avec un temps de Maintien de 40 min.
- Trempe à l'eau

température	La Durée	La trempe
1000 °C	40 min	a l'air
		à l'eau
1100 °C	40 min	a l'air
		à l'eau

Polissage de finition :

Afin de donner à nos échantillons un effet miroir, on utilise une polisseuse de finition avec une poudre alumine



La figure II.4 montre la polisseuse de finition utilisée dans notre laboratoire.

Polissage :

Calcule la moyenne de la différents longueur réalisé l'attaque chimique La longueur = 54.649 μm

Analyse de la Microstructure

1. Observation Générale :

- La microstructure montre des grains polygonaux typiques de l'acier inoxydable traité thermiquement. Ces grains peuvent indiquer des propriétés spécifiques du matériau, telles que la résistance à la corrosion et la dureté.

2. Grains et Joints de Grains :

- Les joints de grains sont bien définis, ce qui est caractéristique de l'acier inoxydable après un traitement thermique à haute température. Les joints de grains peuvent influencer la résistance mécanique et la résistance à la corrosion.

3. Mesures Spécifiques :

- Les longueurs mesurées (en μm) varient, montrant une distribution des tailles de grains. Par exemple, la longueur de $61.389 \mu\text{m}$ indique un grain relativement grand comparé à d'autres mesures plus petites.
- Les pentes mesurées sont relativement faibles, suggérant une certaine uniformité dans l'orientation des grains.
- Les angles mesurés montrent la variété des orientations des joints de grains, ce qui peut affecter les propriétés mécaniques globales.

Interprétation des Mesures

1. Longueur des Grains :

- Une variation dans les tailles des grains peut indiquer un processus de recristallisation partielle. Les grains plus grands peuvent résulter d'une croissance des grains pendant le traitement thermique.

2. Pente et Angle :

- Les pentes faibles et les divers angles indiquent que les grains ne sont pas fortement déformés, ce qui est attendu après un traitement thermique qui vise à soulager les contraintes internes.

3. Impact sur les Propriétés Matérielles :

- **Résistance à la Corrosion** : Les grains bien définis et uniformes améliorent la résistance à la corrosion de l'acier inoxydable.
- **Dureté et Résistance** : La taille des grains peut influencer la dureté du matériau, avec des grains plus petits offrant généralement une meilleure dureté et résistance.

Conseils pour la Présentation de Vos Résultats

1.	Introduction :	
----	-----------------------	--

- Expliquez brièvement le contexte de votre projet, y compris l'importance de l'étude de la microstructure de l'acier inoxydable après traitement thermique et attaque chimique.

2. Méthodologie :

- Décrivez le processus de préparation de l'échantillon, y compris le traitement thermique à 1000°C et l'attaque chimique avec l'acide oxalique.

3. Résultats et Discussion :

- Présentez les images de microscope avec des annotations claires.
- Discutez des observations de la microstructure, en reliant les caractéristiques observées aux propriétés matérielles.
- Interprétez les mesures prises (longueur, pente, angle) et expliquez comment elles affectent les propriétés de l'acier inoxydable.

4.	Conclusion :	
----	---------------------	--

- Résumez les points clés de votre analyse, en mettant l'accent sur les implications pratiques de vos résultats.

