

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU

Faculté De Génie De La Construction Département De Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

Master Académique en Génie Mécanique

Option : Fabrication Mécanique Et Productique

Thème

***Étude de l'influence des traitements thermiques
Sur le comportement mécanique d'un acier
à haute résistance***

Propose par Pr ALMANSBA MADJID

Dirigé par Pr Madjid ALMANSBA

Et Mr Amar BOUDEDJA

Présenté par : CHALAL MOULOUD

LARBI ALI

Année universitaire 2023/2024

Remerciement

Je remercie, avant tout, le bon DIEU de m'avoir donné la
santé, le courage et la volonté pour finir ce travail.

J'exprime mes profonds remerciements à mon promoteur
Monsieur ALMANSBA pour ses orientations et sa disponibilité
constante, tout au long de mon travail.

Je tien a remercié Monsieur BOUDEDJA et Monsieur BENCHRIF pour l'aide qu'ils m'ont
apportée tout au long de mon travail.

Je tien a remercié aussi l'équipe du laboratoire SDM ainsi que l'équipe du hall technologique
de Bejaia .

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont
accepté d'évaluer mon travail.

Je tiens également à remercier tous mes amis et camarades et toutes les personnes qui m'ont
apporté
leurs aides de près ou de loin pour réaliser ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail

A ma mère

Ma famille

ALI

Dédicaces

Ce mémoire, je le dois à mes très chers parents qui m'ont fourni au quotidien un soutien et une confiance sans faille et de ce fait, je ne saurais exprimer ma gratitude seulement par des mots. Que dieu vous protège et vous garde pour nous.

A mes précieuses sœurs, les mots ne peuvent résumer ma reconnaissance et mon amour à leurs égards.

A la mémoire de notre ami BELKA Allah yerehmo

A toute la famille

A tous mes amis avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur
(Groupe ostqahwi ; Café ALPHA)

MOULOU

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	11
I. CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	14
I.1 INTRODUCTION	15
I.1.1 ACIERS INOXYDABLES	15
I.1.2 Classification des aciers inoxydables	16
I.1.3 Rôles des éléments d'addition sur les propriétés des aciers inoxydables.....	20
I.1.4 Les aciers TRIP	21
I.1.5 Effet TRIP (Transformation Induced Plasticity) dans les aciers	29
I.1.6 L'application de l'acier TRIP	34
I.2 Traitement Thermique des aciers.....	35
I.2.1 Définition	35
I.2.2 Cycle d'un traitement thermique.....	35
I.2.3 Buts et rôle des traitements thermiques :.....	36
I.2.4 Types de traitements thermiques	36
I.2.5 Défauts des traitements thermiques de l'acier	44
I.3 Conclusion.....	45
II. CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE	46
II.1 Introduction :	47
II.2 Matériau étudié :.....	47
II.3 Composition chimique et propriété mécanique :.....	47
II.3.1 Composition chimique :	47
II.3.2 Propriété mécanique :.....	47
II.3.3 Préparations des éprouvettes :.....	48
II.4 Traitement thermique :.....	48

II.5	Caractérisation mécanique :	51
II.5.1	Enrobage :	51
II.5.2	Essai de polissage :	52
II.6	Avantages du polissage électrolytique sur l'acier TRIP 304L :	52
II.6.1	Essai de la dureté avec Microduromètre :	54
II.6.2	Essai de traction :	55
II.7	Caractérisation métallographique :	56
	Attaque chimique :	56
II.8	Conclusion	57
III.	CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	58
III.1	Introduction	59
III.2	Présentation des Données Expérimentales	59
III.3	Effet des températures de traitement :	60
III.4	Effet des temps de maintien :	64
III.5	Effet des modes de refroidissement :	68
III.6	Conclusion	75
IV.	Conclusion Générale	77
IV.1	Conclusions :	78
	REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	80

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Microstructures des aciers inoxydables ferritiques.	17
Figure I-2: Microstructures des aciers inoxydables austénitiques.	18
Figure I-3: Microstructure des aciers inoxydables austéno ferritiques.	18
Figure I-4: Microstructure des aciers inoxydables martensitiques.	19
Figure I-5: Diagramme fer-carbone	23
Figure I-6: schéma typique du traitement thermique aux aciers multiphasés à effet TRIP (F : Ferrite, A : Austénite, B : Bainite, M : Martensite)	24
Figure I-7: la structure de l'acier obtenu après la trempe [12]	25
Figure I-8: Micrographie optique de l'acier AISI304. Apparition de martensite dans un grain d'austénite	26
Figure I-9: Micrographies optiques des aciers TRIP multiphasés après attaque électrochimique (TRIP600-700-800-1000). [15]	29
Figure I-10: Changement de forme et de volume associés à la transformation martensitique.[16]	30
Figure I-11: Structures de l'austénite γ et de la martensite α' dans les aciers [16]	31
Figure I-12: Variantes de martensite : (a) : la martensite en latte, (b) : la martensite en papillon, (c) : la martensite en plaquette, (d) : la martensite lenticulaire, (e) : la martensite en aiguilles plates. [17]	32
Figure I-13: Mécanisme de Greenwood et Johnson (1965) [18]	33
Figure I-14: Mécanisme de Magee [18]	34
Figure I-15 : Cycle de traitement thermique.[20] [Slim Chouchen, Introduction to Materials Engineering, chapitre 5,2018]	36
Figure I-16 : . Cycle thermique complet d'une trempe et revenu. [21] [SAID BENZAADA, Elaboration des métaux ferreux (fontes et aciers), 2010.	39
Figure I-17 : : Cycle thermique du recuit [22]	41
Figure I-18 : Gammes de températures pour différents types de recuit. [23] [Diffusion annealing = Recuit de diffusion, Full= Recuit complet, Partial= Recuit partiel, Recrystallization= Recuit de recristallisation, Process= Recuit de processus.].....	43
Figure II-1: Éprouvette de traction ASTM A 370.....	48

Figure II-2 : Four électrique, modèle « NABERTHERM »	49
Figure II-3 : Schéma d'une trempe à l'air.	50
Figure II-4 : Schéma d'une trempe à eau.	50
Figure II-5 : Schéma d'une trempe à l'huile.	51
Figure II-6 : Machine d'enrobage type STRUER	51
Figure II-7 : Polisseuse mono disque de finition.....	52
Figure II-8 : microscope optique	53
Figure II-9 : Microduromètre	55
Figure II-10 : Machine de traction	56
Figure III-1 : courbes de traction des différentes températures.....	60
Figure III-2 : Évolution de la contrainte max (a) et de la limite élastique (b) en fonction de la température de chauffage	61
Figure III-3 : Évolution de l'allongement à la rupture (a)et du module de Young (b) en fonction de la température de chauffage	62
Figure III-4 : Évolution de la dureté avant (a) et après (b) déformation en fonction de la température de chauffage	62
Figure III-5 : Microstructure de l'acier 304 L obtenue après traitement thermique et refroidie a l'air. (a) Vierge, (b) 950°C, (c) 1000°C, (d) 1100°C et (e) 1200°C.....	63
Figure III-6 : courbes de traction de différents temps de maintien	65
Figure III-7 Évolution de la contrainte maximale (a) et de la limite élastique (b) en fonction du temps du maintien	66
Figure III-8 : Évolution de l'allongement à la rupture (a) et du module de Young (b) en fonction du temps du maintien	66
Figure III-9 : Évolution de module de la dureté avant (a) et après (b) déformation en fonction du temps du maintien	66
Figure III-10 : Microstructure de l'acier 304 L obtenue après traitement thermique a 950°avec des temps de maintien (a) Vierge, (b) 30 minutes, (c) 60 minutes, (d) 120 minutes et refroidie a l'air.....	67
Figure III-11 : Influence du mode de refroidissement sur la courbe de traction	68
Figure III-12 : Évolution de la contrainte max (a) et de la limite élastique (b) en fonction du mode de refroidissement	69
Figure III-13 : Évolution de l'allongement (a)et du module de Young (b) en fonction du mode de refroidissement	69

Figure III-14 : Évolution de la dureté avant (a) et après (b) déformation en fonction du mode de refroidissement	70
Figure III-15 : Microstructure de l'acier 304 L obtenue après traitement thermique à 950° avec des temps de maintien de 30 minute pour des modes de refroidissement différent (a) Vierge, (b) Air, (c) Eau et (d) Huile.	71
Figure III-16 : Évolution de l'allongement et de la dureté en fonction de (a) la température, (b) temps de maintien et (c) mode de refroidissement.....	72
Figure III-17 : Évolution de la contrainte max et de la contrainte élastique en fonction de (a) la température, (b) temps de maintien et (c) mode de refroidissement.	73
Figure III-18 : Évolution de la dureté après déformation et de la dureté avant déformation en fonction de (a) la température, (b) temps de maintien et (c) mode de refroidissement.....	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Fourchettes de compositions chimiques des différentes familles d'aciers inoxydables.....	16
Tableau I-2 : montre quelques compositions chimiques classiques d'aciers Inox austénitiques. [14]	26
Tableau I-3 : Exemples de compositions d'aciers TRIP ayant les résistances maximales de 600MPa, 700MPa, 800MPa et 1000MPa.	28
Tableau I-4 : Dureté des aciers au carbone à l'état Recuit et Normalisé [24] [Minkévitch N. Manuel des traitements thermiques de l'acier. Editions scientifiques et techniques unifiées, 1935].....	44
Tableau II-1: composition chimique de l'acier 304L	47
Tableau II-2: propriété mécanique 304L [25].....	47
Tableau II-3: Différents variantes étudiées.....	49
Tableau III-1 : Différents variantes étudiés.	59

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La révolution industrielle a été déclenchée par de nombreuses découvertes et innovations scientifiques qui ont accéléré l'industrialisation. L'acier et ses alliages sont devenus des métaux très utilisés dans les industries, car ils offrent une grande variété de types et de propriétés, et peuvent être améliorés et modifiés pour répondre à différents besoins.

Parmi les nouvelles nuances d'aciers développés, on trouve les aciers à effet TRIP (Transformation Induced Plasticity). Ces nouveaux matériaux se distinguent par leur capacité unique à subir des transformations de phases martensitiques lorsqu'ils sont soumis à des contraintes, conférant ainsi une combinaison exceptionnelle de résistance mécanique, de ductilité et de ténacité.

Les aciers TRIP (Transformation Induced Plasticity) représentent une classe de matériaux métalliques avancés connus pour leur combinaison unique de résistance, de ductilité et de ténacité, rendant ces alliages particulièrement adaptés aux applications nécessitant à la fois légèreté et haute performance mécanique. Parmi ces aciers, le TRIP 304L se distingue par sa composition spécifique et ses propriétés améliorées de transformation de la martensite sous contrainte, offrant une grande résistance à la déformation tout en conservant une bonne formabilité.

Dans le contexte industriel actuel, où les exigences de performance des matériaux sont de plus en plus élevées, il est crucial de comprendre comment les différents paramètres de traitement thermique influencent les propriétés mécaniques des aciers TRIP 304L. Malgré leur potentiel élevé, l'optimisation de ces aciers pour des applications spécifiques nécessite une investigation approfondie des effets des températures de traitement, des temps de maintien et des modes de refroidissement sur leur microstructure et leurs propriétés mécaniques. Comment ces variables de traitement thermique peuvent-elles être ajustées pour maximiser la dureté, la ductilité et la résistance à la déformation de l'acier TRIP 304L ?

À travers cette étude, nous visons à contribuer significativement au développement des aciers TRIP 304L, en fournissant des recommandations précieuses pour leur utilisation efficace dans des environnements exigeants où la résistance à la déformation et la durabilité sont primordiales. Ces connaissances sont essentielles pour les ingénieurs et les chercheurs cherchant à exploiter pleinement le potentiel des matériaux métalliques avancés dans divers secteurs technologiques et industriels.

Ce travail de recherche vise à approfondir la compréhension des propriétés mécaniques et structurales de l'acier TRIP 304L à travers une série d'expérimentations en traitement thermique. Structuré en trois chapitres distincts, ce mémoire explore d'abord les généralités sur les aciers, en mettant l'accent sur les caractéristiques des aciers TRIP et les principes des traitements thermiques qui influencent leurs propriétés.

Le deuxième chapitre définit l'étude expérimentale, détaillant les méthodologies employées pour mener à bien les essais. Cela inclut les conditions spécifiques des traitements thermiques effectués à différentes températures (950°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C) avec des temps de maintien variés, ainsi que l'impact de différents modes de refroidissement (air, huile, eau) sur les échantillons d'acier TRIP 304L. Les outils essentiels tels que la machine de traction, la polisseuse et le microscope optique sont présentés comme des instruments clés pour l'analyse et la caractérisation des échantillons.

Enfin, le troisième chapitre regroupe les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations. Les données recueillies offrent un aperçu détaillé des effets des paramètres de traitement thermique sur la microstructure, la résistance mécanique, la ductilité et d'autres propriétés essentielles de l'acier TRIP 304L. L'analyse approfondie de ces résultats permet de formuler des conclusions cruciales pour l'optimisation des traitements thermiques, visant à maximiser les performances du matériau dans des applications industrielles diverses.

Et nous terminerons le travail avec une conclusion générale et des perspectives.

**I. CHAPITRE I : SYNTHÈSE
BIBLIOGRAPHIQUE**

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 INTRODUCTION

Les aciers sont les matériaux métalliques les plus utilisés dans les différentes branches de l'industrie. L'acier est un alliage à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone (de 0,008 à environ 2,14 % en masse).

La première partie de ce chapitre est consacré à la présentation des notions sur les aciers inoxydables en premier lieu, Par la suite nous présentons les aciers à effet trip, leurs définitions, classifications, caractéristiques et domaines d'application. La deuxième partie est réserver aux généralités sur les traitements thermiques des aciers.

I.1.1. HISTORIQUE SUR LES ACIERS INOXYDABLES

L'histoire des aciers inoxydables est intimement liée à celle du chrome et aux travaux du chimiste français Nicolas Louis Vauquelin (1763-1889) qui, en 1797, fut le premier à isoler cet élément.

- En 1821 Berthier montra que l'alliage fer-chrome était d'autant plus résistant à certains acides que sa teneur en chrome était plus élevée. Par contre, la quasi impossibilité d'abaisser la teneur en carbone de l'alliage constitua un obstacle majeur à son développement.
- En 1904, Léon Guillet et Albert Portevin publièrent une série d'études relatives à la structure et aux propriétés des alliages fer-chrome couvrant les nuances martensitiques à 13 % de chrome et les nuances ferritiques à 17 % de chrome.
- En 1909, L. Guillet publia une étude sur les aciers inoxydables au chrome nickel ou aciers inoxydables austénitiques complétant ainsi ses études précédentes sur les alliages fer-chrome et couvrant pratiquement l'ensemble de la famille des aciers inoxydables. Le métallurgiste allemand W. Giesen fit, de son côté, et à la même époque, des recherches Comparables. Les études de L. Guillet, A. Portevin et W. Giesen permirent ainsi, dès 1909, de classer les aciers inoxydables en fonction de leur structure et de définir les quatre (4) familles principales à savoir ; les aciers inoxydables martensitique, les aciers inoxydables ferritique, les aciers inoxydables austéno-ferritique et les aciers inoxydables austénitique. [1-7].

I.1.1 ACIERS INOXYDABLES

Ce sont essentiellement des alliages Fer-Chrome ou Fer-Chrome-Nickel, dont la teneur en carbone varie entre 0.02% à 1% et le pourcentage de chrome doit être supérieur à 12%, avec dans certains cas l'ajout d'éléments d'alliages interstitiels carbone ou azote ou métalliques tel

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

que : le nickel, le molybdène et le titane... pour améliorer la tenue à la corrosion et les Propriétés mécaniques. [2-9].

Aucun métal n'est inoxydable, mais dans le cas des aciers inox, on parle d'aciers difficilement oxydables, autrement dit, peu sensible à la corrosion. L'addition de chrome au fer, permet la formation en surface d'un film de passivation invisible et protecteur, qui provient de l'oxydation naturelle de la surface, et qui rend le métal passif. [3]. Cette pellicule protectrice a pour particularité d'être : très mince, chimiquement stable (passive) dans un milieu qui lui offre assez d'oxygène et aussi d'avoir une forte adhérence. Ces matériaux jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie Mécanique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc. En fonction de leur composition et de leur structure cristallographique, les aciers inoxydables sont classés en quatre (4) grandes familles. On distingue les aciers ferritiques, les aciers martensitiques, les aciers austénitiques et les aciers austéno-ferritiques.

Tableau I-1: Fourchettes de compositions chimiques des différentes familles d'aciers inoxydables.

Catégories d'aciers					
	C	Cr	Ni	Mo	Autres
Ferritique	<0.1	13-30	0-5	<5	Ti
Martensitique	0.05-1.2	12-18	>7	-	-
Austénitique	<0.2	16-35	18-27	<6	N, Cu, Ti
Austéno-ferritique	<0.05	18-27	4-7	<4	N(<0.3)

I.1.2 Classification des aciers inoxydables

La classification des aciers inoxydables se fait en fonction de leur composition chimique, leurs propriétés d'utilisations, à leur résistance à la corrosion, et à la structure cristalline. Dans ce cas on distingue cinq principales familles de l'acier inoxydable.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Les aciers inoxydables ferritiques**

Les aciers inoxydables ferritiques : sont constitués de cristaux de ferrite, ils ne contiennent pas de nickel, le carbone est inférieure à 0.1%, La ferrite absorbe une si petite quantité de carbone en raison de sa structure cristalline cubique centrée sur le corps (notée α). Ils sont appelés ferritiques parce que leur structure cristalline est la même que celle du fer à température ambiante. La quantité de chrome dans cet acier peut atteindre jusqu'à 27%, (Plus leur teneur en chrome est élevée, plus ils sont résistants à la corrosion). [3] Ces aciers ont une très bonne résistance à la corrosion mais des caractéristiques mécaniques faibles. Ils sont ainsi facilement mis en forme par emboutissage. Ils sont utilisés dans le domaine des ustensiles ménagers (cuillères, éviers...), dans le domaine alimentaire et en milieu très agressif (eau de mer). [4]



Figure I-1: Microstructures des aciers inoxydables ferritiques.

- **Acier inoxydable austénitique**

La nuance d'acier inoxydable la plus utilisée contient 17 à 18% de chrome et 8 à 11% de nickel. Les nuances austénitiques possèdent une structure cubique à face centrée (notée γ). Par conséquent, en plus de sa résistance à la corrosion élevée, les nuances austénitiques sont caractérisées par une grande ductilité, sont aisément formées à froid et facilement soudable. Elles présentent une meilleure ténacité sur un domaine de température élargi. Elles peuvent être écrouis par formage à froid mais pas par traitement thermique. Leur résistance à la corrosion peut être améliorée en augmentant le taux de chrome ainsi qu'en présence d'éléments d'alliages tels que le molybdène et l'azote. C'est la nuance la plus utilisée dans le domaine des bâtiments et de la construction.



Figure I-2: Microstructures des aciers inoxydables austénitiques.

- **Les aciers inoxydables austéno-ferritiques ou duplex**

Ces aciers ayant une structure biphasée composée d'un mélange des grains de ferrite et complétée de 40 à 60% des grains d'austénite à la température ambiante, Ils contiennent en général 20 à 26% de chrome, 1 à 8% de nickel, 0,05 à 5 % de molybdène et 0,05 à 3% d'azote. [5]

Les aciers duplex sont obtenus par trempe depuis une structure mixte austénite-ferrite. Alliant les bonnes propriétés de résistance à la corrosion des aciers ferritiques et les hautes résistances mécaniques des aciers austénitiques, ces aciers sont utilisés dans des conditions relativement agressives : industries chimiques, pétrolière et maritime. [4]

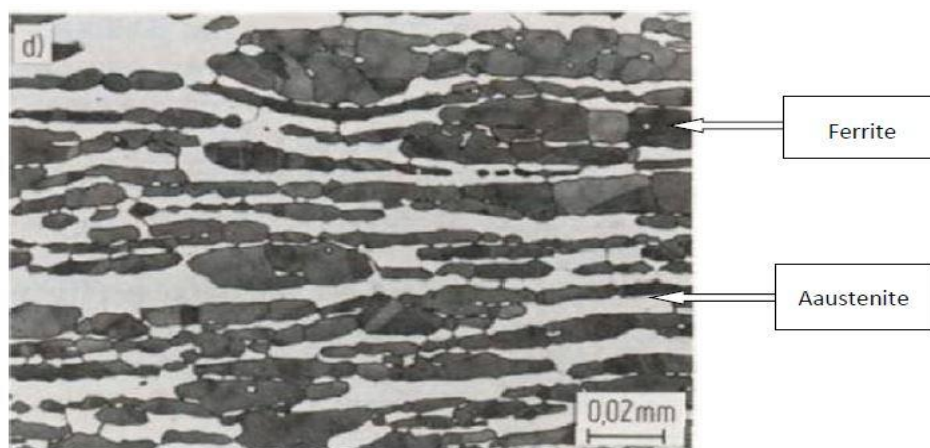


Figure I-3: Microstructure des aciers inoxydables austéno ferritiques.
(Ferrite en sombre, austénite en clair).

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Les aciers inoxydables martensitiques**

L'acier inoxydable martensitique est formé par la création de martensite. La martensite est une forme cubique de fer cristallisé centré sur le corps (notée α') est créée lorsque l'austénite chauffée et rapidement refroidie par trempe. Ces alliages comprennent de 12 à 18% de chrome et des teneurs en carbone pouvant atteindre environ 1% et ils peuvent contenir jusqu'à 7% de nickel, et jusqu'à 3% de molybdène. Ils sont utilisés dans des applications où leur tenue à l'abrasion et dureté est requise, comme dans la coutellerie, l'outillage, les instruments chirurgicaux, les outils de coupe industriels, les plaques d'usure ou encore les aubes de turbines. Ils sont moins ductiles et plus sensibles à la rupture par entaille que les autres familles.



Figure I-4: Microstructure des aciers inoxydables martensitiques.

- **Aciers inoxydables à durcissement par précipitation**

Acier inoxydable à durcissement par précipitation Ces nuances peuvent être écrouies par traitement thermique jusqu'à atteindre de très hautes résistances et sont groupées en trois catégories suivant leur structure cristalline : martensitique, semi-austénitique, austénitique. Elles ne sont habituellement pas utilisées dans les constructions soudées. Leur résistance à la corrosion est en général meilleure que celle des nuances martensitiques et similaire à la nuance austénitique contenant 18% de chrome et 8% de nickel. Bien que principalement utilisés dans le domaine aéronautique, ils sont aussi utilisés en tant que barre de traction, arbre de transmission, boulons et d'autres applications requérant une très haute résistance couplée à une résistance à la corrosion modérée. [5]

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.3 Rôles des éléments d'addition sur les propriétés des aciers inoxydables

Les éléments d'addition ont des caractères importants qui influent sur les propriétés des aciers inoxydables dont certains éléments ont des effets plus importants que d'autres. Les éléments d'alliages se répartissent en deux catégories : ceux qui favorisent le maintien du fer (α) et ceux qui stabilisent le fer (γ).

a. Les éléments alphagènes :

- **Le chrome** : un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 10,5 % en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone. C'est le chrome qui donne aux aciers inoxydables leur résistance à la corrosion.
- **Le silicium** : joue également un rôle dans la résistance à l'oxydation et améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage. [6]
- **Le molybdène** : améliore la qualité du film passif, en particulier en milieux chlorurés et acides. Le molybdène augmente la résistance au fluage des aciers au chrome. Il diminue la fragilité au revenu. Il améliore sensiblement la résistance à la corrosion intergranulaire et par piqûre. [7]
- **Le vanadium** : avec la présence de Nickel, il améliore la résistance mécanique.
- **Le titane** : élément formateur de ferrite (α). Il se combine dans les aciers ferritiques et austénitiques avec le carbone pour former le carbure de titane. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud.

b. Éléments gammagènes :

- **Le carbone** : La teneur en carbone est limitée à un maximum de 1,2 %. Il contribue à stabiliser l'austénite pour augmenter les propriétés mécaniques de l'acier lors de déformations à froid. Par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome $Cr_{23}C_6$ intergranulaires qui diminuent la résistance à la corrosion intergranulaire. [8]
- **Le nickel** : favorise la formation de structures homogènes de type austénitique. Il améliore la résistance à la corrosion, il affine le grain et améliore la ductilité [8]

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Le manganèse** : bien que classé comme élément gammagène, devient alphasène aux teneurs supérieures à 7 %, renforçant ainsi la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage).
- **L'azote** : stabilisateur d'austénite, l'azote permet d'atteindre des limites d'élasticité élevées sans diminuer la résistance à la corrosion intergranulaire, augmente aussi la résistance à la traction et diminue la ductilité des aciers inoxydables austénitiques. [9]
- **Le soufre** : À des teneurs de l'ordre 0,2%, il améliore considérablement l'usinabilité (tournage, fraisage, perçage, etc.) mais cela se fait au détriment de la résistance à la corrosion par piqûres.
- **Le cuivre** : Il est additionné aux aciers austénitiques dans des cas particuliers pour améliorer la résistance à la corrosion et pour accroître l'aptitude à la frappe à froid. Le cuivre aide aussi à la lutte contre la corrosion bactérienne.

I.1.4 Les aciers TRIP

Les aciers TRIP (Plasticité Induite par la Transformation) sont tout à fait appropriés à la réalisation de pièces de renfort puisqu'ils se caractérisent par une grande capacité d'absorption d'énergie. La désignation des aciers TRIP est régie par leur résistance à la rupture qui reste dans une gamme allant d'environ 600 à 1000 MPa. La limite d'élasticité d'un acier TRIP est de l'ordre de 500 MPa avec un taux d'allongement à rupture supérieur d'environ 10 %.

La particularité des aciers TRIP réside principalement dans le fait qu'ils contiennent de l'austénite résiduelle à température ambiante. Il est nécessaire que cette quantité soit suffisante pour avoir un impact sur les propriétés finales de l'acier. Cependant, il est avant tout nécessaire que les propriétés de cette austénite résiduelle soient adaptées à la fonction requise. Aussi, dans le cas des aciers TRIP, celle-ci doit présenter une stabilité suffisante afin que la transformation en martensite ne se fasse que pour une sollicitation mécanique non négligeable. Pour ce faire, le taux de C contenu dans l'austénite résiduelle finale doit être suffisamment élevé

I.1.4.1 Définition :

L'acier TRIP est un type d'acier à plasticité induite par Transformation, a été découvert et nommé pour la première fois par VF Zackay, qui a utilisé la transformation martensitique induite par la déformation et la plasticité induite par la phase de l'austénite résiduelle pour

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

améliorer la plasticité et la résistance des tôles d'acier et améliorer la formabilité des plaques d'acier. [10]

1.1.4.2 Historique :

En 1722, Le brillant scientifique français René Réaumur classait Le durcissement de trempe des alliages à base de fer a été classé parmi « le plus beau phénomène de la nature » Cette affirmation s'appuie sur le fait que ces alliages et l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques ont accompagné le développement de la société humaine.

A la fin de 19^{ème} siècle, Le professeur Henry Marion Howe a fait un grand pas en avant dans la compréhension des mécanismes de transformation de phase dans les alliages Fe-C. pour la première fois il a présenté la martensite comme un produit de transformation de l'austénite. Et C'est lui qui a introduit l'utilisation du nom des phases que l'on connaît aujourd'hui, notamment pour la martensite et l'austénite.

En 1937, Wassermann note que des grands allongements peuvent être obtenus grâce à la transformation de phase dans l'alliage Fe-Ni.

En 1967, Zackay montre que la transformation de phase permet d'augmenter la ductilité et la résistance mécanique des aciers inoxydables. Il appelle ce phénomène plasticité de transformation et introduit l'abréviation TRIP, pour transformation induced plasticity.

Dans les années 70, la plupart des études consacrées à l'effet TRIP utilisent comme matériau les aciers inoxydables. Plus tard, dans les années 80, il a été suggéré d'utiliser l'effet TRIP pour améliorer les propriétés mécaniques des aciers faiblement alliés. Un traitement thermique de l'ajout d'éléments d'additions sont alors nécessaires afin d'empêcher la précipitation de carbures et de stabiliser suffisamment l'austénite.

De nos jours, le terme TRIP désigne plutôt les aciers faiblement alliés qui contiennent de l'austénite résiduelle. [11]

1.1.4.3 Le diagramme fer-carbone

Le diagramme fer-carbone est un outil essentiel en métallurgie pour comprendre le comportement des alliages fer-carbone, tels que les aciers et les fontes. Ce diagramme illustre les transformations de phases qui se produisent dans ces alliages en fonction de la température et de la teneur en carbone.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Les aciers à effet TRIP, font partie de la classe des aciers hypoeutectoïdes ou faiblement allié, leur pourcentage de carbone étant inférieur à 0,77%. Le diagramme fer-carbone simplifié ci-dessous montre le domaine d'existence des aciers à effet TRIP.[12]

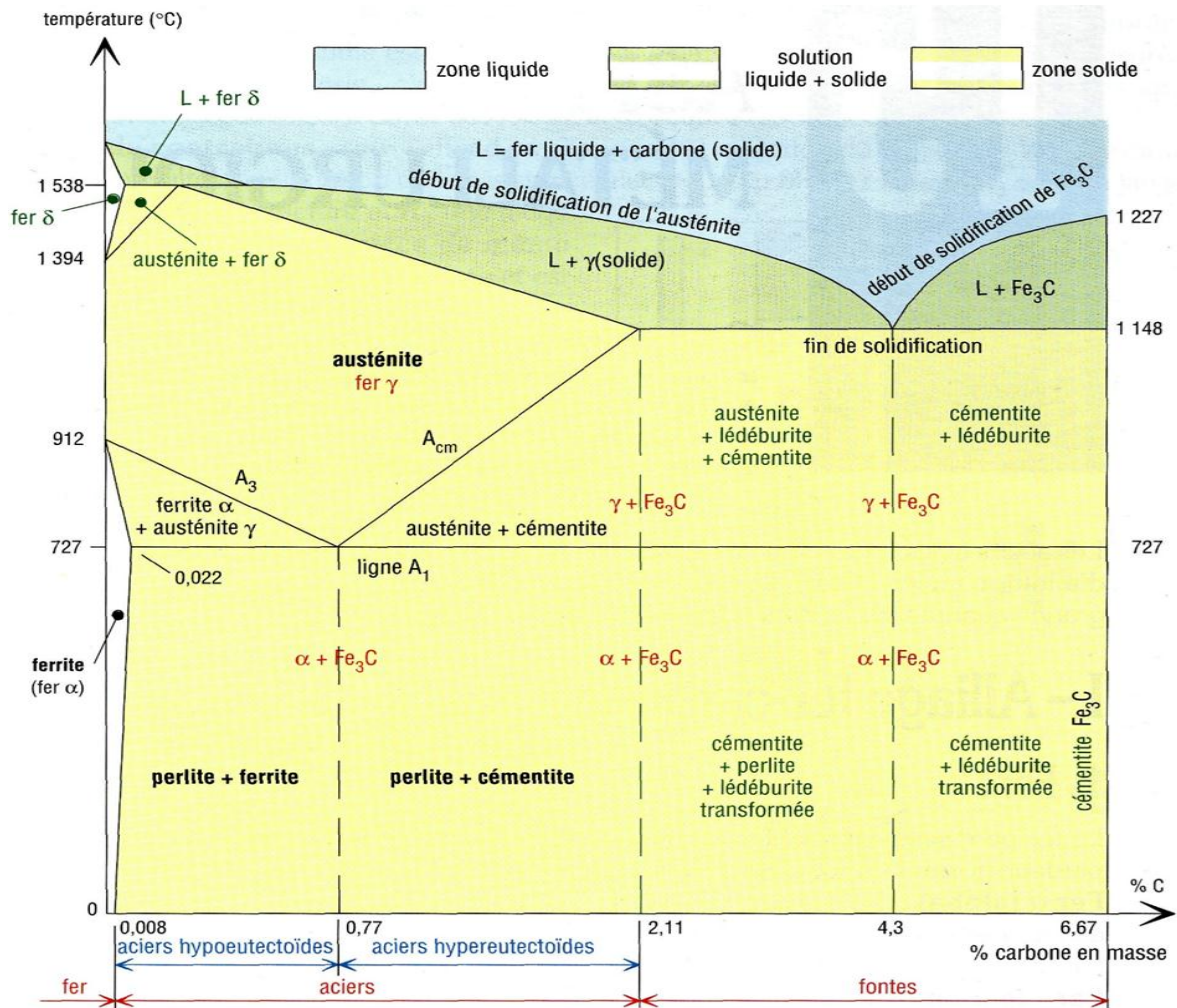


Figure I-5: Diagramme fer-carbone

I.1.4.4 Caractéristiques des aciers TRIP :

L'une des principales caractéristiques des aciers à effet TRIP est leur grande capacité d'érouissage, laquelle résulte de la compétition de deux mécanismes. Le premier correspond à la dureté produite par la transformation martensitique et ses caractéristiques morphologiques et constitue une autre source de stockage des dislocations. Le second caractérise les obstacles créés par les différentes variantes ou domaines de martensite, lesquels peuvent jouer un rôle significatif dans la réduction du libre parcours moyen des dislocations. [13]

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.4.5 L'obtention de l'acier trip

L'obtention d'un acier à effet TRIP commence par la réalisation d'une trempe ; cette trempe se déroule en 4 étapes distinctes :

- la première étape est un maintien de l'acier entre les températures inter critiques, températures entre les lesquelles l'acier a une structure austénitique et ferritique.
- la seconde étape consiste en un refroidissement rapide jusqu'à la zone d'existence de la bainite.
- on réalise alors un second maintien dans la zone bainitique. Ceci permet d'éviter l'obtention de martensite pure en grande proportion dans la structure.
- la dernière étape est un second refroidissement de l'acier, celui-ci jusqu'à la température ambiante, on obtient un acier contenant de l'austénite retenue.

Sur le graphique ci-dessus vous pouvez observer les différentes étapes de la trempe ainsi que la composition de l'acier à chaque étape.