➤ **1000 °C :**

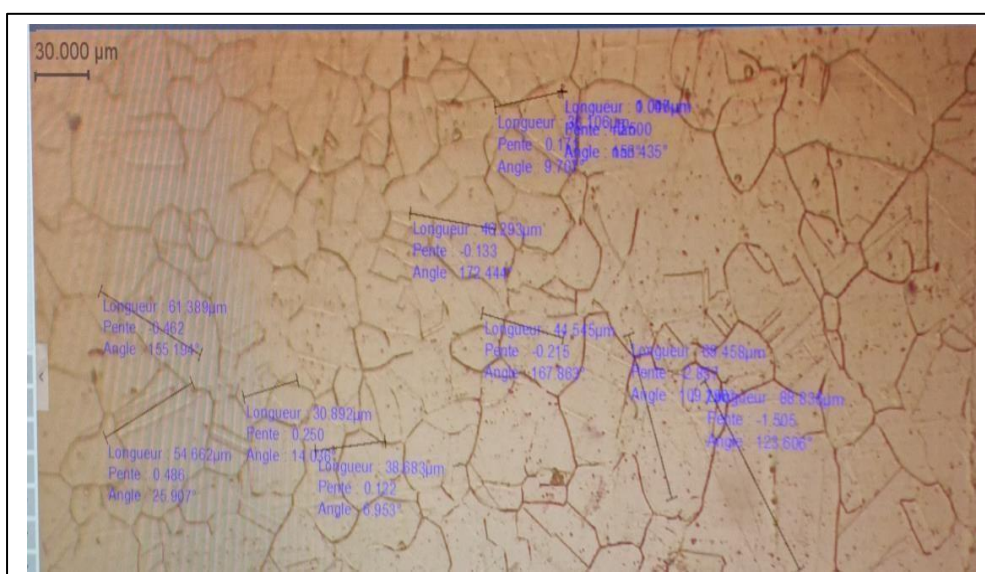


Figure III.2 : refroidissement à l'air

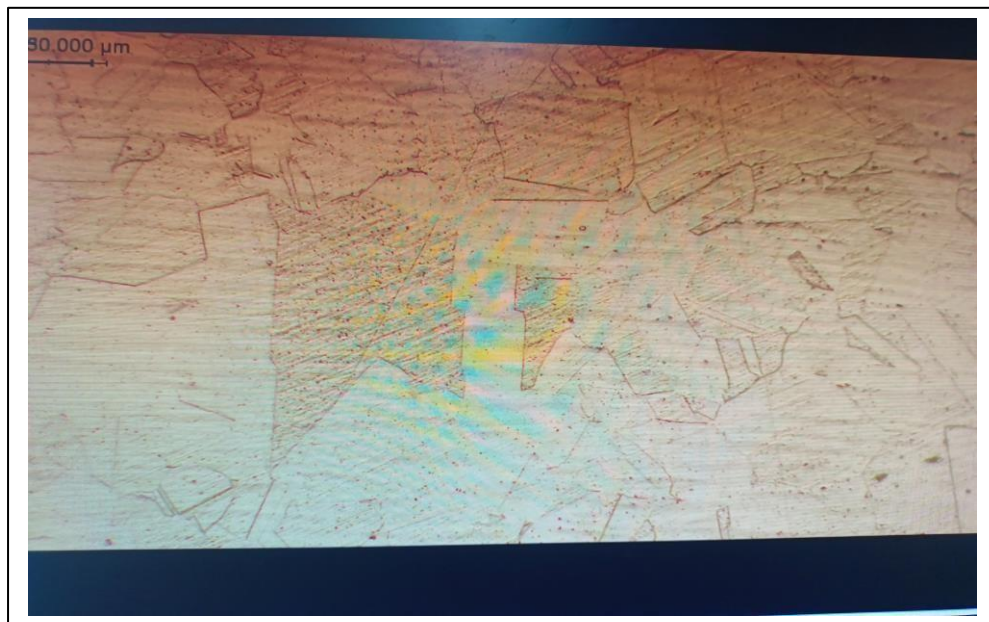


Figure III.3 : refroidissement à l'eau

1. Aspect Visuel :

- La microstructure montre des grains polygonaux similaires à ceux observés après le traitement thermique à 1000°C.
- La taille et la forme des grains semblent relativement homogènes.

2. Effet du Refroidissement à l'Eau :

- Le refroidissement rapide à l'eau entraîne une transformation rapide de la microstructure. Cela peut piéger certains défauts ou structures internes dans le matériau.
- Les grains peuvent paraître plus définis et parfois plus petits en raison du processus de trempe.

Grains et Joints de Grains

1. Taille des Grains :

- Les grains semblent bien définis et il y a peu de variation significative en termes de taille de grain comparé à l'image précédente.
- Le refroidissement rapide peut conduire à une structure plus fine et plus dure.

2. Joints de Grains :

- Les joints de grains sont bien marqués, ce qui est caractéristique des matériaux trempés. Ils peuvent influencer la résistance mécanique et la résistance à la corrosion.

Interprétation des Mesures

1. Taille des Grains :

- La taille des grains observés semble plus petite en comparaison avec l'image précédente, ce qui est attendu avec un refroidissement rapide à l'eau.
- Les grains plus fins peuvent améliorer la dureté et la résistance mécanique de l'acier inoxydable.

2. Distribution Uniforme :

- La distribution uniforme des grains indique un bon contrôle du processus de trempe, évitant ainsi les défauts majeurs qui pourraient affecter les propriétés du matériau.

3. Propriétés Matérielles :

- **Résistance à la Corrosion** : La structure fine et homogène peut améliorer la résistance à la corrosion.
- **Dureté et Résistance** : Les grains plus petits augmentent généralement la dureté et la résistance du matériau, mais peuvent parfois réduire sa ductilité.

➤ 1100 °C :



Figure III.4 : refroidissement à l'air

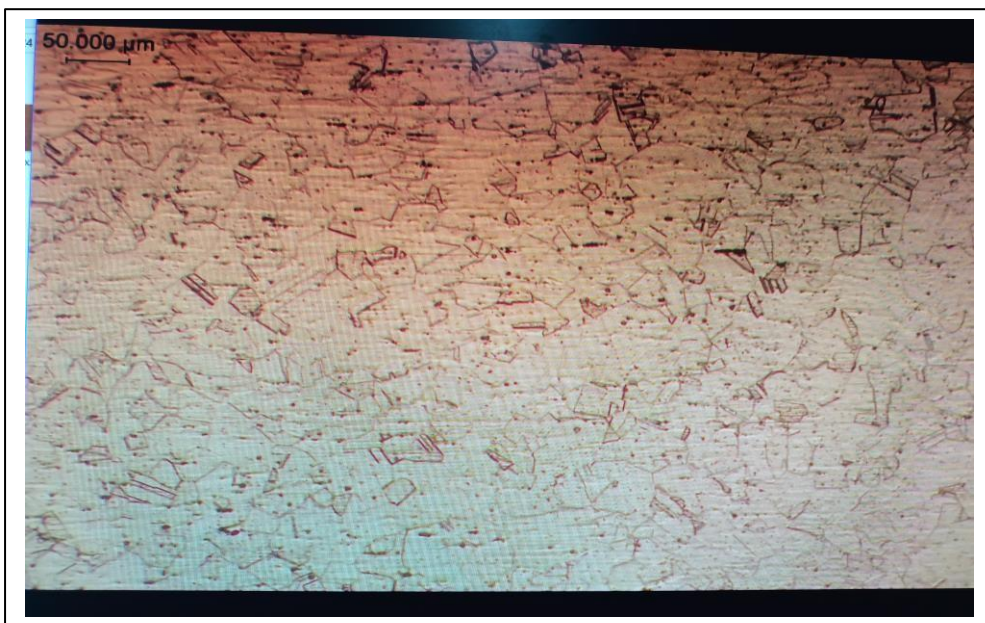


Figure III.5 : refroidissement à l'eau

Analyse de la Microstructure

Introduction

L'image téléchargée montre la microstructure de l'acier inoxydable (acier inoxydable) après une attaque chimique avec de l'acide oxalique. L'échantillon a été refroidi à l'eau après un chauffage à 1100 °C, comme indiqué par le titre "refroidissement à l'eau". L'échelle de la barre indique 50 micromètres (µm).

Structure des Grains

La microstructure présentée semble afficher des grains typiques de l'acier inoxydable, pouvant être austénitiques, ferritiques ou martensitiques selon le type spécifique d'acier inoxydable. L'attaque chimique met en évidence les joints de grains, permettant de voir la forme et la taille des grains.

Effet de l'Attaque Chimique

L'attaque chimique avec de l'acide oxalique révèle les joints de grains et peut-être la présence de précipités ou de phases secondaires à l'intérieur des grains. Cette méthode est utile pour analyser la distribution et la taille des grains.

Processus de Refroidissement

L'étiquette indique "refroidissement à l'eau," ce qui signifie que l'échantillon a été refroidi rapidement dans l'eau après avoir été chauffé à 1100 °C. Ce refroidissement rapide (trempe) peut affecter significativement la microstructure, potentiellement entraînant la formation de martensite dans certains types d'aciers inoxydables ou de l'austénite retenue dans d'autres.

Acier Inoxydable Type 304

Si cet échantillon est effectivement de l'acier inoxydable 304, il est principalement austénitique et connu pour sa bonne résistance à la corrosion et sa formabilité. Le refroidissement rapide à l'eau conserverait la structure austénitique en raison de sa structure cristalline cubique à faces centrées (CFC), stable à haute température.