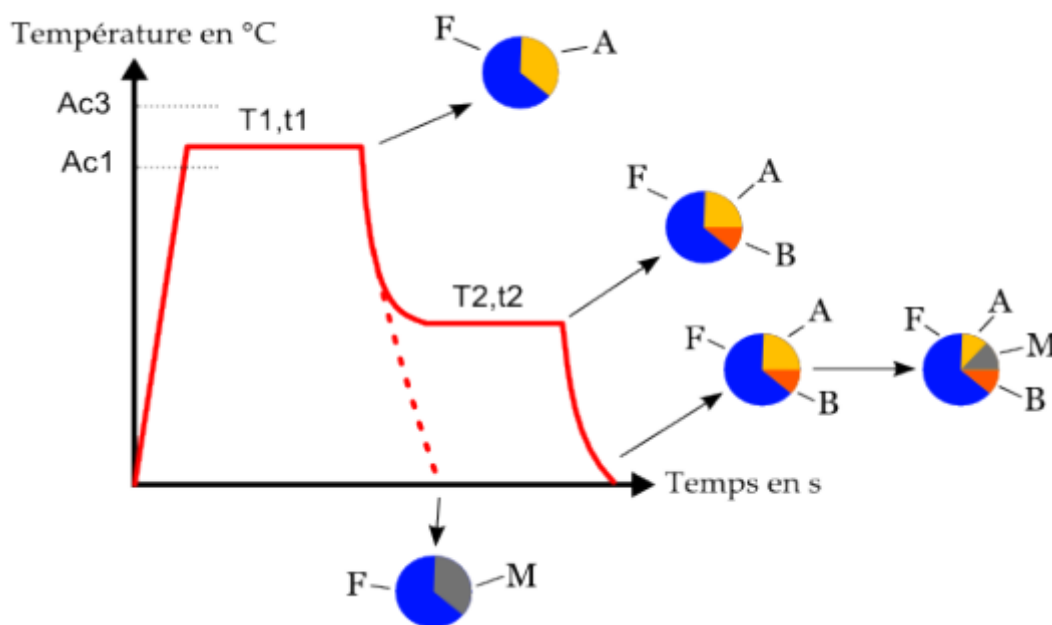


Figure I-6: schéma typique du traitement thermique aux aciers multi phases à effet TRIP (F : Ferrite, A : Austénite, B : Bainite, M : Martensite)

Suite à cette trempe, l'acier obtenu a schématiquement cette structure :

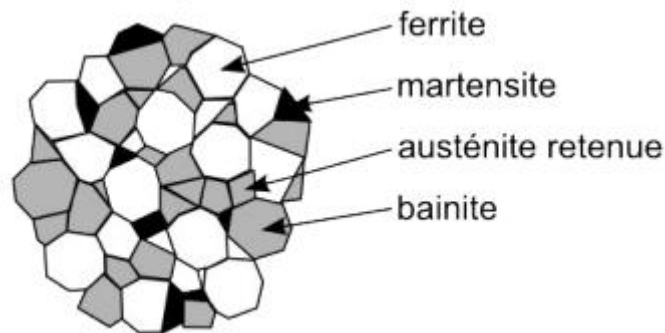


Figure I-7: la structure de l'acier obtenu après la trempe [12]

1.1.4.6 Les types d'aciers à effet TRIP

Les aciers à effet TRIP présentent un comportement mécanique particulier. Ils ont à la fois une résistance élevée et une haute ductilité. Ce qui les rend particulièrement intéressants pour la mise en forme par déformation plastique.

Les aciers à effet TRIP sont classés dans deux catégories, en fonction de leur microstructure :

- les aciers à effet TRIP fortement alliés (Fe-Ni, AISI304, AISI301, ...) qui sont entièrement austénitiques,
- les aciers TRIP faiblement alliés qui sont partiellement austénitiques (multiphasés). Les industriels s'intéressent en particulier à l'effet TRIP des aciers faiblement alliés multiphasés pour leurs caractéristiques mécaniques remarquables.

- **Aciers à effet TRIP entièrement austénitiques**

Parmi les aciers austénitiques certains sont dits inoxydables en raison de leur excellente résistance à la corrosion, en particulier celle qui est due à l'oxydation par l'air et par les acides. De nombreuses nuances d'aciers inoxydables sont développées pour des applications spéciales dans l'industrie du pétrole, de l'agro-alimentaire de l'industrie chimique et dans

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

l'aéronautique. Le chrome, dont la proportion atteint au moins 10%, est l'élément d'addition essentiel de l'acier inoxydable. C'est lui qui donne à l'acier inoxydable sa résistance à la corrosion et à l'oxydation. Le deuxième élément d'alliage est le nickel, c'est un élément gammagène qui stabilise l'austénite à température ambiante. L'utilisation de ce type d'acier est limitée par leur coût de fabrication élevé

La figure I.8 représente une micrographie de l'acier AISI304 après déformation, polissage mécanique et électrolytique. La taille de grain moyenne est de 25 μ m

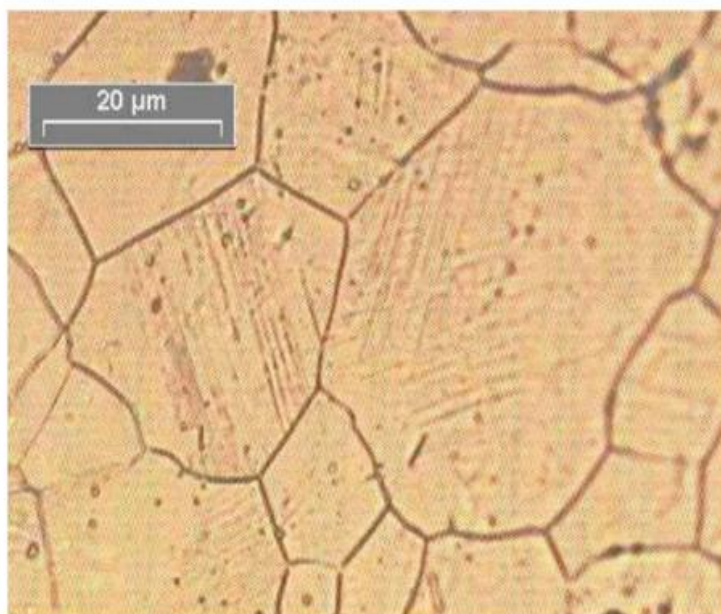


Figure I-8: Micrographie optique de l'acier AISI304. Apparition de martensite dans un grain d'austénite

Tableau I-2 : montre quelques compositions chimiques classiques d'aciers Inox austénitiques.

[14]

Désignation EN/ AISI)	(NF	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	M o	Ni	Ti	W	N b
Austénitiques														
X4CrNi 1.4301/304	18.10-	≤0.07	≤1.00	≤2.00	0.04 5	≤0.0 15	≤0.1 1	17.00			8.00			
								19.50			10.50			
X2CrNi 1.4307/304L	18.9-	≤0.03 0	≤1.00	≤2.00	0.04 5	≤0.0 15	≤0.1 1	17.50			8.00			
								19.50			10.00			
X2CrNi	19.11-	≤0.03	≤1.00	≤2.00	0.04	≤0.0	≤0.1	18.00			10.00			

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

4306/304L	0			5	15	1													
							20.00			12.00									
X4CrNi 1.4303/305	18.2- ≤0.06	≤1.00	≤2.00	0.04 5	≤0.0 15	≤0.1 1	17.00			11.00									
							19.00			13.00									
X2CrNiMo 1.4401/316	17.12.2- ≤0.07	≤1.00	≤2.00	0.04 5	≤0.0 15	≤0.1 1	16.50			10.00									
							18.50			13.00									
X2CrNiMo 1.4404/316L	17.12.2- ≤0.03 0	≤1.00	≤2.00	0.04 5	≤0.0 15	≤0.1 1	16.50		2. 00	10.00									
							18.50		2. 50	13.00									
X2CrNiMo 1.4432/316L	17.12.3- ≤0.03 0	≤1.00	≤2.00	0.04 5	≤0.0 15	≤0.1 1	16.50		2. 50	10.50									
							18.50		3. 00	13.00									
X6CrNiMoTi 17.12.2-1.4571/316 Ti	≤0.08	≤1.00	≤2.00	0.04 5	≤0.0 15		16.50		2. 00	10.50	5X C								
							18.50		2. 50	13.50	0.7								
X2CrNiMo 1.4438/317L	18.15.4- ≤0.03 0	≤1.00	≤2.00	0.04 5	≤0.0 15	≤0.1 1	17.50		3. 00	13.00									
							19.50		4. 00	16.00									
X6CrNiTi 1.4541/321	18.10- ≤0.08	≤1.00	≤2.00	0.04 5	≤0.0 15		17.00			9.00	5xc								
							19.00			12.00	0.7								
X1CrNiSi 1.4361/18.15	18.15.4- ≤0.01 5	3.70	≤2.00	0.02 5	≤0.0 10	≤0.1 1	16.50		≤ 0. 20	14.00									
		4.50					18.50			16.00									
X1NiCrMoCu 1.4539/904L	25.20- ≤0.02 0	≤0.70	≤2.00	0.03	≤0.0 10	≤0.1 5	19.00	1.2 0	4. 00	24.00									
							21.00	2.0 0	5. 00	26.00									
Z2NCDU Az-1.4537/URSB8	25.25.05 ≤0.02 0	≤0.70	≤2.00	0.03	≤0.0 10	0.17	24.00	1.2 0	4. 70	24.00									
						0.25	26.00	2.0 0	5. 70	27.00									

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Aciers TRIP multiphasés**

Ces aciers sont conçus suivant le même principe que les matériaux composites. A l'aide de la composition chimique et de traitements thermiques et mécaniques, le matériau s'enrichit localement en certains éléments d'alliage. Le matériau obtenu est alors un mélange de phases dures et de phases ductiles. Sous sollicitation mécanique, l'une de ces phases se transforme partiellement en martensite. La combinaison de l'ensemble des phases donne de meilleures caractéristiques mécaniques que dans les aciers à structure plus simple. Ces aciers faiblement alliés moins coûteux, sont utilisés pour les applications industrielles en grandes séries

Les nuances d'aciers TRIP multiphasée diffèrent par leur composition chimique et leur proportion de phase. **Le tableau I.4** donne des exemples de compositions d'aciers TRIP ayant les résistances maximales de 600MPa, 700MPa, 800MPa et 1000MPa

Tableau I-3 : Exemples de compositions d'aciers TRIP ayant les résistances maximales de 600MPa, 700MPa, 800MPa et 1000MPa.

TRIP	Taille de grain austénite (μm)	Composition (%pds)			Fraction de phase (%)				%C dans γ
		C	Mn	Si	Austénite (γ)	Ferrite (A)	Bainite (b)	Martensite (M)	
600	4	0.08	1.70	1.55	8	91	1	-	-
700	3	0.16	1.60	1.60	13	-	-	-	-
800	2-3	0.2	1.65	1.65	17	70-73	10-13	-	1.14
1000	1-2	0.4	1.65	1.65	30	-	70	-	1.35

Lors de l'élaboration, le matériau subit une succession de transformations qui lui confère différentes fractions volumiques de phases, une répartition spatiale (connexité), des dimensions caractéristiques (taille de grain, taille des lattes de bainite, etc), une texture morphologique, une texture cristallographique. Les micrographies sont présentées sur la figure I.2.

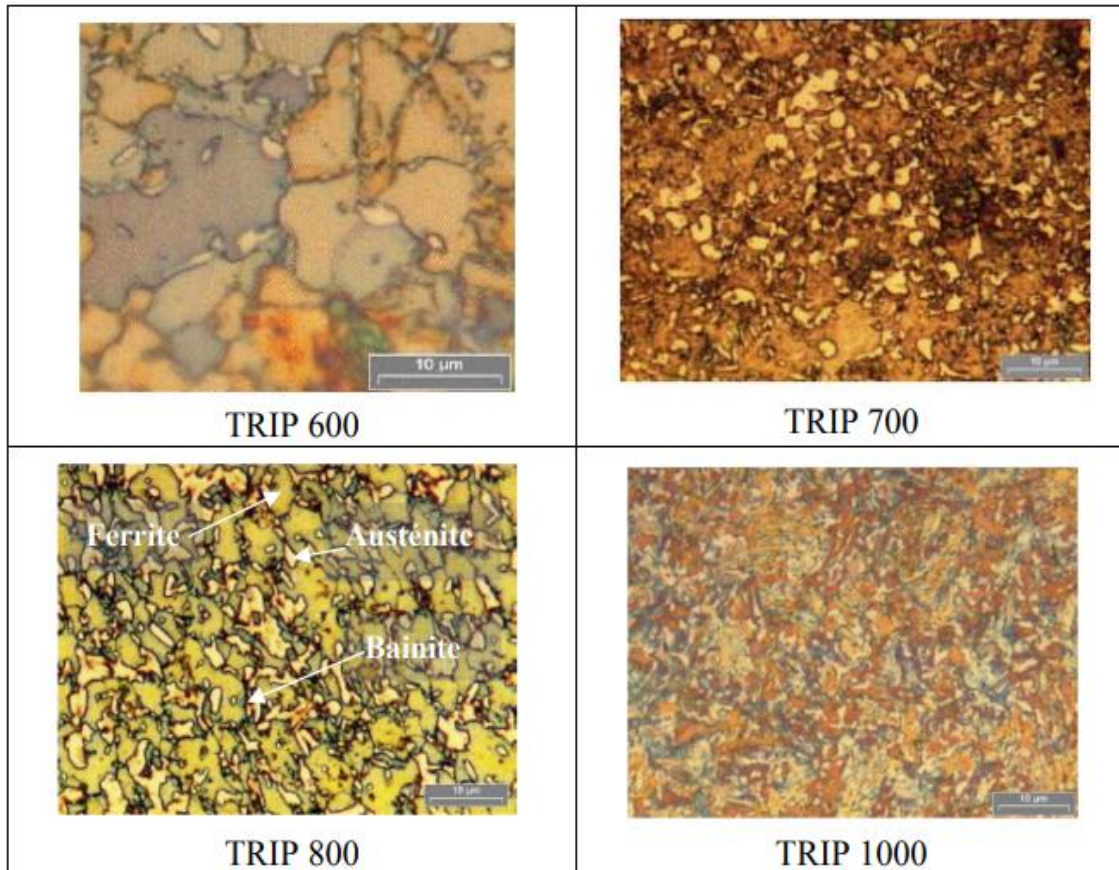


Figure I-9: Micrographies optiques des aciers TRIP multiphasés après attaque électrochimique (TRIP600-700-800-1000). [15]

I.1.5 Effet TRIP (Transformation Induced Plasticity) dans les aciers

I.1.5.1 Etude microscopique de l'effet TRIP :

Transformation Induced Plasticity, cette expression en anglais indique que la plasticité est induite par la transformation. Mitter parle de la plasticité de transformation comme « un accroissement significatif de la plasticité pendant une transformation de phase. Pour une contrainte externe appliquée dont la contrainte équivalente est inférieure à la limite d'élasticité du matériau. [16] une déformation plastique macroscopique se produit. Cette transformation est la transformation martensitique. Dans les aciers à effet TRIP, cette transformation correspond à un changement de phase particulier (austénite ---> martensite) qui se produit à l'état solide et qui est à l'origine des propriétés remarquables des matériaux dans lesquels elle se produit.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

- **La transformation martensitique :**

Le terme martensite, du nom de son inventeur le physicien allemand Adolf Martens, désigne le produit issu de la trempe de l'acier au carbone. La transformation martensitique est une transformation correspond à la transformation de l'austénite (phase mère) stable à haute température, en martensite (phase fille). C'est une transformation cristallographique displacive elle se produit sans aucun phénomène de diffusion atomique. La martensite hérite de l'ordre et des défauts de la phase mère.

La transformation se fait par le déplacement des atomes de leurs sites dans la phase mère vers des sites voisins qui définissent la configuration de la nouvelle phase. Pour que la transformation martensitique se produise, la vitesse de refroidissement doit être élevée ce qui ne permet pas aux atomes de se déplacer par diffusion. Il en résulte une déformation macroscopique sous la forme d'un cisaillement qui se compense par une déformation supplémentaire et la plastification de l'austénite. Cette transformation est caractérisée par un changement de volume et par un changement de forme laissant un plan invariant, et par une énergie de déformation élastique.

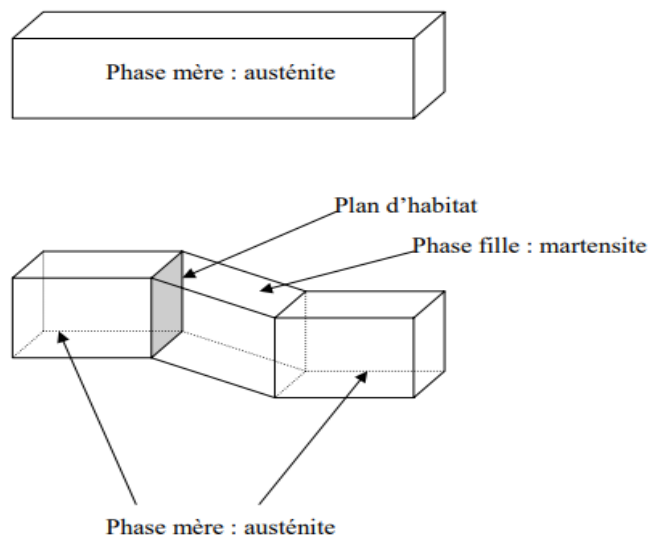


Figure I-10: Changement de forme et de volume associés à la transformation martensitique.[16]

- **Structures cristallographiques des deux phases**

L'austénite est la forme stable à haute température de l'acier, c'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer γ de structure cubique à faces centrées CFC. Les atomes de

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

carbone sont situés dans les sites interstitiels octaédriques du type $1/2, 1/2, 1/2$ (centre de la maille) et $0, 0, 1/2$ (milieu de chaque arête). Dans la martensite α' , les atomes de carbone sont situés dans les sites interstitiels octaédriques en positions $[0, 0, 1/2]$ (milieu des arêtes parallèles à l'axe c) et $[1/2, 1/2, 0]$ (base de la maille).