Étapes Supplémentaires

- **Identification des Phases:** Utiliser des techniques d'analyse supplémentaires telles que la diffraction des rayons X (XRD) ou la diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD) pour confirmer les phases présentes.
- **Mesure de la Taille des Grains:** Réaliser une analyse quantitative pour mesurer la distribution de la taille des grains, ce qui peut fournir des informations sur les propriétés mécaniques du matériau.
- **Test de Dureté:** Effectuer des tests de dureté pour déterminer l'effet du refroidissement rapide sur la dureté du matériau.

Conclusion

L'analyse de la microstructure de l'acier inoxydable après une attaque chimique et un refroidissement rapide fournit des informations cruciales pour comprendre les propriétés du matériau. Ces informations sont essentielles pour des applications industrielles où la résistance à la corrosion et les propriétés mécaniques sont critiques.

Analyse de la Microstructure (Refroidissement à l'air)*Introduction*

L'image téléchargée montre la microstructure de l'acier inoxydable (acier inoxydable) après une attaque chimique avec de l'acide oxalique, refroidie à l'air après un chauffage à 1100 °C. L'échelle de la barre indique 50 micromètres (µm).

Structure des Grains

La microstructure présente des grains typiques de l'acier inoxydable. L'attaque chimique met en évidence les joints de grains, permettant de voir la forme et la taille des grains. La structure des grains semble plus grossière comparée à celle refroidie à l'eau.

Effet de l'Attaque Chimique

L'attaque chimique avec de l'acide oxalique révèle les joints de grains et peut-être la présence de précipités ou de phases secondaires à l'intérieur des grains. L'attaque chimique permet d'observer les caractéristiques microstructurales essentielles du matériau.

Processus de Refroidissement

L'étiquette indique "refroidissement à l'air," ce qui signifie que l'échantillon a été refroidi lentement à l'air après avoir été chauffé à 1100 °C. Ce refroidissement plus lent peut entraîner une plus grande taille des grains en raison du temps plus long permettant la croissance des grains.

Comparaison avec le Refroidissement à l'Eau

- **Refroidissement à l'Eau:** La trempe rapide à l'eau tend à produire une microstructure plus fine avec des grains plus petits. Cela est dû à la vitesse de refroidissement rapide qui empêche la croissance excessive des grains.
- **Refroidissement à l'Air:** Le refroidissement lent à l'air permet aux grains de croître davantage, conduisant à une structure de grains plus grossière. Cela peut affecter les propriétés mécaniques telles que la dureté et la résistance.

Étapes Supplémentaires

- **Identification des Phases:** Utiliser des techniques d'analyse supplémentaires telles que la diffraction des rayons X (XRD) ou la diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD) pour confirmer les phases présentes.
- **Mesure de la Taille des Grains:** Réaliser une analyse quantitative pour mesurer la distribution de la taille des grains, ce qui peut fournir des informations sur les propriétés mécaniques du matériau.
- **Test de Dureté:** Effectuer des tests de dureté pour déterminer l'effet du refroidissement lent sur la dureté du matériau.

Conclusion

L'analyse comparative des microstructures de l'acier inoxydable après refroidissement à l'air et à l'eau fournit des informations cruciales sur l'influence des conditions de refroidissement sur la structure et les propriétés du matériau. Ces informations sont essentielles pour des applications industrielles où la résistance à la corrosion et les propriétés mécaniques sont critiques.

Microdureté :**Analyse Détaillée des Résultats de la Microdureté**

Calculons la dureté moyenne et l'écart type des valeurs fournies :

Valeurs de microdureté (HV0.1) :

1. 135,63
2. 139,32
3. 156,18
4. 146,57
5. 129,90
6. 98,16
7. 156,47
8. 151,53

Interprétation des Résultats

- **Dureté Moyenne:** La dureté moyenne représente la dureté globale de l'échantillon, ce qui peut être comparé aux valeurs typiques pour l'acier inoxydable de type 304.
- **Écart Type:** Un écart type élevé indique une grande variation dans la dureté, suggérant une microstructure non homogène. Un faible écart type indiquerait une microstructure plus uniforme.

Corrélation avec la Microstructure

- **Zones de Haute Dureté:** Les zones avec des valeurs de dureté plus élevées peuvent correspondre à des grains plus fins ou à des phases plus dures comme la martensite.
- **Zones de Basse Dureté:** Les zones avec des valeurs de dureté plus basses peuvent correspondre à des grains plus grossiers ou à une structure plus ductile comme l'austénite.

Tests Complémentaires

- **Dureté Vickers à Différentes Charges:** En réalisant des tests de dureté à différentes charges (HV0.5, HV1), on peut observer comment la dureté varie en fonction de la charge appliquée, ce qui donne des indications sur la résistance du matériau à différentes échelles.

- **Cartographie de la Dureté:** Réaliser une cartographie de la dureté sur une plus grande surface de l'échantillon pour observer les variations locales de dureté et identifier des zones homogènes et hétérogènes.

Conclusion

Les résultats des tests de microdureté offrent des informations cruciales sur les propriétés mécaniques de l'acier inoxydable après traitement thermique et refroidissement. Une analyse détaillée de ces résultats, combinée à une étude approfondie de la microstructure, peut fournir des informations précieuses pour optimiser les processus de fabrication et les traitements thermiques afin d'améliorer les performances du matériau.

Calcul des Valeurs

Je vais calculer les valeurs de la moyenne et de l'écart type maintenant.

Résultats des Calculs

- **Dureté Moyenne (HV0.1) :** 139,22
- **Écart Type (HV0.1) :** 17,95

Interprétation des Résultats

- **Dureté Moyenne:** La valeur moyenne de 139,22 HV0.1 indique que l'échantillon possède une dureté globale modérée pour l'acier inoxydable de type 304. Cette valeur est typique pour ce type d'acier après un traitement thermique.
- **Écart Type:** Un écart type de 17,95 indique une variation notable dans la dureté à travers l'échantillon. Cette variation pourrait être due à des différences dans la microstructure, telles que la taille des grains, la distribution des phases, ou des défauts dans le matériau.

Corrélation avec la Microstructure

- **Zones de Haute Dureté:** Les zones avec des valeurs de dureté plus élevées (par exemple, 156,18 et 156,47 HV0.1) peuvent correspondre à des grains plus fins ou à la présence de phases plus dures.
- **Zones de Basse Dureté:** Les zones avec des valeurs de dureté plus basses (par exemple, 98,16 HV0.1) peuvent correspondre à des grains plus grossiers ou à des phases plus ductiles.

Recommandations pour des Études Complémentaires

- **Cartographie de la Dureté:** Réaliser une cartographie plus détaillée de la dureté sur l'ensemble de l'échantillon pour identifier des variations locales et obtenir une vue d'ensemble plus complète.
- **Analyse Microstructurale:** Utiliser des techniques comme la microscopie électronique à balayage (MEB) et la diffraction des rayons X pour analyser les phases présentes et la distribution des grains.
- **Tests à Différentes Charges:** Effectuer des tests de dureté à différentes charges (par exemple, HV0.5, HV1) pour étudier l'influence de la charge d'essai sur les valeurs de dureté.

Conclusion

Les résultats des tests de microdureté et l'analyse de la microstructure fournissent des informations cruciales pour comprendre les propriétés mécaniques de l'acier inoxydable après traitement thermique et refroidissement. Ces informations sont essentielles pour optimiser les processus de fabrication et les traitements thermiques afin d'améliorer les performances du matériau dans des applications industrielles.

Analyse de la courbe de corrosion (Courbe de Tafel) :

1. **Axe des abscisses (X-axis) - Potentiel électrique (Potential)** :

- Représente le potentiel appliqué à l'échantillon métallique. La variation du potentiel reflète le changement d'énergie nécessaire pour que les réactions d'oxydation et de réduction se produisent à la surface du métal.

2. **Axe des ordonnées (Y-axis) - Logarithme de la densité de courant (log current density)** :

- Représente le taux des réactions électrochimiques à la surface du métal. Plus le courant est élevé, plus le taux de corrosion est important.

3. **Zones de la courbe** :

- **Zone de corrosion active (Active Region)** :

- Dans cette zone, le courant augmente rapidement avec l'augmentation du potentiel. Cela indique que le métal se corrode activement en raison des réactions d'oxydation (perte d'électrons) à la surface du métal.

- Dans cette zone, la couche passive (couche protectrice) est instable ou absente.

- **Zone de corrosion passive (Passive Region)** :

- Ici, le taux d'augmentation du courant ralentit avec l'augmentation du potentiel. Cela indique la formation d'une couche protectrice (comme une couche d'oxyde) à la surface du métal, réduisant ainsi le taux de corrosion.

- Cette couche agit comme une barrière empêchant le milieu corrosif d'atteindre la surface du métal.

- **Zone de corrosion localisée (Pitting Region)** :

- Dans certains cas, une zone peut apparaître où le courant augmente brusquement avec une légère augmentation du potentiel. Cela indique une corrosion localisée ou par piqûres (pitting corrosion).

- Ce type de corrosion est dangereux car il peut causer des dommages localisés sévères, même dans des matériaux résistants à la corrosion.

4. **Détermination du taux de corrosion** :

- **Pentes de Tafel (Tafel Slopes)** :

- Les pentes de la courbe dans la région de Tafel peuvent être utilisées pour déterminer le taux de corrosion. Les pentes anodique et cathodique aident à calculer le taux de corrosion en utilisant les

équations de Tafel.

- **Densité de courant de corrosion (Corrosion Current Density, i_{corr})** :

- Elle est déterminée à partir de l'intersection des pentes de Tafel anodique et cathodique. Plus i_{corr} est faible, plus le métal est résistant à la corrosion.

- **Taux de corrosion (Corrosion Rate)** :

- Le taux de corrosion peut être calculé en utilisant une équation telle que l'équation de Stern-Geary, qui relie i_{corr} au taux de corrosion.

5. **Interprétation de la courbe** :

- Si la courbe montre une zone de corrosion passive claire, cela indique que l'acier inoxydable 304 a une bonne résistance à la corrosion dans ce milieu.

- S'il y a des zones de corrosion active ou localisée, des mesures de protection supplémentaires pourraient être nécessaires.

Conclusion :

En analysant la courbe de Tafel, on peut déterminer la résistance à la corrosion de l'acier inoxydable 304 dans le milieu spécifié. Si la courbe montre une zone de corrosion passive claire, cela indique une bonne résistance à la corrosion. Cependant, s'il y a des zones de corrosion active ou localisée, des mesures de protection supplémentaires pourraient être nécessaires.

Étude du Comportement à la Corrosion

1. Introduction

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un métal et son environnement, entraînant une dégradation progressive de ses propriétés. L'analyse du comportement à la corrosion est essentielle pour comprendre l'influence des différentes conditions sur la résistance des matériaux, notamment dans les applications industrielles et technologiques.

2. Types de Corrosion

La corrosion peut être classée en plusieurs catégories principales :

Corrosion uniforme (Uniform Corrosion).

Corrosion localisée (Localized Corrosion).

Corrosion galvanique (Galvanic Corrosion).

Corrosion sous contrainte (Stress Corrosion Cracking, SCC) .

Corrosion par érosion (Erosion Corrosion).

3. Étude du Comportement à la Corrosion

L'évaluation de la corrosion s'effectue à travers plusieurs tests expérimentaux, tels que :

Essai de polarisation (Polarization Test) : Permet de déterminer le taux de corrosion à l'aide des courbes de Tafel.

Essai de perte de poids (Weight Loss Test) : Consiste à immerger l'échantillon dans un milieu spécifique et mesurer la perte de masse après une période donnée.

Tests d'exposition prolongée (Long-Term Exposure Tests) : Simulent les conditions réelles d'exploitation.

4. Méthodes de Protection contre la Corrosion

Revêtements protecteurs (Protective Coatings) : Peintures organiques, revêtements métalliques par galvanisation ou anodisation.

Alliages résistants (Alloying) : Ajout d'éléments comme le chrome et le nickel pour améliorer la résistance à la corrosion.

Inhibiteurs de corrosion (Corrosion Inhibitors) : Réduisent la réaction entre le métal et son environnement.

Protection cathodique (Cathodic Protection) : Utilisée pour protéger les structures métalliques en milieux agressifs.

5. Conclusion

La résistance des matériaux à la corrosion dépend de leur composition chimique, du traitement thermique et des conditions environnementales. L'étude et les essais de corrosion permettent de sélectionner les matériaux adaptés et d'améliorer la durabilité des équipements métalliques dans divers environnements industriels.