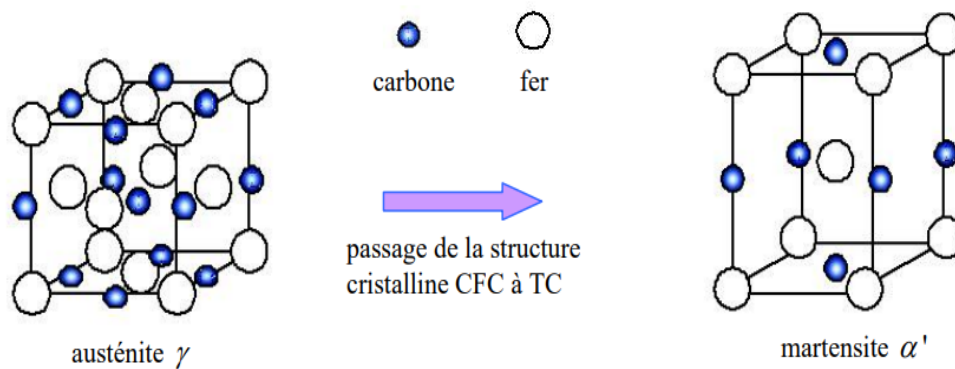


Figure I-11: Structures de l'austénite γ et de la martensite α' dans les aciers [16]

- **La Morphologie de la martensite**

La morphologie de la martensite dépend de la composition chimique, des contraintes et déformations locales et de l'énergie de faute d'empilement. Elle peut être lenticulaire, sous forme de lattes, de papillons, de plaquettes, d'aiguilles plates.

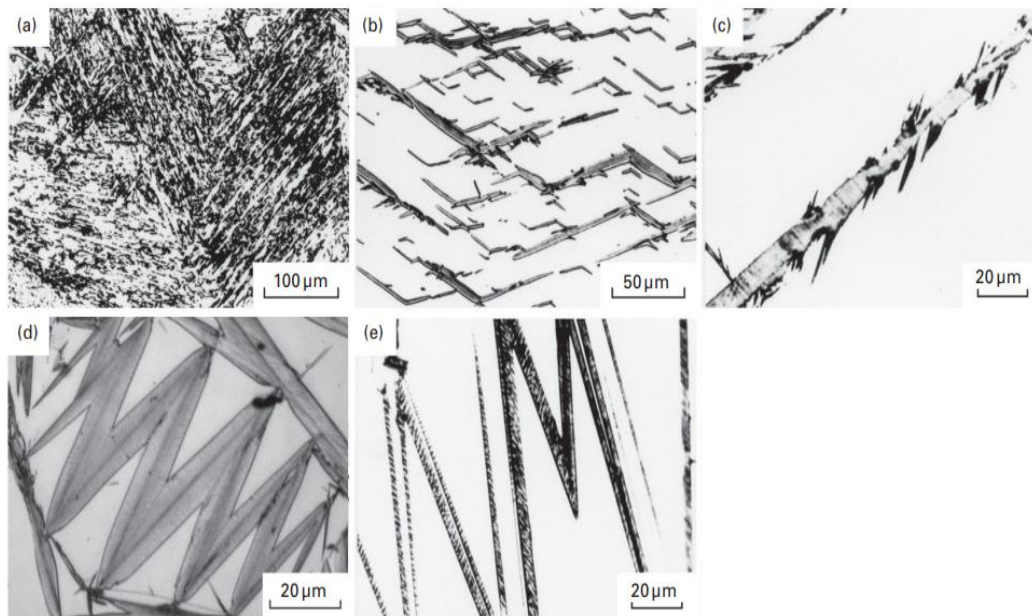


Figure I-12: Variantes de martensite : (a) : la martensite en latte, (b) : la martensite en papillon, (c) : la martensite en plaquette, (d) : la martensite lenticulaire, (e) : la martensite en aiguilles plates. [17]

I.1.5.2 Etude macroscopique de l'effet TRIP dans les aciers

Dans la littérature, la plupart des modèles de la plasticité de transformation sont basés sur deux mécanismes appelés respectivement effet Magee et effet Greenwood Johnson.

a. Mécanisme de Greenwood-Johnson

D'après Greenwood-Johnson (1965), la plasticité de transformation est due à l'accommodation plastique de la phase-mère lors des changements de phase. La phase mère est austénitique de structure cubique à faces centrées, contrairement à la phase finale qui est ferritique de structures cubiques centrées, la différence de compacité entre ces deux structures induit un changement de volume lors de la transformation. Dès qu'une contrainte est appliquée dans une direction donnée, les micro-plasticités sont concentrées dans la direction de la sollicitation, ce qui provoque l'effet TRIP. Généralement, les micro-plasticités sont isotropes, on remarque un changement de volume d'un point de vue macroscopique.

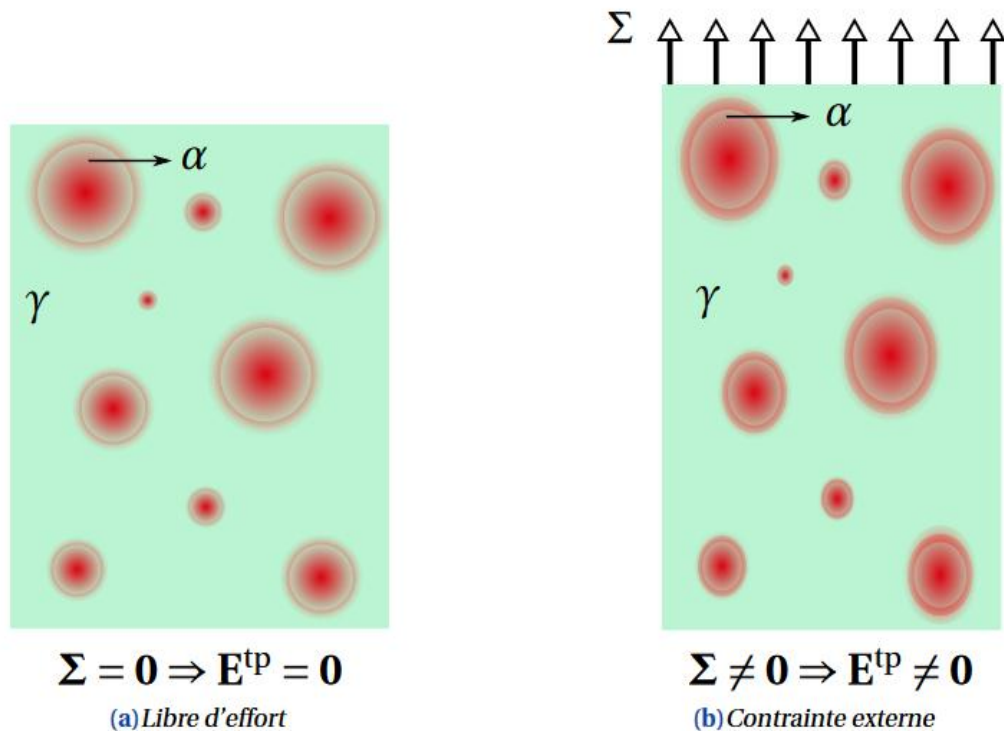


Figure I-13: Mécanisme de Greenwood et Johnson (1965) [18]

b. Mécanisme de Magee

Selon Magee (1966), la plasticité de transformation est due à une orientation de phases, nouvellement formées, sous l'effet d'une contrainte appliquée (transformation de l'austénite en martensite). Durant cette transformation, la martensite se développe sous la forme de plaquette générant des contraintes de cisaillement élevées dans la phase austénitique. En absence de contrainte appliquée les plaquettes s'orientent aléatoirement. Par contre, l'application d'une contrainte externe favorise l'orientation des plaquettes suivant une même direction, la résultante des contraintes de cisaillement ne sera donc pas nulle, ce qui va engendrer une déformation plastique macroscopique irréversible dans la direction de la contrainte appliquée.

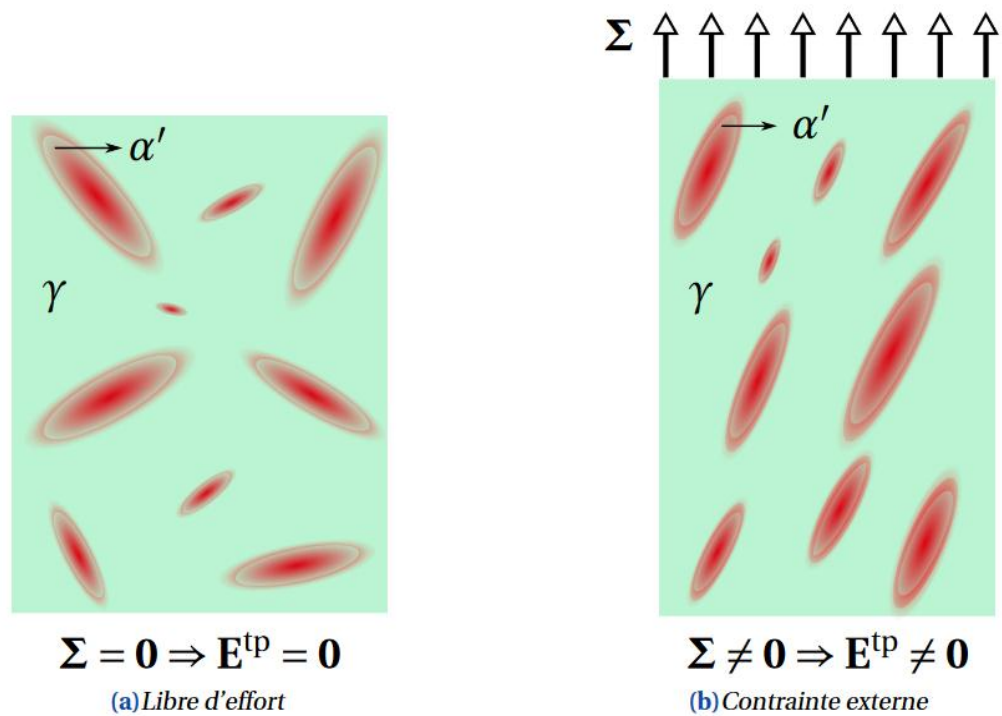


Figure I-14: Mécanisme de Magee [18]

I.1.6 L'application de l'acier TRIP

L'acier TRIP est largement utilisé dans l'industrie automobile pour réduire le poids des véhicules, réduire la consommation de carburant et réduire la pollution de l'environnement. L'acier TRIP est une bonne solution à la tendance du renforcement élevé dans les panneaux automobiles. Dans le même temps, l'acier TRIP possède également de fortes capacités d'absorption d'énergie et peut résister à la déformation plastique lors d'un impact, améliorant considérablement le niveau de sécurité des voitures.

De plus, l'acier TRIP peut également être utilisé dans les boulons de mines de charbon, le génie civil, les pipelines et les navires cryogéniques.

I.2 Traitement Thermique des aciers

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

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

I.2.1 Définition

Sous le terme de traitement thermique on entend la modification de la structure, et donc des propriétés d'un alliage, obtenue par chauffage jusqu'à une température définie et par maintien à cette température suivi d'un refroidissement à vitesse imposée.[19]

I.2.2 Cycle d'un traitement thermique

Les opérations de traitement thermique comportent un cycle composé de :

- Chauffage jusqu'à une température qui dépend de types de traitement voulu.
- Maintient à une température définie.
- Refroidissement dans un milieu préalablement défini.
 - Très rapide (dans l'eau).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - lente (dans le four, à l'air).

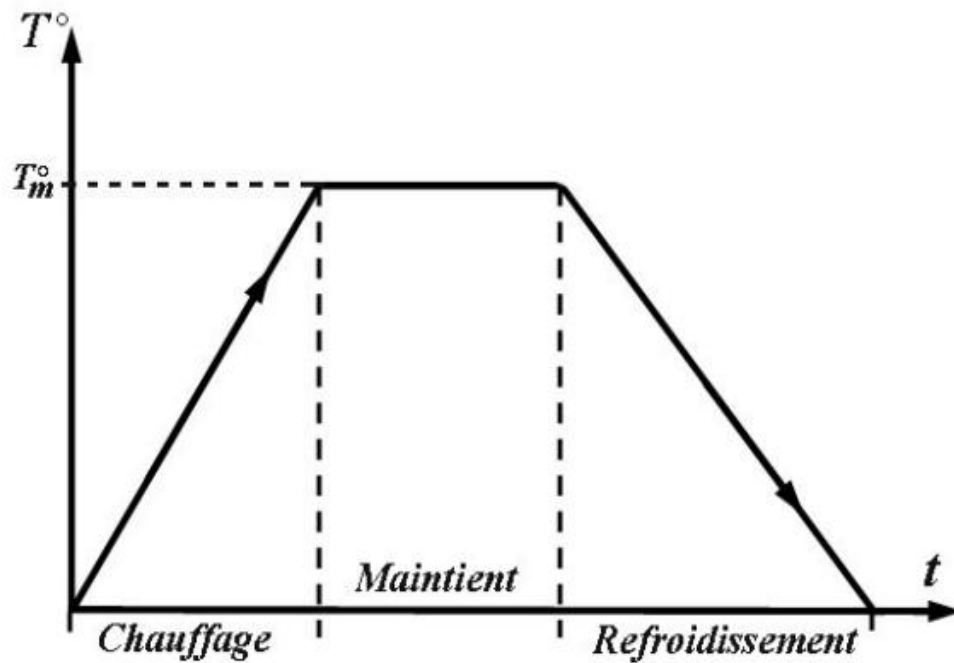


Figure I-15 : Cycle de traitement thermique.[20]

I.2.3 Buts et rôle des traitements thermiques :

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

- De conférer aux aciers des propriétés mécanique et physique spécifique qui les rendent plus convenables, soit pour sa mise en forme, soit pour son utilisation.
- Augmenter la résistance mécanique des aciers.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- Affiner les grains et homogénéiser la structure.
- Facilité de mise en forme.

I.2.4 Types de traitements thermiques

Il existe plusieurs types de traitements thermiques (recuit, normalisation, trempe, revenu) qui modifient d'une manière variée la structure et les propriétés de l'acier.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.2.4.1 La trempe

La trempe des aciers comporte un chauffage jusqu'au-delà de la température d'austénitisation, un maintien à cette température pendant un temps déterminé et un refroidissement à une vitesse déterminée.

La trempe s'effectue après une mise en solution de certains composés : Il s'agit de maintenir le matériau à tremper à une température suffisante et suffisamment longtemps. On plonge ensuite la pièce dans un liquide (bain d'huile, eau, plomb fondu, etc) ou on le refroidit avec un gaz (azote, air, etc)

a. Choix de la température de trempe

La température de trempe est fonction de la composition chimique de l'acier et, en premier lieu, de sa teneur en carbone.

Les aciers hypoeutectoïdes doivent être chauffés de 30 ou 50 °C au-dessus de Ac3.

Les aciers hypereutectoïdes sont portés à $Ac1 + 50$ à 70 °C.

b. Les types de trempe

On distingue différents types de trempe, soit la trempe martensitique, la trempe bainitique, la trempe austénitique (aussi appelée hypertrempe).

- **Trempe martensitique**

La trempe martensitique consiste à amener rapidement le métal à une température inférieure à la valeur critique M_s , généralement inférieure ou égale à 20 °C. Le refroidissement rapide de l'austénite provoque un blocage des atomes de carbone insérés dans le réseau gamma. Ce réseau devient quadratique centré instantanément. Cette nouvelle structure (solution solide d'insertion) se nomme martensite. Afin de pouvoir obtenir une structure martensitique, il faut que la vitesse de refroidissement soit supérieure à la vitesse critique de trempe martensitique. Il est évident que cette condition n'est pas réalisée en tous les points d'une pièce. En effet, la loi de refroidissement en un point d'une pièce dépend de la conductivité thermique du métal, de la forme et des dimensions de la pièce, ainsi que du pouvoir de refroidissement du fluide de trempe qui, lui, dépend de l'agitation du fluide.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Trempe bainitique**

Pour obtenir la bainite par trempe, l'acier austénitisé est refroidi à une température choisie, à vitesse suffisante pour éviter la transformation en ferrite ou perlite. On maintient à cette température (240°C à 450 °C) pour obtenir une transformation totale et l'on refroidit ensuite à la température ambiante. La température choisie pour la trempe bainitique dépend de la microstructure désirée (et la dureté recherchée) et de la vitesse de transformation de l'acier. Les propriétés de la bainite confèrent certaines qualités aux aciers, malgré les inconvénients signalés, en particulier, une meilleure ductilité (pour les fortes teneurs en carbone) que pour la trempe martensitique, et de meilleures propriétés de fluage, (aux températures de 400 °C à 500 °C) que la martensite revenue. Dans les deux cas, les structures obtenues (martensite ou bainite) présentent une dureté élevée.

- **Trempe austénitique (ou hypertrempe)**

Les aciers austénitiques dont la structure ne change pas, aussi bien par chauffage que par refroidissement, ne « prennent » pas la trempe. Le procédé d'hypertrempe permet d'adoucir ces aciers et consiste à chauffer les pièces vers 1 100 °C. Le refroidissement doit être rapide pour éviter la précipitation des carbures vers 600 °C à 800 °C. Il est généralement effectué à l'eau. L'huile est utilisée comme fluide de trempe pour les aciers à forte teneur en nickel. Cette technique est appliquée plus particulièrement au traitement des aciers inoxydables et des aciers ferromanganèse, pour permettre d'effectuer un usinage ultérieur ou maintenir, voire remettre en solution dans l'austénite, les carbures dont la précipitation dans les espaces inter-grains favoriserait la corrosion cristalline.