III.3 Les Résultats de corrosion :

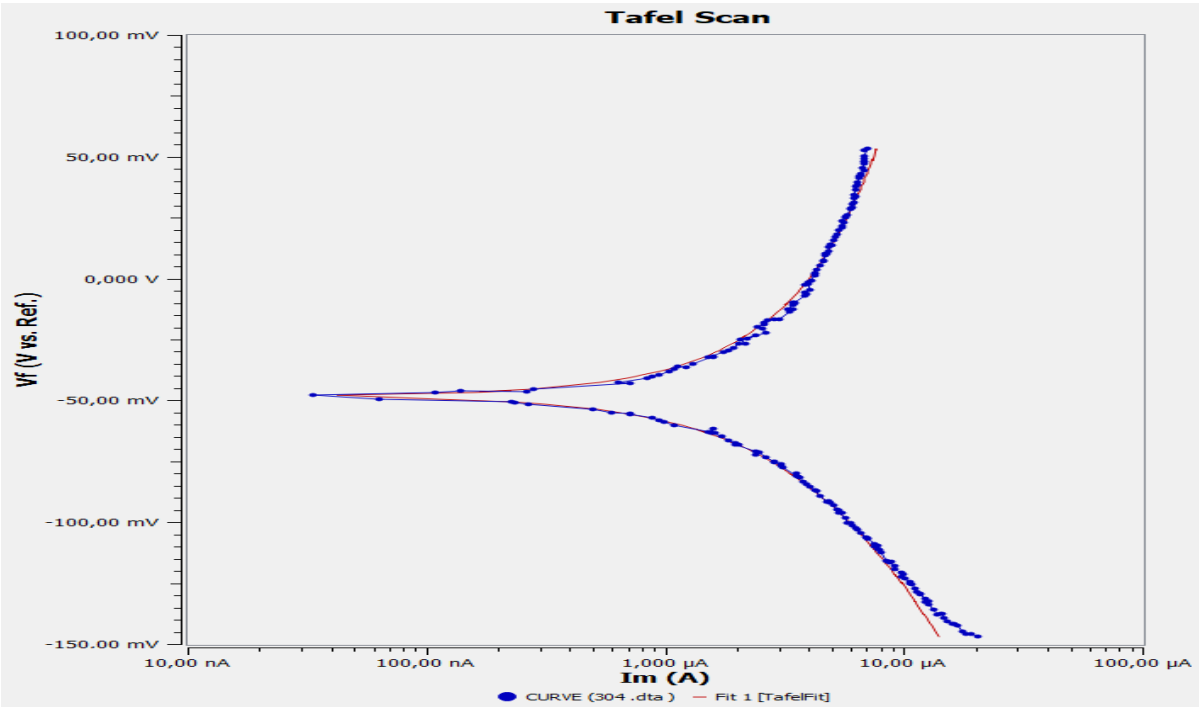


Figure III.7 : Polarisation potentiodynamique Tafel, AIR1000

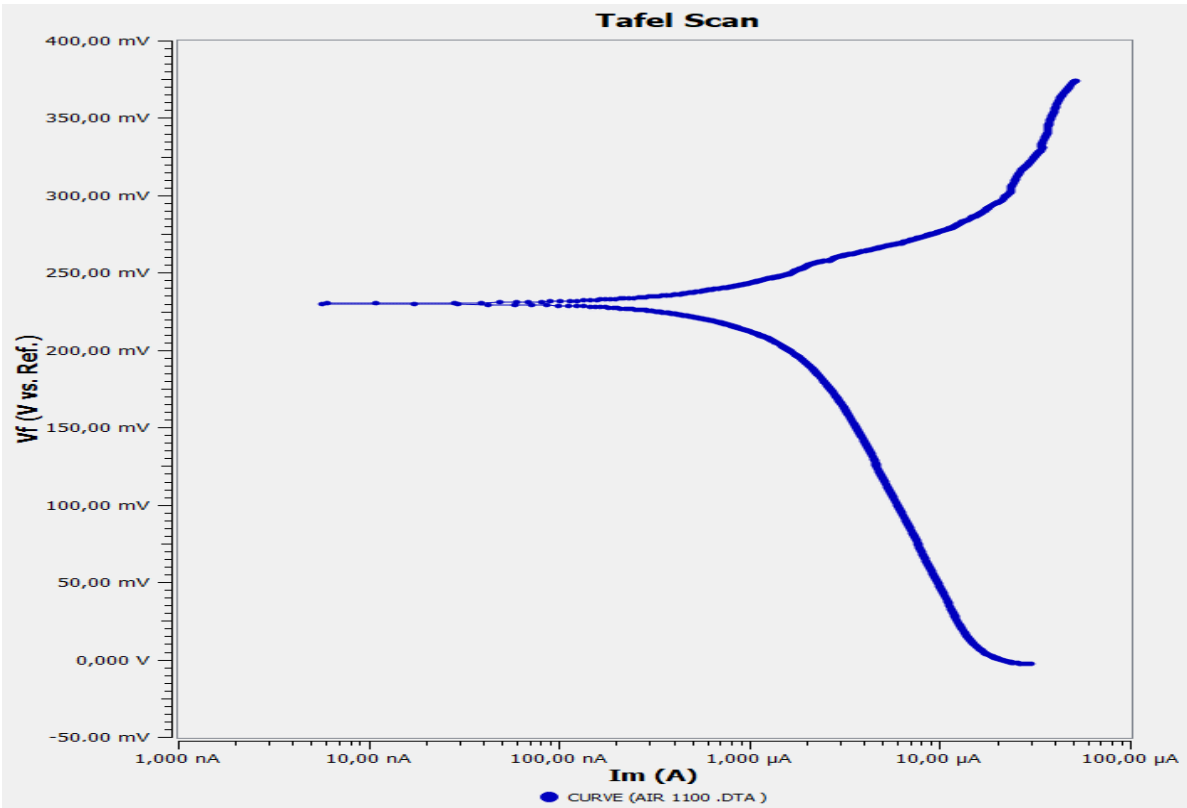


Figure III.8 : Polarisation potentiodynamique Tafel, AIR1100

Analyse de la courbe de corrosion (Courbe de Tafel) pour l'acier 304 à haute température et refroidissement à l'air :

1. **Effet du traitement thermique** :

- Lorsque l'acier 304 est chauffé à des températures élevées (1000 et 1100 °C), la dissolution du carbone et du chrome dans la structure cristalline de l'acier est favorisée. Cela peut conduire à la formation d'**austénite (Austenite)**, une phase offrant une bonne résistance à la corrosion en raison de la forte teneur en chrome.