1.2.4.2 Le revenu

Le revenu est un traitement thermique pratique, généralement après trempe, et qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe d'un acier (contraintes internes et fragilités). Le chauffage de l'acier trempé est effectué à une température inférieure à AC1, (selon la résistance exigée), suivi d'un maintien à cette température et au refroidissement jusqu'à la température ambiante.

La vitesse de refroidissement après revenu a une influence très faible sur l'état des contraintes résiduelles. Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles.

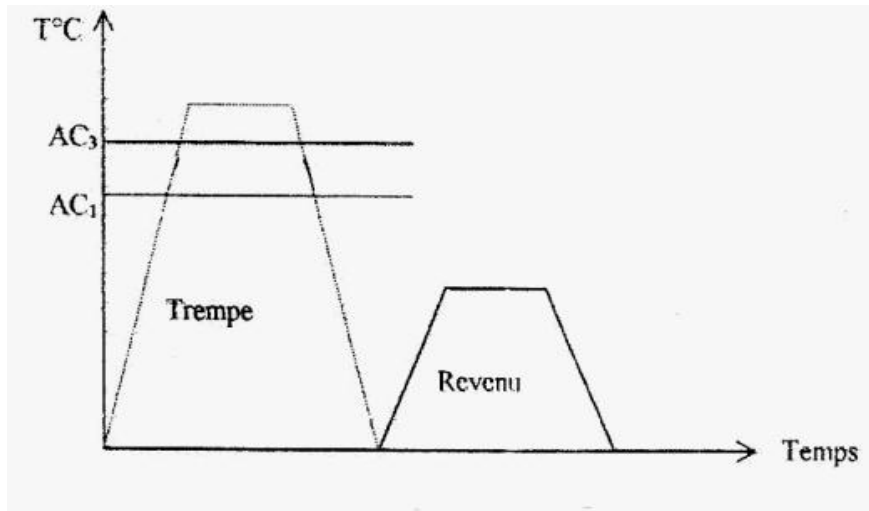


Figure I-16 : . Cycle thermique complet d'une trempe et revenu. [21]

a. Différents types de revenu :

Il existe trois modalités de revenus

- **Revenu à basse température :**

Le revenu à basse température s'effectue avec un chauffage vers 250°C et permet de diminuer les contraintes internes. Il transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Ce revenu augmente la résistance et améliore la ductilité sans altérer sensiblement la dureté (58 à 63 HRC), d'où une bonne tenue à l'usure. Il s'applique aux outils de coupe et aux instruments de mesure en aciers au carbone et faiblement alliés. La durée de ce revenu varie de 1 à 3 heures.[21]

- **Le revenu à température intermédiaire**

Le revenu à température intermédiaire se fait entre 350 et 500 °C et s'emploie pour des ressorts de types variés. Il permet d'obtenir une limite d'élasticité maximale et élève quelque peu la ductilité. La structure assurée par ce traitement est la troostite de revenu dont la dureté varie de 40 à 50 HRC. La température de revenu doit être choisie de façon qu'elle ne provoque pas de fragilité de revenu irréversible. [19]

- **Revenu à haute température**

Le revenu à haute température se fait entre 500 et 680°C, il donne à l'acier la structure sorbite de revenu. Ce type de revenu crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

l'acier. La trempe suivie de revenu à haute température (ce traitement double est appelé amélioration) améliore, par rapport à l'état normalisé, ou recuit, les limites de rupture et d'élasticité, la striction et surtout la résilience. L'amélioration est appliquée surtout aux aciers de construction à moyen carbone (0,3 à 0,5%).

1.2.4.3 Le recuit

Le recuit, en général, consiste à chauffer l'acier jusqu'à une température déterminée, à le maintenir à cette température et, enfin, à le refroidir à faible vitesse. La température à laquelle l'acier est chauffé et le temps de maintien sont déterminés par divers facteurs tels que la composition chimique de l'acier, la taille et la forme de l'élément en acier et les propriétés finales souhaitées. Le recuit peut être soit le traitement final, soit une étape préparatoire à un traitement ultérieur.

Le recuit a pour but de :

- diminuer la dureté d'un acier trempé.
- obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- homogénéiser les textures hétérogènes.
- réduire les contraintes internes.

Le cycle thermique d'un recuit comprend :

- Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de recuit à réaliser.
- Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- Un refroidissement très lent généralement à l'air calme. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

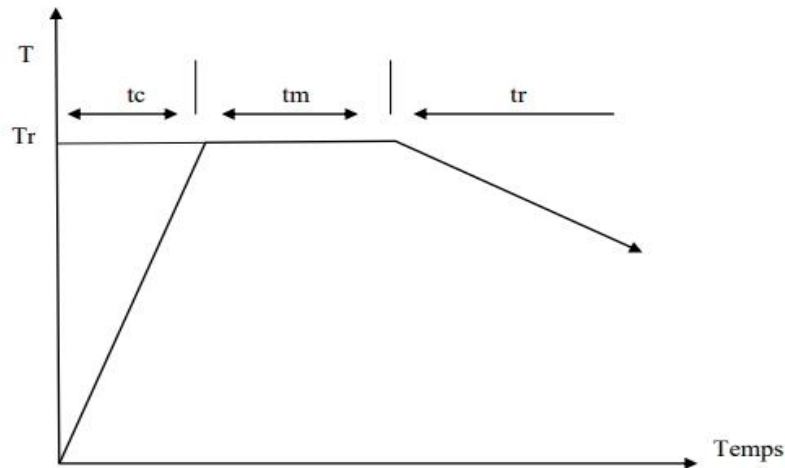


Figure I-17 : : Cycle thermique du recuit [22]

T_r = température de recuit.

t_c = temps de chauffage.

t_m = temps de maintien.

t_r = temps de refroidissement[22]

a. Les types de recuit :

. Les différents objectifs de ce traitement sont les suivants : (i) soulager les contraintes internes développées lors de la consolidation, de l'usinage, du forgeage, du laminage ou du soudage ; (ii) améliorer ou restaurer la ductilité et la dureté ; (iii) améliorer l'usinabilité ; (iv) éliminer la non-uniformité chimique ; (v) affiner la taille du grain ; et (vi) réduire la teneur en gaz de l'acier.

• Recuit complet

Il consiste à chauffer l'acier jusqu'à la région austénitique, puis à le refroidir lentement. L'acier est chauffé à environ 30-50°C au-dessus de la température critique supérieure (AC_3) pour les aciers hypoeutectoïdes. L'acier est maintenu à cette température pendant une durée déterminée, suivie d'un refroidissement à des taux très bas, comme le refroidissement dans le four lui-même ou dans une enceinte fabriquée à partir d'un matériau isolant thermique. Comme il est possible d'obtenir une structure complètement austénitique en chauffant l'acier eutectoïde à une température supérieure à la température critique inférieure (A_1), l'acier eutectoïde est chauffé à une température supérieure de 30 à 50°C à la température critique inférieure pour subir un traitement de recuit complet. [23]

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Recuit isotherme**

Dans ce procédé, l'acier est chauffé au-dessus de la température critique supérieure (A_3) et maintenu pendant un certain temps à cette température, afin d'obtenir une structure entièrement austénitique et d'éliminer tout gradient de température dans le composant en acier. Le refroidissement rapide peut être obtenu en transférant rapidement l'acier dans un autre four maintenu à la température souhaitée. L'acier est maintenu à cette température jusqu'à ce que toute l'austénite soit transformée en perlite. Une fois que toute l'austénite est transformée en perlite lamellaire, l'acier est poli à l'air libre. Le principal avantage de ce procédé par rapport au recuit complet est que la durée du cycle de traitement est considérablement réduite. Le cycle de traitement étant plus court, le procédé est moins coûteux que le recuit complet. Le recuit isotherme peut donc être considéré comme un procédé de recuit complet modifié. Ce procédé n'améliore pas seulement l'usinabilité en général, mais il permet également d'obtenir une surface plus fine lors de l'usinage. Ce procédé est très utile pour les aciers longs car ces derniers doivent être refroidis lentement.[23]

- **Recuit de diffusion**

Ce procédé, également connu sous le nom de recuit d'homogénéisation, est utilisé pour éliminer les défauts d'uniformité structurelle. Les dendrites, les colonnes de grains et les homogénéités chimiques sont généralement observées dans le cas des lingots, de la coulée d'acier au carbone plat lourd et de la coulée d'acier à haute teneur en alliages. Dans le traitement de recuit par diffusion, l'acier est chauffé suffisamment au-dessus de la température critique supérieure (par exemple, 1000-1200°C) et maintenu à cette température pendant des périodes prolongées, généralement de 10 à 20 heures, suivies d'un refroidissement lent.

- **Recuit partiel**

Le recuit partiel est également appelé recuit intercritique ou recuit incomplet. Dans ce processus, l'acier est chauffé entre la température critique inférieure (A_1) et la température critique supérieure (A_3 ou A_{cm}). Il est suivi d'un refroidissement lent. Comme ce processus implique des températures basses, il est moins coûteux que le recuit complet qui implique des températures élevées.[23]

- **Recuit de recristallisation**

Le processus consiste à chauffer l'acier au-dessus de sa température de cristallisation, à le maintenir à cette température et à le refroidir par la suite. Il en résulte une diminution de la

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

dureté, de la résistance et de la ductilité. L'extension souhaitée de la réduction de la section transversale est possible grâce à l'option de cycle(s) de recuit-recristallisation.

- **Recuit du processus**

Au cours de ce traitement, l'acier est chauffé à une température inférieure à la température critique inférieure, maintenu à cette température pendant un certain temps, puis refroidi. Le but de ce traitement est de réduire la dureté et d'augmenter la ductilité des aciers laminés à froid afin que le travail ultérieur puisse être effectué facilement. Il s'agit d'une opération intermédiaire et on parle parfois de recuit en cours de fabrication. Le procédé est moins coûteux que le recuit de cristallisation. Les pièces fabriquées par pliage, comme l'estampage, l'extrusion, le refoulement et l'emboutissage, reçoivent fréquemment ce traitement comme étape intermédiaire.

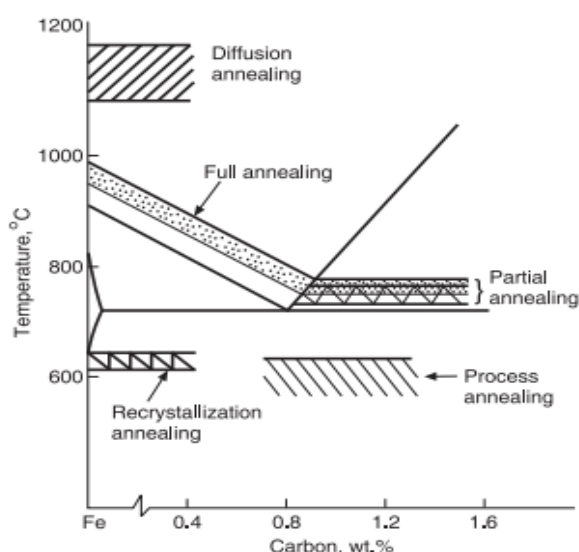


Figure I-18 : Gammes de températures pour différents types de recuit. [23] [Diffusion annealing = Recuit de diffusion, Full= Recuit complet, Partial= Recuit partiel, Re-crystallization= Recuit de recristallisation, Process= Recuit de processus.]

1.2.4.4 La normalisation

La normalisation consiste en un chauffage de l'acier hypoeutectoïde jusqu'à la température supérieure à A_{c3} , et de l'acier hypereutectoïde jusqu'à la température dépassant A_{cm} de 50 à 60 °C. C'est à dire un chauffage jusqu'au domaine austénitique, Un maintien (assez court) à cette température jusqu'à son échauffement complet et Un refroidissement à l'air libre. La normalisation provoque la recristallisation de l'acier et affine donc la structure à gros grains obtenue par coulée ou laminage (forgeage, estampage).

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Un refroidissement accéléré à l'air conduit à la décomposition de l'austénite aux températures plus basses et augmente ainsi la dispersion du mélange ferrite-cémentite et la quantité de perlite. Ceci augmente de 10 à 15 % la résistance et la dureté de l'acier normalisé à haut et moyen carbone par rapport à l'acier recuit. Le but de la normalisation varie en fonction de la composition de l'acier.

Pour les aciers à bas carbone, la normalisation étant une opération bien plus simple, elle s'emploie au lieu du recuit en augmentant quelque peu la dureté. La normalisation assure en coupe un meilleur état de surface.

Pour un acier à teneur moyenne en carbone, la normalisation remplace la trempe et le revenu à haute température. Les propriétés mécaniques obtenues sont plus faibles, mais l'opération produit une déformation bien moindre que celle due à la trempe.

Pour un acier riche en carbone (hypereutectoïde), la normalisation s'emploie, pour supprimer le réseau de cémentite qui peut apparaître lors d'un refroidissement lent dans l'intervalle de température entre A_{Cm} , et A_1 .

Tableau I-4 : Dureté des aciers au carbone à l'état Recuit et Normalisé [24]

Acier	Dureté HB	
	Recuit	Normalisation
Fer techniquement pur	80 à 100	90 à 100
Acier à bas carbone	125	140
Acier à carbone moyen	160	190
Acier à haut carbone	185	230

I.2.5 Défauts des traitements thermiques de l'acier

Les traitements thermiques jouent un rôle essentiel dans la fabrication et l'utilisation des aciers, cependant des erreurs ou des conditions inadéquats lors de ces traitements peuvent engendrer des défauts dans les aciers comme

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

- un chauffage excessif de l'acier peut entraîner une croissance excessive des grains de la microstructure, réduisant ainsi la dureté, la résistance et la ténacité du matériau

- un chauffage insuffisant de l'acier peut empêcher la transformation complète des phases ce qui affecte négativement les propriétés mécaniques.

Un refroidissement trop lent après le chauffage peut favoriser la formation de phases indésirable, telles que la ferrite ou la perlite, réduisant la dureté de l'acier.

-fissuration : des contraintes résiduelles excessives, un refroidissement trop rapide peut entraîner des fissures dans l'acier, réduisant sa résistance et sa ductilité.

I.3 Conclusion

Ce chapitre bibliographique nous a permis de connaître un peu mieux les aciers inoxydables, leurs différentes familles et une nouvelle catégorie d'acier qui est les aciers à effets TRIP et les mécanismes responsable de l'effet trip.

Pour finir nous avons eu un petit résumé sur les traitements thermiques et ses différents types ainsi que le but et les défauts des traitement thermiques.

II. CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE

CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE

II.1 Introduction :

Une procédure expérimentale a été entreprise pour déterminer les effets des différents traitements thermiques en solution sur la microstructure, les propriétés mécaniques (limite élastique, limite à la traction, allongement et dureté ainsi que le module de Young).

Pour évaluer l'effet des traitements thermiques sur le comportement mécanique en général, des essais ont été menés, ces essais consistés à faire des essais de dureté et de traction uni axiale sur des éprouvettes normalisées traitées thermiquement afin de déterminer leurs propriétés mécaniques.

II.2 Matériau étudié :

Le matériau étudié est un acier inoxydable à effet trip, entièrement austénitique. Sa dénomination est AISI 304L. Le (L) signifie que l'acier a une faible teneur en carbone. Il est largement utilisé pour toutes les applications industrielles nécessitant plus de résistance à l'usure. Le matériau a été reçu sous la forme des plaques laminées à froid d'une épaisseur de 1.5 mm, à partir desquelles des éprouvettes de traction ont été découpées.

II.3 Composition chimique et propriété mécanique :

II.3.1 Composition chimique :

Composition chimique de la nuance, est donnée dans le tableau 1.

Tableau II-1: composition chimique de l'acier 304L

Composant	C	Cr	Mn	n	Ni	p	s	si
Proportion (%)	0.028	17.665	1.657	0.082	8.035	0.032	0.0046	0.0385

II.3.2 Propriété mécanique :

Propriété mécanique de la nuance, est donnée dans le tableau 2.

Tableau II-2: propriété mécanique 304L [25]

Dureté	Allongement à la rupture %	Module de Young [Gpa]	Résistance à la traction [mpa]	Résistance aux choc [J.m]
160-190	70	180-220	320	20-136

CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE

II.3.3 Préparations des éprouvettes :

Les éprouvettes ont été découpé a partir d'une tôle de 50/50 cm d'une épaisseur de 1.5 mm en acier 304L, a l'aide d'une découpeuse à jet d'eau avec une vitesse de 454 mm/min, découpé suivant le sens de laminage.

Les dimensions des éprouvettes doivent être compatible avec les spécifications de la machine d'essai. On a coupé 27 éprouvettes Alter pour des essais de traction uni axiale, ainsi qu'un échantillon témoin de 10 mm sur 10 mm pour chaque cas étudié.

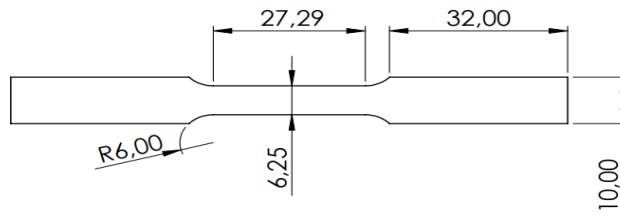


Figure II-1: Éprouvette de traction ASTM A 370.

II.4 Traitement thermique :

Dans la première partie, les échantillons ont subi des traitements thermiques à différents paramètres (température, temps de maintien et mode de refroidissement) afin de déterminer l'effet de ces paramètres sur le comportement mécanique de l'acier étudié.