- Cependant, si l'acier est chauffé pendant une longue période ou à des températures très élevées, une **déplétion en chrome (Chromium Depletion)** peut se produire dans certaines zones, réduisant la résistance à la corrosion en raison du manque de chrome nécessaire pour former une couche d'oxyde protectrice.

2. **Refroidissement à l'air** :

- Le refroidissement à l'air est plus lent que le refroidissement à l'eau (trempe). Ce type de refroidissement peut conduire à la formation de **ferrite (Ferrite)** ou de **perlite (Pearlite)**, des phases moins dures que la martensite mais potentiellement plus résistantes à la corrosion.

- Le refroidissement à l'air peut réduire les contraintes internes (Internal Stresses) par rapport au refroidissement rapide, diminuant ainsi le risque de **fissuration (Cracking)** ou de **corrosion sous contrainte (Stress Corrosion Cracking)**.

3. **Interprétation de la courbe** :

- **Zone de corrosion active (Active Region)** :

- Dans cette zone, le courant augmente rapidement avec l'augmentation du potentiel. Si une déplétion en chrome due au traitement thermique s'est produite, on peut observer une augmentation de la densité de courant de corrosion (i_{corr}) dans cette zone.

- **Zone de corrosion passive (Passive Region)** :

- Ici, le taux d'augmentation du courant ralentit avec l'augmentation du potentiel. Si la couche passive (couche d'oxyde) s'est bien formée, cette zone sera claire et indiquera une bonne résistance à la corrosion.

- **Zone de corrosion localisée (Pitting Region)** :

- Si le refroidissement à l'air a entraîné une hétérogénéité dans la composition chimique, on peut observer une augmentation du courant dans cette zone, indiquant une corrosion localisée.

4. ****Détermination du taux de corrosion** :**

- ****Pentes de Tafel (Tafel Slopes)** :**

- Les pentes de la courbe dans la région de Tafel peuvent être utilisées pour déterminer le taux de corrosion. Les pentes anodique et cathodique aident à calculer le taux de corrosion en utilisant les équations de Tafel.

- ****Densité de courant de corrosion (Corrosion Current Density, i_{corr})** :**

- Elle est déterminée à partir de l'intersection des pentes de Tafel anodique et cathodique. Plus i_{corr} est faible, plus le métal est résistant à la corrosion.

- ****Taux de corrosion (Corrosion Rate)** :**

- Le taux de corrosion peut être calculé en utilisant une équation telle que l'équation de Stern-Geary, qui relie i_{corr} au taux de corrosion.

5. ****Effet du milieu** :**

- ****Milieu environnant** :** Le milieu dans lequel le test est effectué (dans ce cas, l'air) a un impact significatif sur le comportement de la corrosion. La présence d'ions spécifiques ou des variations du pH peuvent grandement modifier le comportement de la corrosion.

- ****Couche d'oxyde** :** Dans le cas de l'acier inoxydable 304, la couche d'oxyde naturelle (couche passive) est cruciale pour la résistance à la corrosion. Si cette couche est compromise, une corrosion localisée peut se produire.

Conclusion :

En analysant la courbe de Tafel, on peut déterminer la résistance à la corrosion de l'acier inoxydable 304 dans les conditions de traitement thermique et de refroidissement à l'air. Si la courbe montre une zone de corrosion passive claire, cela indique une bonne résistance à la corrosion. Cependant, s'il y a des zones de corrosion active ou localisée, des mesures de protection supplémentaires pourraient être nécessaires.

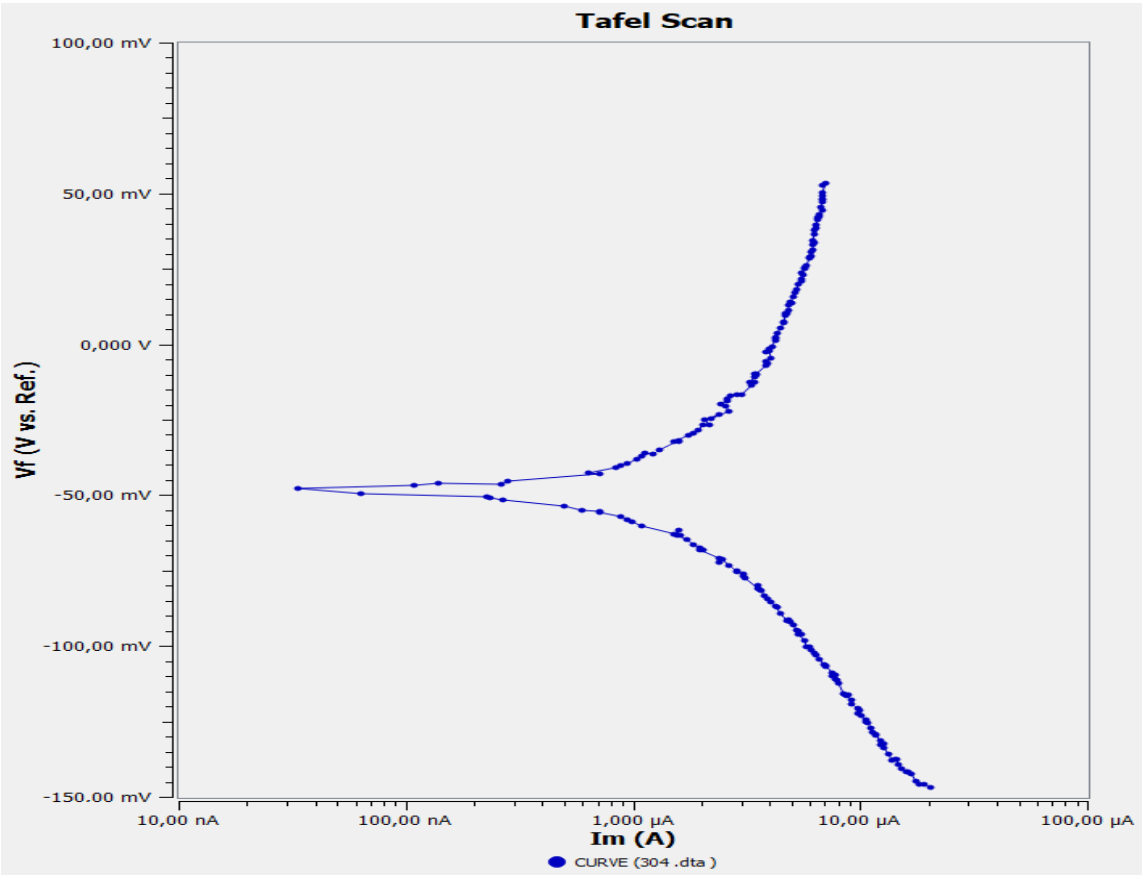


Figure III.9 : Polarisation potentiodynamique Tafel, EAU 1000

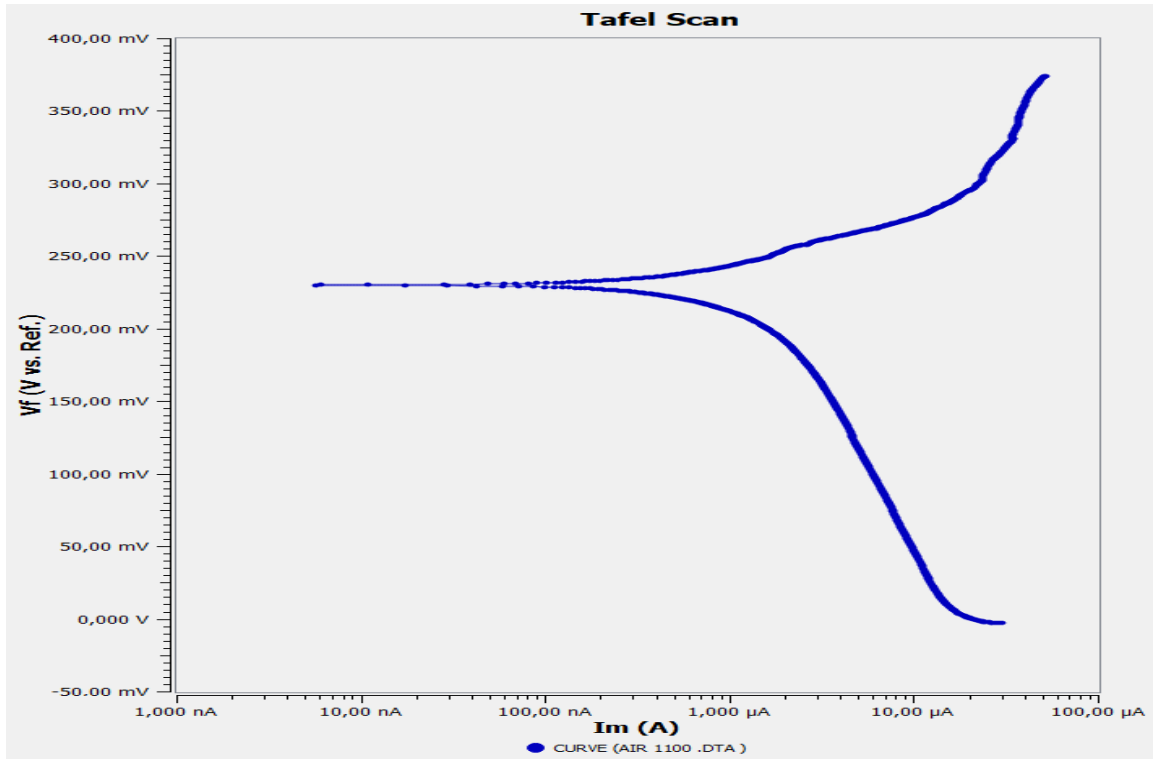


Figure III.10 : Polarisation potentiodynamique Tafel, EAU1100

1. Effet général de la température sur la corrosion :

Avec l'augmentation de la température :

Accélération des réactions électrochimiques : Une température élevée augmente l'énergie cinétique des molécules, ce qui intensifie la vitesse de corrosion.

Couche protectrice (oxyde de chrome) : À 1100°C, cette couche peut devenir moins efficace en raison de réarrangements structuraux ou de fissures, exposant davantage le métal.

2. Différences dans le potentiel de corrosion (E_{corr}) :

À 1000°C :

Le E_{corr} est moins négatif, indiquant une meilleure stabilité du métal et une résistance plus élevée à la corrosion.

À 1100°C :

Le E_{corr} devient plus négatif, ce qui signifie que l'acier est plus actif chimiquement et plus sensible à la corrosion.

3. Densité de courant de corrosion (I_{corr}) :

À 1000°C :

Le I_{corr} est plus faible, ce qui indique un taux de corrosion réduit et une meilleure protection par la couche d'oxyde.

À 1100°C :

Le I_{corr} est nettement plus élevé, reflétant une corrosion accélérée due à la détérioration de la couche protectrice.

4. Comportement des branches cathodique et anodique :

Branche anodique :

À 1000°C : La pente est moins raide, indiquant une oxydation plus lente et une meilleure résistance à la corrosion.

À 1100°C : La pente est plus raide, montrant une oxydation accélérée et une possible rupture de la couche protectrice.

Branche cathodique :

Les deux températures montrent un comportement similaire, mais à 1100°C, une légère augmentation de la pente pourrait indiquer une intensification des réactions de réduction.

5. Taux de corrosion (Corrosion Rate) :

Le taux de corrosion est directement proportionnel à I_{corr} . À 1100°C, ce taux est significativement plus élevé, traduisant une réduction importante de la résistance à la corrosion.

6. Interprétation scientifique :

À 1000°C : La couche d'oxyde de chrome reste stable et assure une protection efficace contre la corrosion.

À 1100°C :

La température élevée favorise une couche d'oxyde plus épaisse mais moins adhérente.

Un risque accru de corrosion par piqûres (Pitting Corrosion) peut survenir dans des environnements contenant des chlorures.

Les contraintes thermiques peuvent affaiblir la couche protectrice.

7. Conclusion :

À 1000°C : L'acier inoxydable 304 offre une bonne résistance à la corrosion, ce qui le rend adapté pour des applications dans ces conditions.