Un four électrique de type **NABERTHERM** a été utilisé pour le chauffage, **figure II.2**. Il s'agit d'une chambre isolée de 700 x 500 x 250 mm, dont la température est régulée une résistance, avec une capacité de chauffage maximale de 1300 °C. Au fond de la chambre, l'échantillon a une température complètement homogène, gradient de température inférieur à 5 °C entre les différents points de l'échantillon. Après le chauffage les échantillons subissent différentes vitesses de refroidissement ; à l'eau, à l'huile et à l'air. Les différents traitements thermiques appliqués sont donnés dans le tableau 1.

CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE



Figure II-2 : Four électrique, modèle « NABERTHERM »

Tableau II-3: Différents variantes étudiées.

T	Vitesse de chauffage (C°/S)	Temps de maintien	Milieu de refroidissement
950C°	0,117	30 min	Air
1000C°	0,117	30min	Air
1100C°	0,117	30min	Air
1200C°	0,117	30min	Air
950C°	0,117	30min	Eau
950C°	0,117	30min	Huile
950C°	0,117	60min	Air
950C°	0,117	120min	Air
Vierge	/	/	/

CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE

La figure suivante montre le Schéma d'une trempe à l'air.

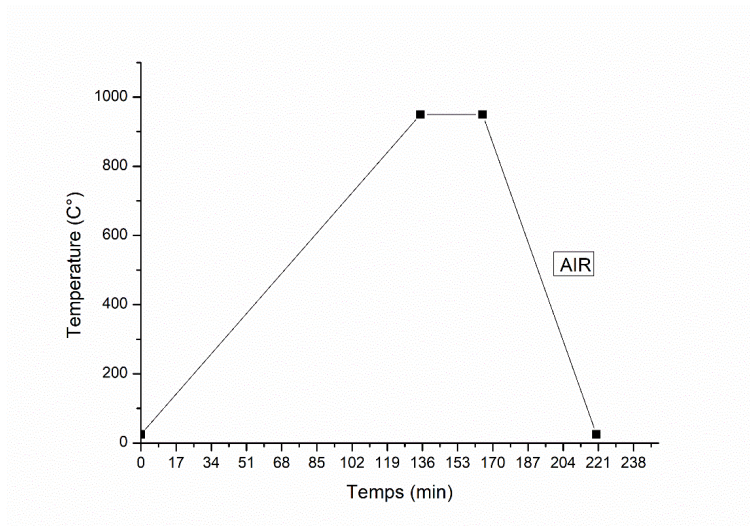


Figure II-3 : Schéma d'une trempe à l'air.

La figure suivante montre le Schéma d'une trempe à eau.

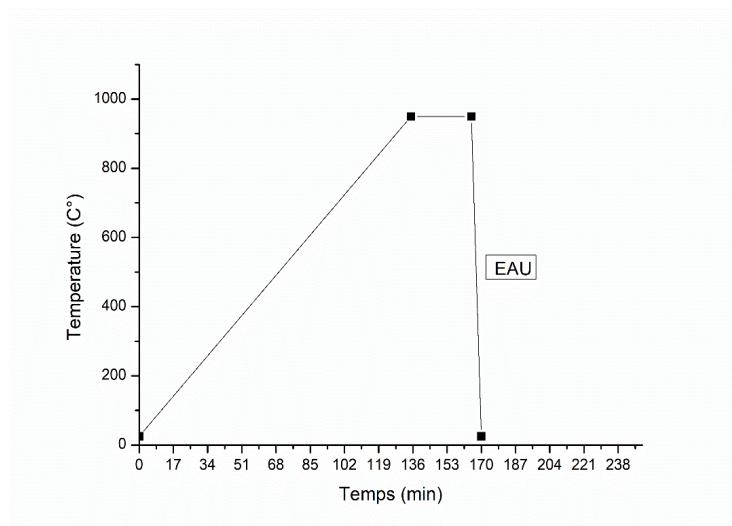


Figure II-4 : Schéma d'une trempe à eau.

CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE

La figure suivante montre le Schéma d'une trempe à l'huile.

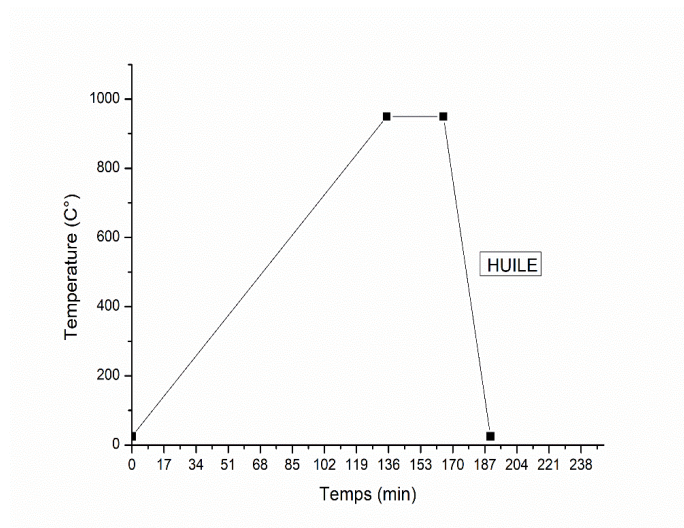


Figure II-5 : Schéma d'une trempe à l'huile.

II.5 Caractérisation mécanique :

II.5.1 Enrobage :

L'enrobage est un procédé consistant à appliquer une couche de liquide ou de poudre sur la surface d'un produit de base de forme quelconque afin de lui conférer des propriétés particulières. S'effectue avec des poudres (bakélite) ces poudres sont comprimées dans une chambre chauffée : Bakélite 120 à 180 C° et compression de 81 à 100 kg/cm².



Figure II-6 : Machine d'enrobage type STRUER

CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE

II.5.2 Essai de polissage :

Le polissage est une opération qui consiste à rendre la surface à analyser plane, brillante et dénuée de toute rayure. L'opération du polissage s'est faite d'une façon graduelle. On a commencé par un polissage au papier Sic avec les grades successifs 400, 800, 1000,1200,2000.

L'opération est effectuée sur une polisseuse électrique de type « Struer », à un seul disque, munie d'un dispositif d'arrosage Permanent d'eau afin d'éviter tout échauffement local suite au frottement. Le passage d'un papier à l'autre nécessite une rotation de 90° de l'échantillon, afin d'éliminer les rayures laissées par le papier abrasif précédent. La vitesse de rotation des disques est de 150 trs/min, 300 trs/min. - Pour la finition, les échantillons sont frottés sur des disques de feutre ou de drap imbibé d'une suspension abrasifs (pate diamanté).



Figure II-7 : Polisseuse mono disque de finition.

II.6 Avantages du polissage électrolytique sur l'acier TRIP 304L :

Parmi les avantages du polissage électrolytique on a :

- Elimination des bavures détachables
- Elimination des inclusions ferriques
- Un décapage sans risque de fragilisations
- Un grand facilite de nettoyage
- Une mise en propreté parfaite

CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE

- Elimination des couches métalliques perturbée par l'usinage.

La figure suivante montre un microscope optique utilisé pour l'observation des microstructures de nos échantillons.

Un microscope optique est un outil polyvalent et largement utilisé dans la recherche scientifique, l'enseignement et l'industrie pour l'observation détaillée et l'analyse des structures microscopiques des échantillons.



Figure II-8 : microscope optique

CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE

II.6.1 Essai de la dureté avec Microduromètre :

L'essai de dureté avec un microduromètre est une technique utilisée pour mesurer la dureté d'un matériau à une échelle microscopique. Contrairement aux tests de dureté conventionnels, tels que les essais Rockwell ou Brinell, qui s'appliquent à des échelles macroscopiques, les essais de dureté avec un microduromètre sont utilisés pour évaluer les propriétés mécaniques des petits volumes de matériaux ou des couches fines.

Le microduromètre utilise un pénétrateur, souvent une pointe en diamant, pour appliquer une charge très faible sur la surface du matériau. La dureté est déterminée en mesurant la taille de l'empreinte laissée par le pénétrateur.

Pour notre cas on a utilisé l'Essai de dureté Vickers (HV)

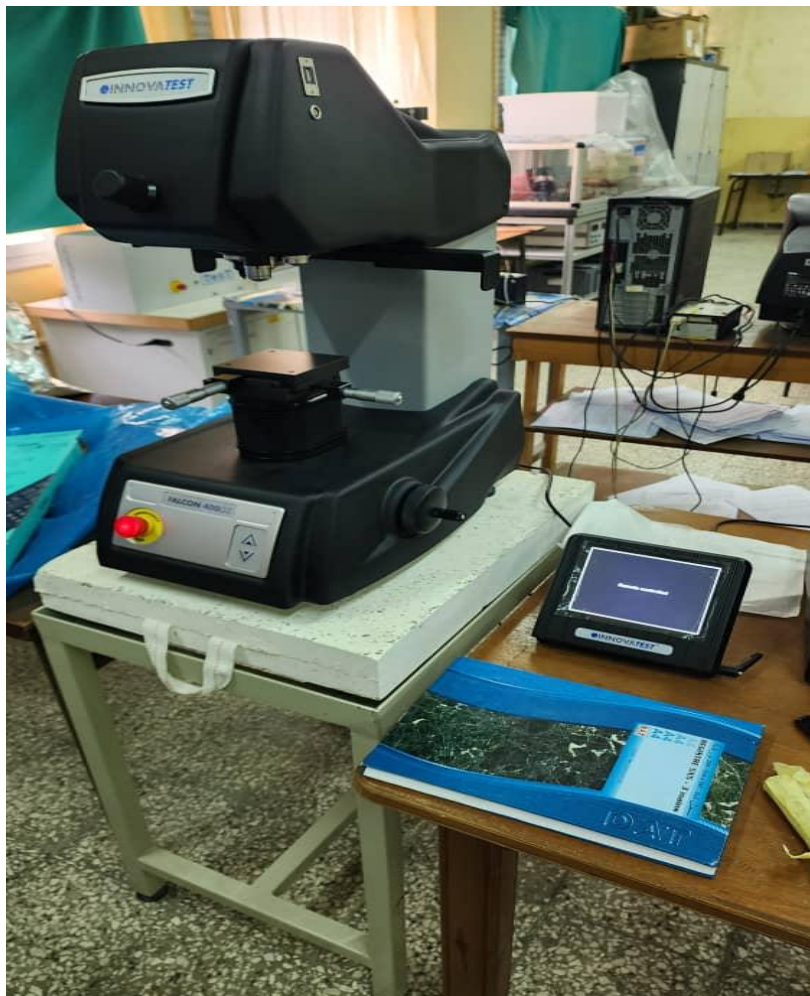


Figure II-9 : Microduromètre

II.6.2 Essai de traction :

Machine d'essai universelle électromécanique contrôlée par ordinateur fabriquée selon les normes ISO. Cette machine d'essai, du fait de sa capacité de 100 KN est adaptée pour une large gamme de matériaux et permet selon les accessoires fournis en option d'effectuer des essais de traction, compression, flexion, cisaillement, etc. Elle est fournie en standard avec un ordinateur de type PC, les résultats d'essai, de traiter et d'imprimer les données.

Elle permet d'effectuer des essais sur des éprouvettes métalliques, les ressorts, des textiles, des caoutchoucs, des plastiques et d'autres matériaux.

Cette machine est parfaitement adaptée pour une utilisation dans les laboratoires de recherche ou dans les laboratoires de l'enseignement supérieur.

CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE



Figure II-10 : Machine de traction

II.7 Caractérisation métallographique :

Attaque chimique :

L'attaque chimique, souvent appelée "gravure" ou "étamage chimique," est une technique utilisée pour révéler la microstructure d'un acier. Cette méthode implique l'application de réactifs chimiques spécifiques sur la surface de l'acier, ce qui permet de mettre en évidence les différentes phases et les caractéristiques microstructurales.

Pour notre cas on a opté pour le réactif d'attaque V2A. Qui est spécifiquement conçu pour révéler la microstructure des aciers inoxydables austénitiques, tels que les aciers de type 304 et 316. La composition et l'utilisation de ce réactif sont adaptées pour mettre en évidence les grains et autres caractéristiques microstructurales de ces aciers inoxydables. Voici les détails de la composition et de l'utilisation du réactif d'attaque V2A :

CHAPITRE II PROCEDURE EXPERIMENTALE

Composition du réactive d'attaque V2A:

- 100ml d'eau
- 100ml d'acide chlorhydrique
- 10ml d'acide nitrique

Attaquez à température ambiante ou jusqu'à 50° pendant 12 minute. [26]

Application du Réactif :

- Immerger ou tamponner l'échantillon avec le réactif préparé.
- Laisser le réactif agir pendant un temps précis, généralement de quelques secondes à quelques minutes, en fonction de l'alliage et des détails microstructuraux souhaités.

Rinçage et Séchage :

- Après l'attaque, rincer immédiatement l'échantillon à l'eau distillée pour arrêter la réaction chimique.
- Sécher l'échantillon avec de l'air comprimé ou en le tamponnant doucement avec du papier filtre.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé la façon dont on traite cette acier avec défèrent étape et avons fait des expérience qu'on va discuter ces résultats dans notre dernier chapitre.

III. CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Introduction

Les traitements thermiques des matériaux métalliques jouent un rôle essentiel dans l'optimisation de leurs propriétés mécaniques pour répondre aux exigences variées des applications industrielles. Ces processus permettent de manipuler la structure cristalline et les propriétés physiques du matériau, influençant ainsi sa résistance, sa ductilité, sa dureté et d'autres caractéristiques clés. L'étude approfondie des effets de la température, du temps de maintien et du mode de refroidissement sur ces propriétés mécaniques est cruciale pour déterminer les conditions optimales de traitement thermique. Cette recherche vise à explorer comment ces paramètres peuvent être ajustés pour maximiser les performances du matériau dans des applications spécifiques telles que l'aéronautique, l'automobile et la construction. En analysant et en interprétant les résultats expérimentaux obtenus à partir de divers essais de traitement thermique, cette étude offre des perspectives précieuses pour l'industrie métallurgique, en aidant à développer des matériaux métalliques plus résistants, durables et adaptés aux défis technologiques contemporains.

III.2 Présentation des Données Expérimentales

Tableau III-1 : Différents variantes étudiés.

T	Vitesse de chauffage (C°/S)	Temps de maintien	Milieu de refroidissement
950C°	0,117	30 min	Air
1000C°	0,117	30min	Air
1100C°	0,117	30min	Air
1200C°	0,117	30min	Air
950C°	0,117	30min	Eau
950C°	0,117	30min	Huile
950C°	0,117	60min	Air
950C°	0,117	120min	Air
Vierge	-	-	-

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.3 Effet des températures de traitement :

Pour notre première étude nous avons réalisé les essais de traction sur les éprouvettes traités thermiquement à différentes températures (950°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C) pour un temps de maintien de 30 minutes qui sont refroidies à l'air, ainsi que pour l'éprouvette vierge.

Les résultats obtenus sont représentés dans les courbes contrainte vs déformation ainsi que dans les histogrammes suivants :

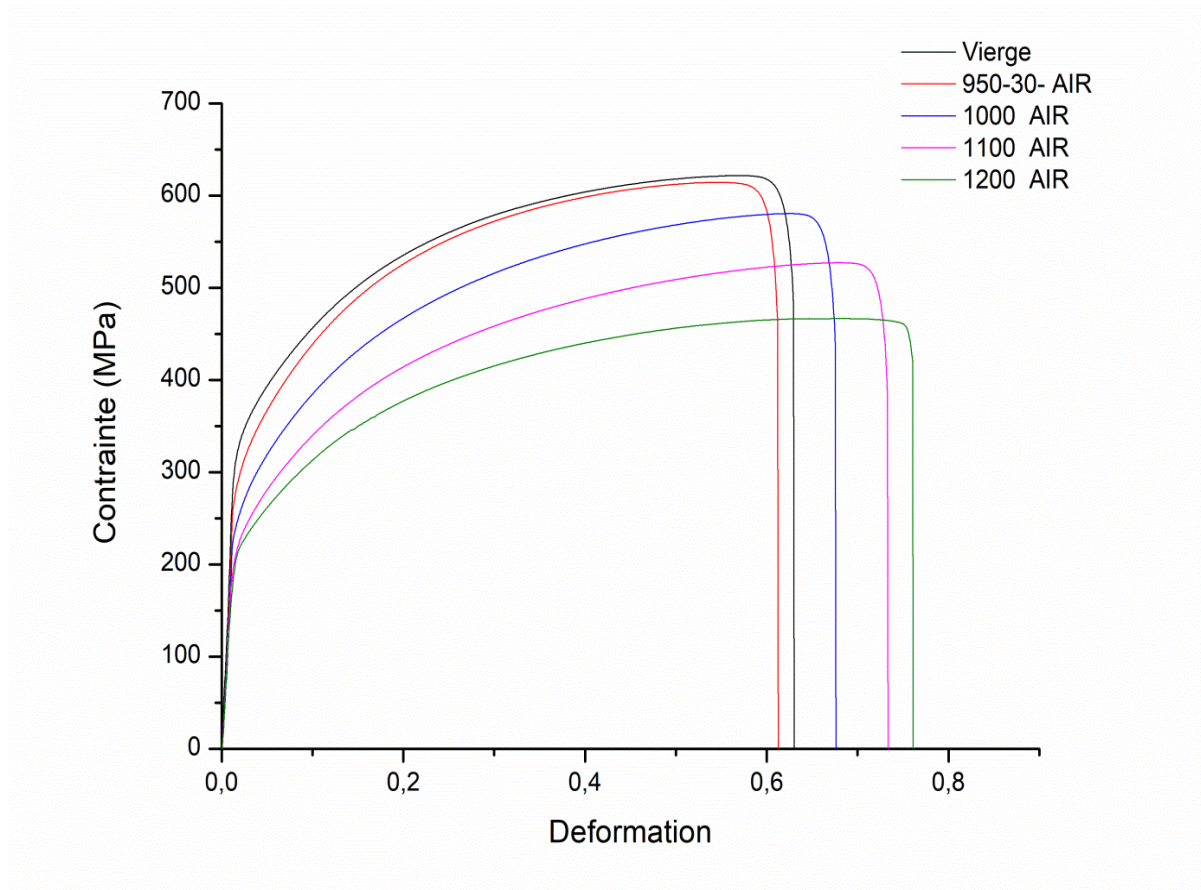


Figure III-1 : courbes de traction des différentes températures

A partir de la figure on remarque que l'éprouvette non traitée a un allongement de 63%. Alors qu'il tend à augmenter avec la température de traitement thermique. À 950°C, l'allongement est légèrement réduit par rapport à l'éprouvette vierge, mais il augmente de manière significative à des températures plus élevées (67% à 1000°C, 73% à 1100°C et 76 % à 1200°C).