À 1100°C : La résistance à la corrosion diminue considérablement. L'utilisation de l'acier 304 dans ces conditions nécessite une protection supplémentaire ou l'emploi de matériaux plus résistants, comme l'acier inoxydable 304

***A l'eau :**

Analyse des courbes de corrosion (refroidissement à l'eau à 1000°C et 1100°C) pour l'acier 304 :

1. Effet du refroidissement à l'eau sur la résistance à la corrosion :

Le refroidissement rapide à l'eau entraîne la formation d'une structure métallique plus dure (comme la martensite), ce qui influence les propriétés de corrosion.

Le refroidissement à l'eau induit des tensions thermiques internes qui peuvent affaiblir la résistance à la corrosion dans certains cas.

2. Différence dans le potentiel de corrosion (E_{corr}) :**À 1000°C avec refroidissement à l'eau :**

E_{corr} est moins négatif comparé à 1100°C, indiquant une meilleure résistance à la corrosion.

À 1100°C avec refroidissement à l'eau :

E_{corr} devient plus négatif, indiquant une activité chimique accrue et une résistance plus faible à la corrosion.

3. Densité de courant de corrosion (I_{corr}) :**À 1000°C :**

I_{corr} est plus faible en raison de la stabilité accrue de la structure métallique résultant du refroidissement rapide.

À 1100°C :

I_{corr} est plus élevé, reflétant une corrosion accélérée due aux tensions thermiques et à la détérioration de la surface.

4. Effet sur la couche protectrice (oxyde de chrome) :

Avec le refroidissement à l'eau, il peut être difficile de former une couche d'oxyde de chrome adéquate en raison des variations rapides de température.

À 1100°C, la couche protectrice devient moins cohérente en raison de la température élevée et du choc thermique.

5. Comportement des branches anodique et cathodique :**Branche anodique :**

À 1000°C : La pente est moins raide, indiquant une oxydation plus lente et une meilleure stabilité.

À 1100°C : La pente est plus raide, montrant une oxydation accélérée et une dégradation de la résistance de surface.

Branche cathodique :

Les différences sont légères, mais à 1100°C, une légère accélération de la réduction de l'oxygène est observée.

6. Comparaison des performances à 1000°C et 1100°C avec refroidissement à l'eau :

À 1000°C :

Une structure plus stable, meilleure résistance à la corrosion.

Ecorr moins négatif et Icorr faible.

À 1100°C :

Augmentation des tensions internes et dégradation de la couche protectrice, conduisant à une corrosion accélérée.

Ecorr plus négatif et Icorr élevé.

7. Conclusion :

Le refroidissement à l'eau à 1000°C offre une meilleure résistance à la corrosion grâce à la stabilité structurelle.

Le refroidissement à l'eau à 1100°C réduit la résistance à la corrosion en raison de l'activité chimique accrue et des tensions thermiques.

Tableau III.1 Représente Les résultats des essais de corrosion

Tableau III.1 : Les résultats des essais de corrosion.

Echantillons	E _{ocp} (mv)	E _{cor}	I _{cor}	V _{cor} (mm/an)
Etat brut	207.90	48.33 mV	703.1 nA	1.51×10^{-9} mm/an
Traité 1000°C l'air	438.20	-48.33 mV	5.295 uA	1.14×10^{-8} mm/an
Traité 1000°C l'eau	391.5	-48.33 mV	4.999 uA	1.14×10^{-8} mm/an
Traité 1100°C l'air	588.81	230.00 mV	1.433 uA	3.07×10^{-9} mm/an
Traité 1100°C l'eau	262.5	327.90 mV	862.80 nA	1.85×10^{-9} mm/an

Conclusion

Les traitements thermiques sont essentiels pour ajuster les propriétés des aciers inoxydables 304 afin de répondre aux exigences spécifiques des applications.

Le recuit de solution est couramment utilisé pour maximiser la résistance à la corrosion et restaurer la ductilité, tandis que le recuit de détente peut réduire les contraintes résiduelles sans compromettre les propriétés.

Cependant, il faut veiller à éviter la sensibilisation, qui peut nuire considérablement à la résistance à la corrosion.

Comprendre et contrôler les effets des traitements thermiques est essentiel pour maximiser les performances des aciers inoxydables 304.

Un recuit de solution bien exécuté peut améliorer significativement la résistance à la corrosion et la ductilité, alors que des traitements inappropriés peuvent entraîner une dégradation des propriétés mécaniques et de la résistance à la corrosion.

Les traitements thermiques doivent donc être choisis et appliqués avec soin pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application.

Références Bibliographiques :

- [1] Pierre-Jean CUNAT Aciers inoxydables 4540 - Critères de choix et structure : 10/03/2000 Techniques de l'Ingénieur
- [2] Soudage des aciers inoxydables Jean-Louis MOIRON-sirp
- [3] Amy Zahia Caractérisation de l'acier inoxydable X5CrNi18-10 et étude de son oxydation à température. Thèse de magister 2013
- [4] Olbani Said Influence de la fatigue mécanique sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé en acier inoxydable austénitique « 316L ». Thèse de magister 2008
- [5] Ouchen Mouhamed EFFET DU pH DU MILIEU SUR LA CORROSION DE L'ACIER INOXYDABLE 304L; Thèse de magister 2013
- [6] Ömer Faruk MURATHAN Heat Treatment and Surface Hardening of Materials
- [7] <http://www.articlesnatch.com/Article/Precipitation-hardening-Stainless-Steel/1021505#ixzz2yQUqQzqJ>
- [8] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/precipitation-hardening-stainless-steels-102/>
- [9] Cyclic Plasticity of 17-7 Precipitation-Hardenable Semi-Austenitic Stainless Steel Tick-Hon Yip
- [10] SCIENCE DES MATERIAUX 1ER PARTIE SAID BEN SAADA , NADIA BENDRIHEM
- [12] gueddoud Mohammed cherif L'influence du traitement thermique sur la microstructure d'un acier (HSLA X70) en fonction de la température de recuit thèse de master 2013
- [13] <http://www.technoscience.net/?onglet=glossaire&definition=4648>
- [14] ETUDE METALLURGIQUE ET OPTIMISATION DE LA FABRICATION D'ALLIAGES A BASE DE CUIVRE COULES EN CONTINU
- [15] NASA astrophysics data system , thermal and mechanical treatment for precipitation hardening stainless
- [16] Hervé SASSOULAS Traitements thermiques des aciers inoxydables M 1 155 Techniques de l'Ingénieur