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour une température de 950°C La microstructure conserve encore des phases durcies et des précipités. Cela peut légèrement réduire l'allongement comparé à l'éprouvette vierge, car ces phases durcies empêchent la déformation plastique.

L'augmentation de l'allongement avec la température de traitement thermique est principalement due à la dissolution des phases durcies et des précipités, la recristallisation de la microstructure et la réduction des contraintes résiduelles. À des températures plus basses (950°C), ces mécanismes ne sont pas pleinement activés, ce qui peut légèrement réduire l'allongement. Cependant, à des températures plus élevées (1000°C, 1100°C et 1200°C), ces mécanismes augmentent la capacité du matériau à se déformer plastiquement, ce qui se traduit par un allongement significativement plus élevé.

L'acier TRIP 304L contient des phases comme la martensite et des précipités (carbures) qui contribuent à sa résistance mécanique. A des températures élevées, ces phase durcies se dissolvent, ce qui réduit la contribution de ces phases à la résistance mécanique globale du matériau ce qui engendre une baisse de la contrainte maximale.

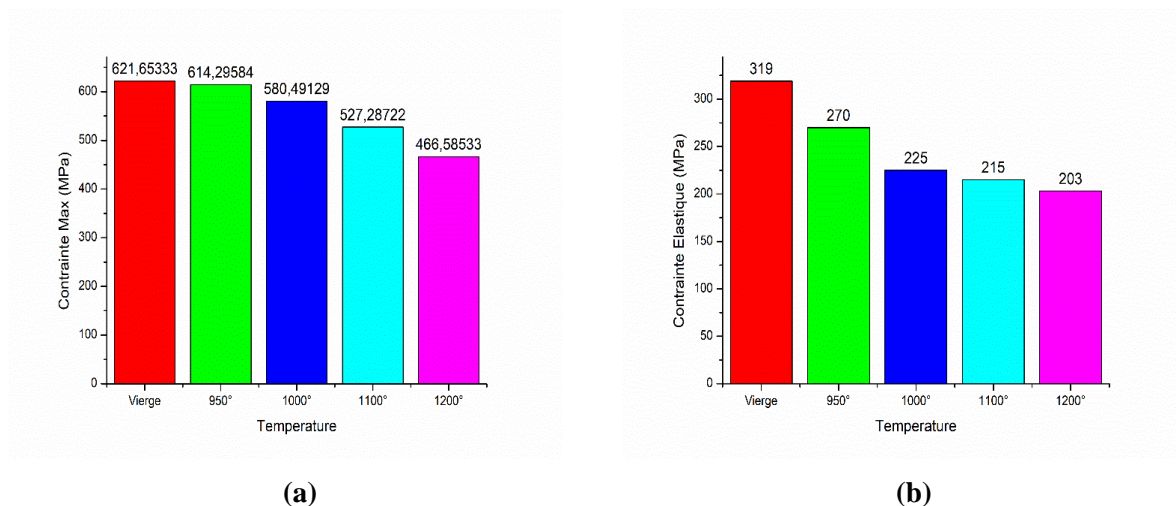


Figure III-2 : Évolution de la contrainte max (a) et de la limite élastique (b) en fonction de la température de chauffage

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

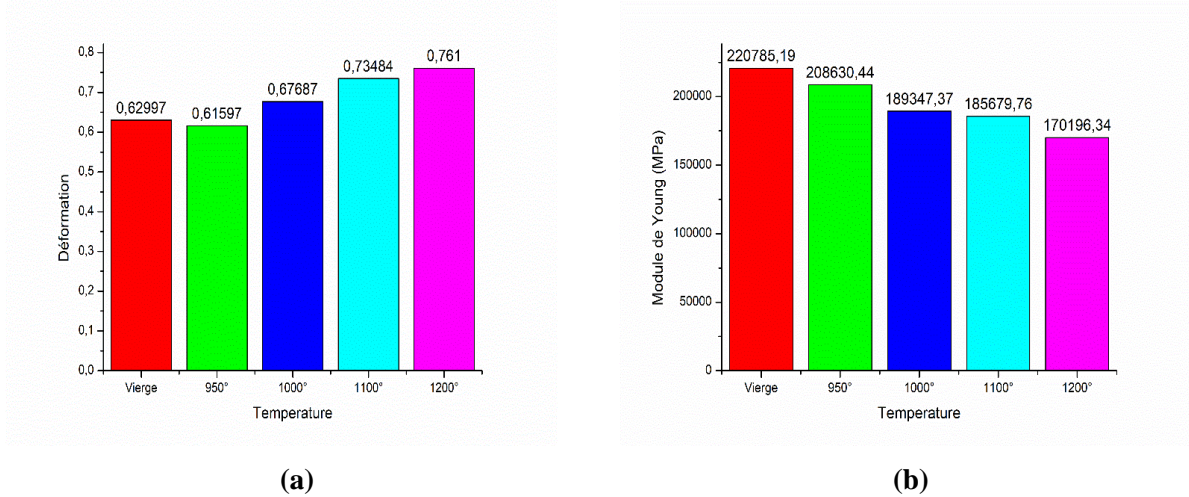


Figure III-3 : Évolution de l'allongement à la rupture (a) et du module de Young (b) en fonction de la température de chauffage

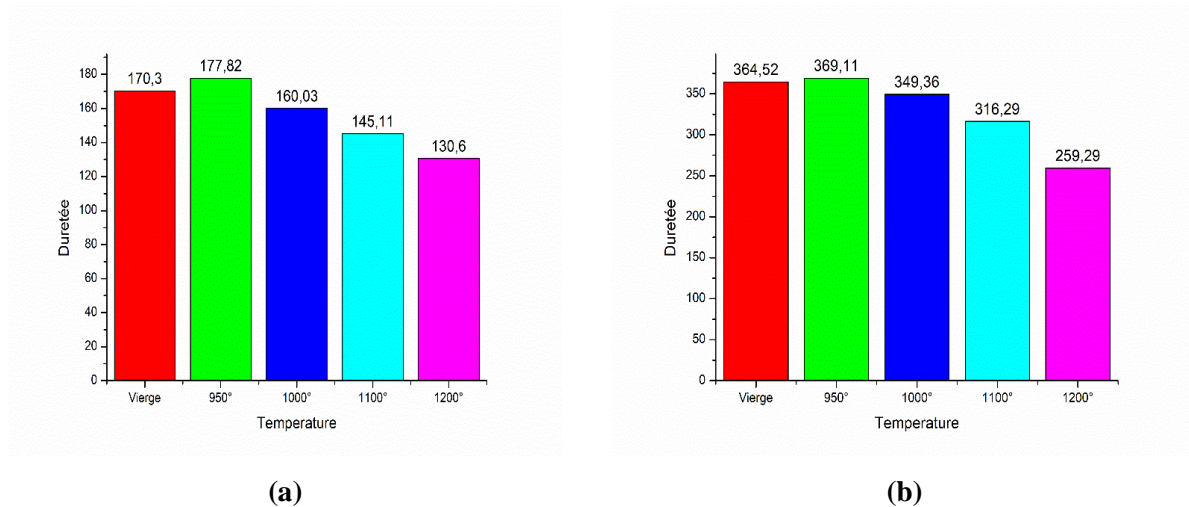


Figure III-4 : Évolution de la dureté avant (a) et après (b) déformation en fonction de la température de chauffage

La figure suivante montre l'évolution de la contrainte maximale, la contrainte élastique (limite élastique), la déformation (allongement), le module de Young (module d'élasticité) et la dureté avant et après déformation en fonction de la température (950°C, 1000°C, 1100°C et 1200°C) refroidie à l'air et l'éprouvette vierge.

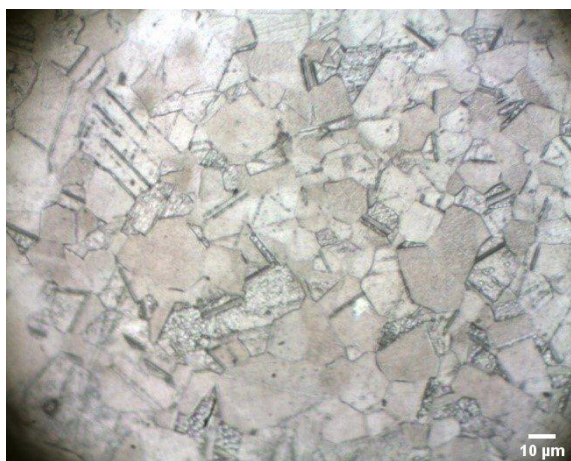
CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS



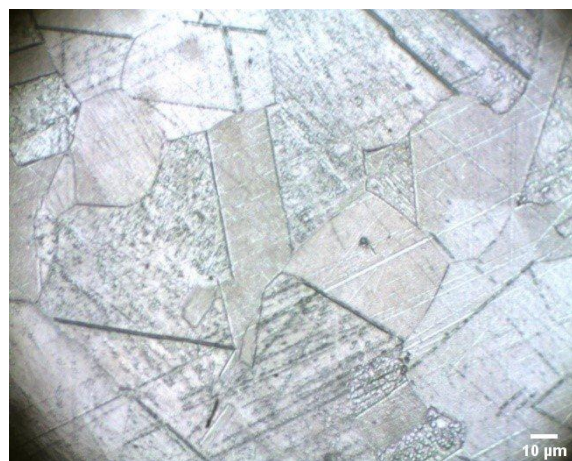
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III-5 : Microstructure de l'acier 304 L obtenue après traitement thermique et refroidie à l'air. (a) Vierge, (b) 950°C, (c) 1000°C, (d) 1100°C et (e) 1200°C.

La figure suivante montre l'évolution de la microstructure observée par le microscope optique de l'éprouvette vierge et l'éprouvettes qui ont subies un traitement thermique de (950°C,

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

1000°C, 1100°C et 1200°C) pour un temps de maintien de 30 minute et un refroidissement a l'air.

On remarque que la recristallisation à des températures élevées élimine les dislocations et forme une microstructure avec des grains plus gros. La recristallisation tend à rendre le matériau plus homogène et moins rigide.

La croissance des grains réduit le nombre de frontières de grains, diminuant ainsi les contraintes internes et rendant le matériau plus ductile, ce qui peut réduire le module de Young.

La dureté de l'acier TRIP 304L est influencée par la présence de phases durcies (comme la martensite) et de précipités, ainsi que par la taille des grains et les dislocations dans la microstructure. À 950°C, la légère augmentation de la dureté est due à la précipitation et à la présence de phases durcies. À des températures plus élevées, la dissolution de ces phases et la recristallisation entraînent une diminution progressive de la dureté.

III.4 Effet des temps de maintien :

Pour notre deuxième étude nous avons réalisé les essais de traction sur les éprouvettes traités thermiquement a une température de 950°C, pour déférentes temps de maintien de (30, 60 et 120 minutes) qui sont refroidis à l'air, et l'éprouvette vierge.

Les résultats obtenus sont représentés dans les figures suivantes

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

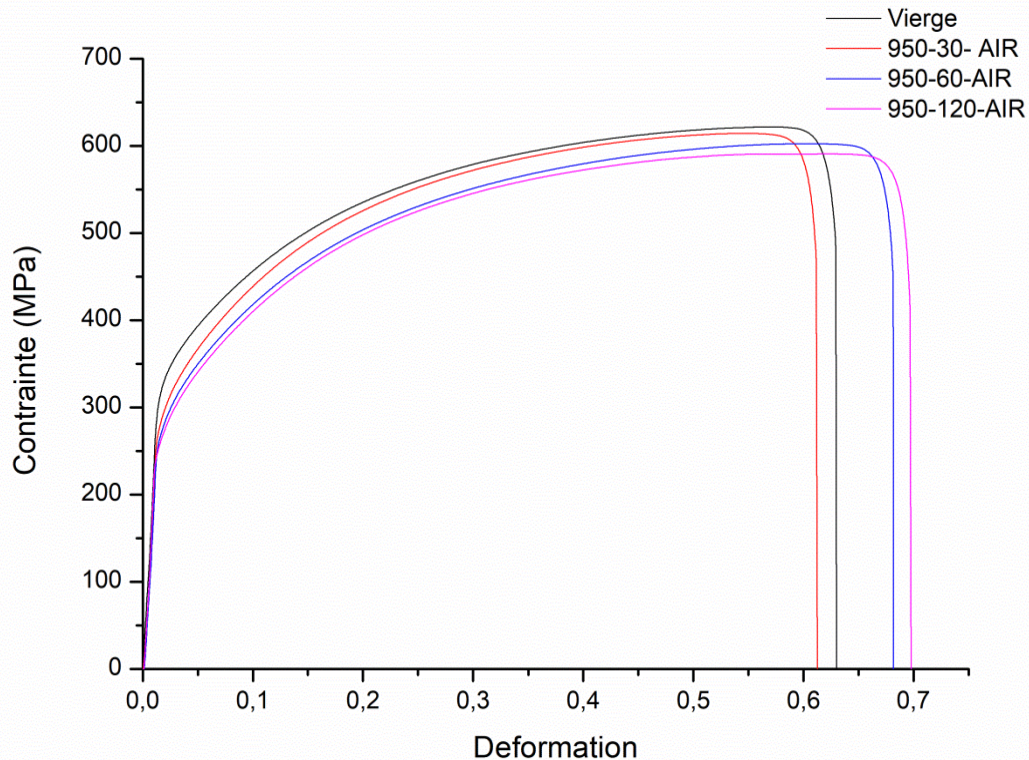
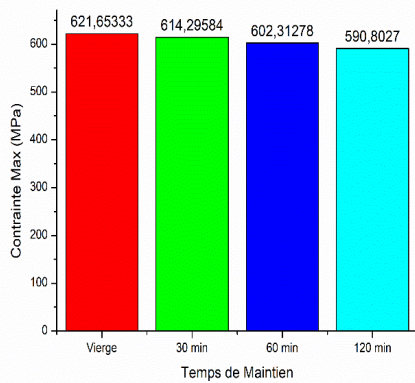


Figure III-6 : courbes de traction de différents temps de maintien

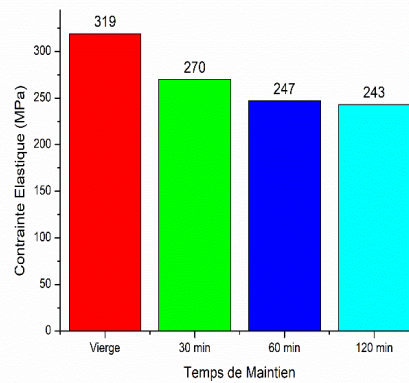
A partir des résultats de la figure on remarque que l'éprouvette non traitée à un allongement de 63%, alors qu'il tend à augmenter avec la température de traitement thermique. L'éprouvette un temps de maintien de 30 minute, l'allongement est légèrement réduit par rapport à l'éprouvette vierge, mais tend à augmenter de manière significative à chaque fois que le temps de maintien augmente (68% pour un temps de maintien de 60 minute et 69% pour un temps de maintien de 120 minute).

La figure suivante montre l'évolution de la contrainte maximale, la contrainte élastique (limite élastique), la déformation (allongement), le module de Young (module d'élasticité) et la dureté avant et après déformation en fonction des temps de maintien (30, 60 et 120 minutes) refroidie à l'air et l'éprouvette vierge

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

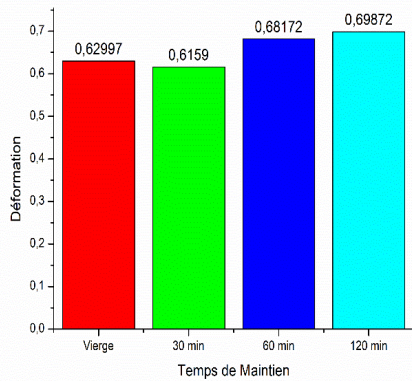


(a)

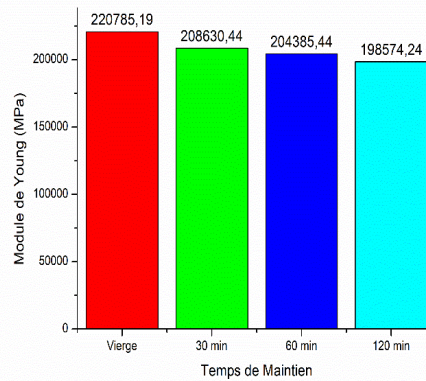


(b)

Figure III-7 Évolution de la contrainte maximale (a) et de la limite élastique (b) en fonction du temps du maintien

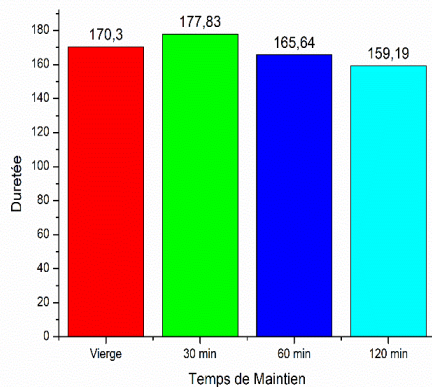


(a)

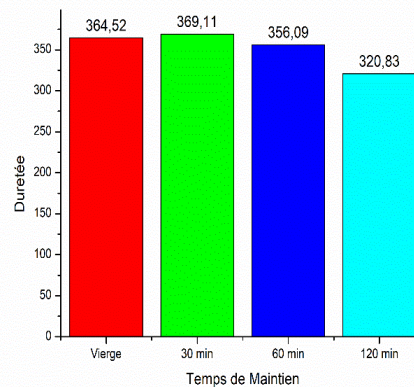


(b)

Figure III-8 : Évolution de l'allongement à la rupture (a) et du module de Young (b) en fonction du temps du maintien



(a)



(b)

Figure III-9 : Évolution de module de la dureté avant (a) et après (b) déformation en fonction du temps du maintien

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

- **Allongement** : Augmente avec le temps de maintien à 950°C en raison de la recristallisation et de la dissolution des phases durcies.
- **Contrainte Maximale** : Diminue progressivement avec le temps de maintien à 950°C en raison de la recristallisation plus complète et de la dissolution des phases durcies.
- **Dureté** : Augmente légèrement avec un temps de maintien court (30 min) en raison de la présence de phases durcies, puis diminue avec des temps de maintien plus longs en raison de la recristallisation complète.
- **Module de Young** : Diminue avec l'augmentation du temps de maintien à 950°C en raison de la recristallisation et de la croissance des grains.

La figure suivante montre l'évolution de la microstructure observée pas le microscope optique de l'éprouvette vierge et celles qui ont subies un traitement thermique a une température de 950° pour des temps de maintien de (30, 60 et 120 minutes) et un refroidissement a l'air.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III-10 : Microstructure de l'acier 304 L obtenue après traitement thermique a 950° avec des temps de maintien (a) Vierge, (b) 30 minutes, (c) 60 minutes, (d) 120 minutes et refroidie a l'air.

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.5 Effet des modes de refroidissement :

Pour notre troisième étude nous avons réalisé les essais de traction sur les éprouvettes traités thermiquement à une température de 950°C, pour un temps de maintien de 30 minutes et ont à varier le mode de refroidissement (air, eau et huile), ainsi que pour l'éprouvette vierge.

Les résultats obtenus sont représentés dans les courbes contrainte vs déformation ainsi que dans les histogrammes suivants :

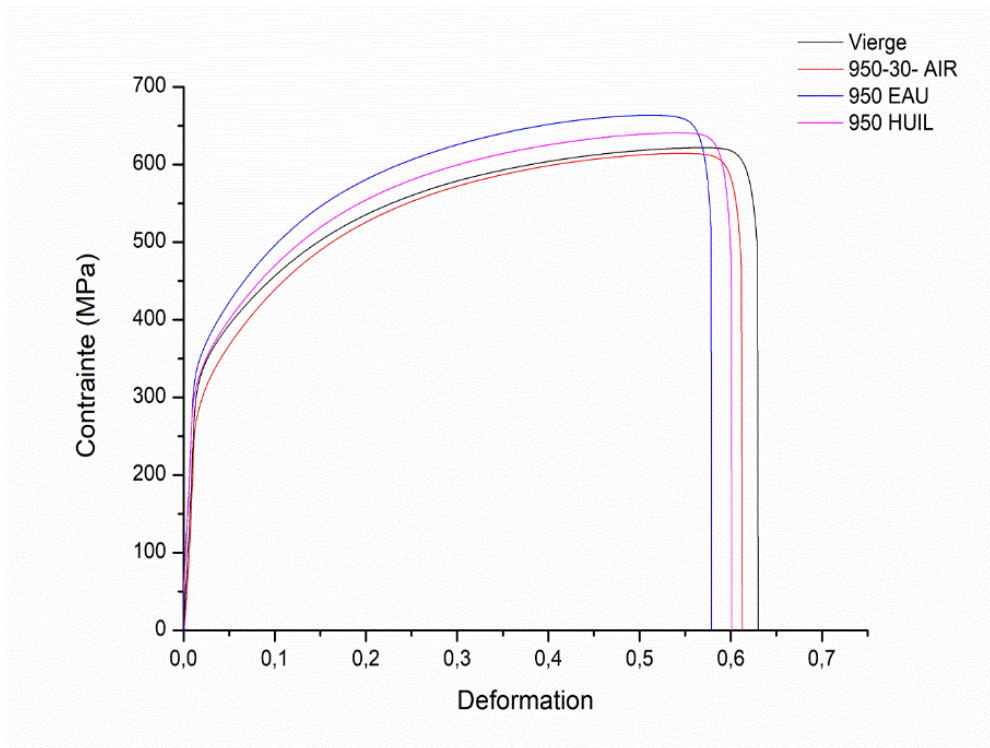


Figure III-11 : Influence du mode de refroidissement sur la courbe de traction

A partir de la figure on remarque que l'éprouvette non traitée a un allongement de 63%. Alors qu'il tend à diminuer avec variation du mode de refroidissement à l'air, à l'huile et à l'eau pour des éprouvettes traitées à 950°C avec un temps de maintien de 30 minutes.

Avec un refroidissement à air l'allongement est de 61%, pour le refroidissement à huile l'allongement est de 60% tandis que pour le refroidissement à l'eau l'allongement est de 57%.

La figure suivante montre l'évolution de la contrainte maximale, la contrainte élastique (limite élastique), la déformation (allongement), le module de Young (module d'élasticité) et la dureté avant et après déformation en fonction des modes de refroidissement (Air, Huile et Eau) pour des éprouvettes traitées à 950°C pour un temps de maintien de 30 minutes et l'éprouvette vierge

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

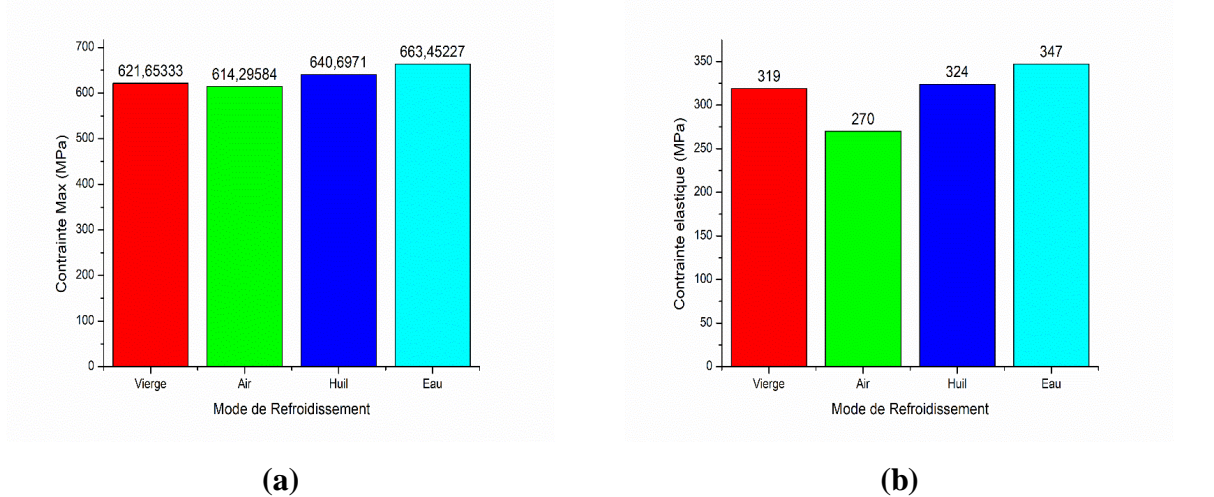


Figure III-12 : Évolution de la contrainte max (a) et de la limite élastique (b) en fonction du mode de refroidissement

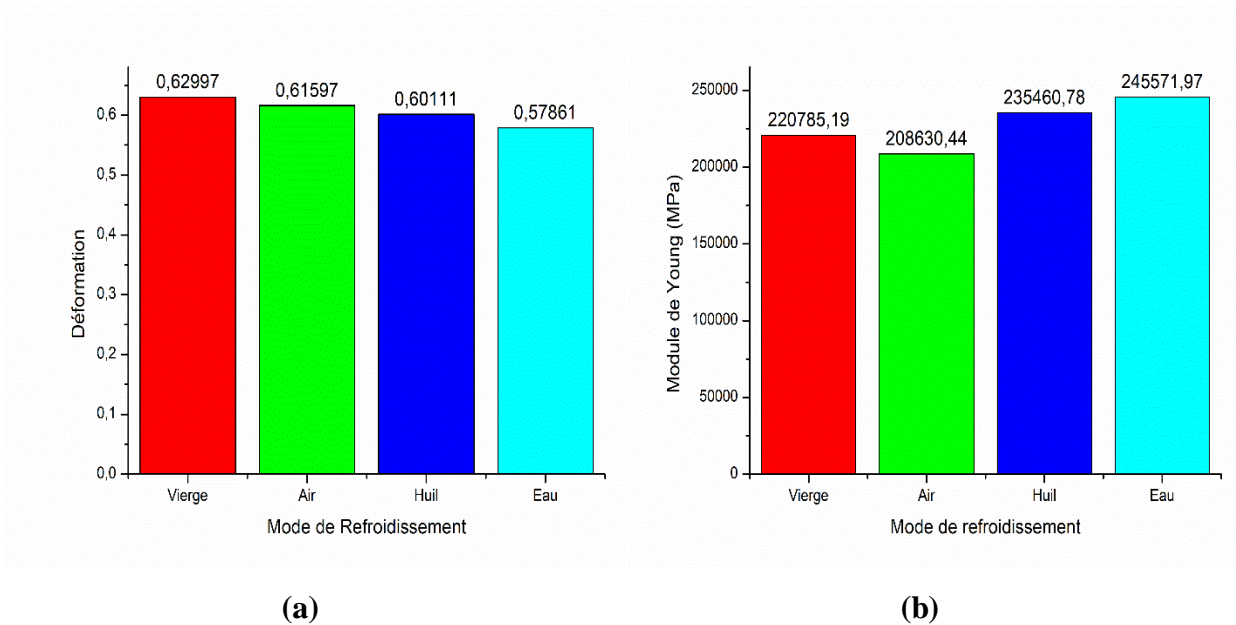


Figure III-13 : Évolution de l'allongement (a) et du module de Young (b) en fonction du mode de refroidissement

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

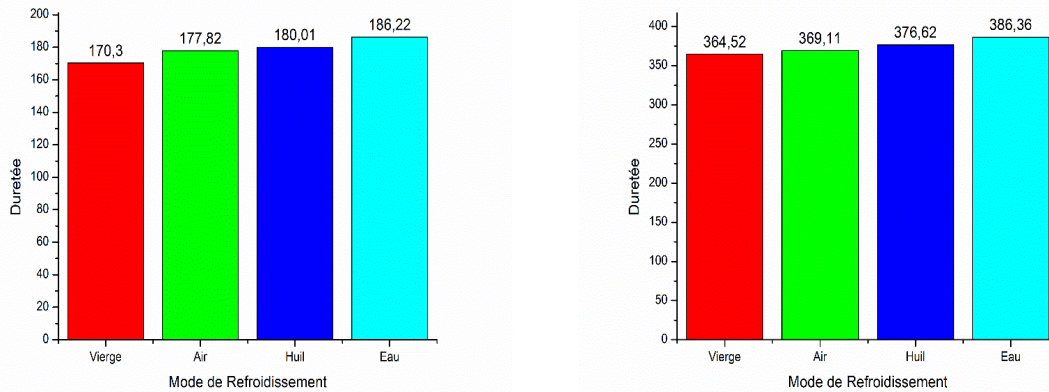
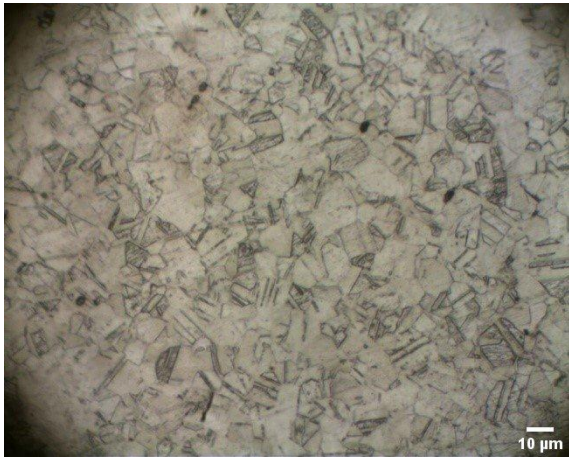


Figure III-14 : Évolution de la dureté avant (a) et après (b) déformation en fonction du mode de refroidissement

- L'allongement peut varier en fonction du mode de refroidissement en raison des changements dans la microstructure et la distribution des phases. En général, un refroidissement plus rapide (huile, eau) peut induire une augmentation de la dureté mais une ductilité réduite par rapport au refroidissement à l'air.
- Le mode de refroidissement peut également influencer la contrainte maximale supportée par le matériau en raison de ses effets sur la microstructure. Des refroidissements plus rapides tendent à produire des aciers plus durs mais moins ductiles.
- Le module de Young peut également être affecté par le mode de refroidissement, bien que généralement dans une moindre mesure que la dureté et la résistance. Les différences du module de Young peuvent résulter des variations dans la microstructure et la densité des défauts.
- On peut prévoir que la dureté augmentera avec la vitesse de refroidissement, atteignant un maximum avec un refroidissement à l'eau en raison d'une transformation plus complète des phases et d'une structure cristalline plus fine.

La figure suivante montre l'évolution de l'allongement et de la dureté en fonction de (a) la température (950°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C et l'éprouvette vierge), (b) temps de maintien (30 minutes, 60 minutes, 120 minutes et l'éprouvette vierge) et (c) mode de refroidissement (Air, Huile, Eau et l'éprouvette vierge).

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS



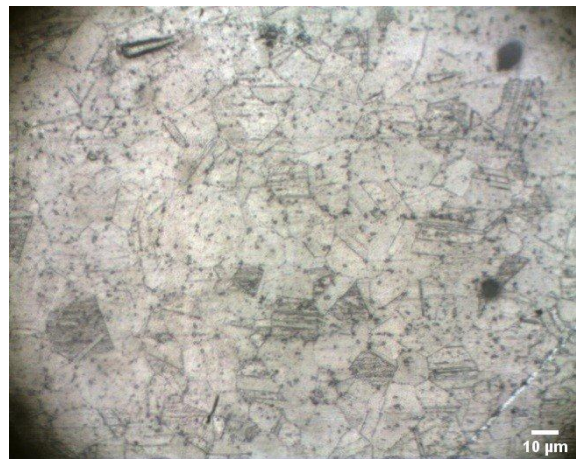
(a)



(b)

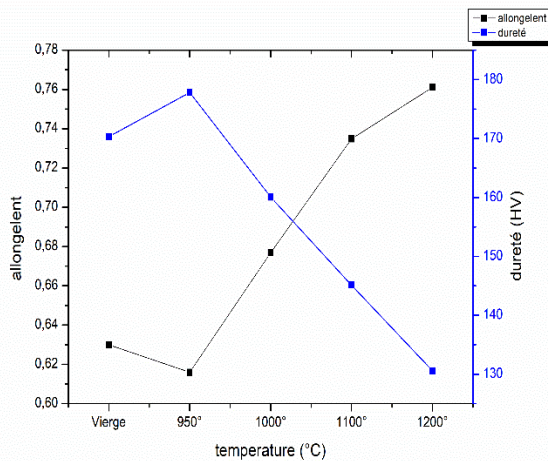


(c)

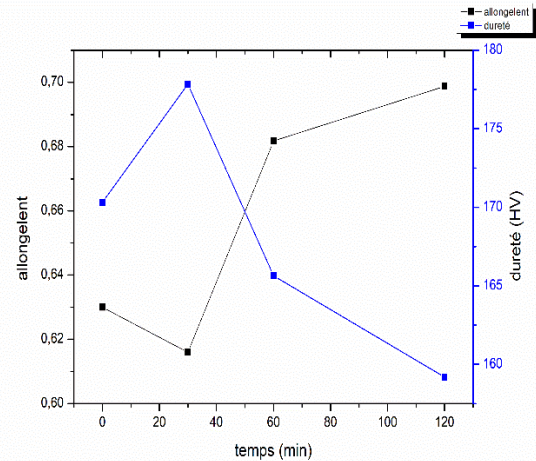


(d)

Figure III-15 : Microstructure de l'acier 304 L obtenue après traitement thermique à 950° avec des temps de maintien de 30 minute pour des modes de refroidissement différent (a) Vierge, (b) Air, (c) Eau et (d) Huile.

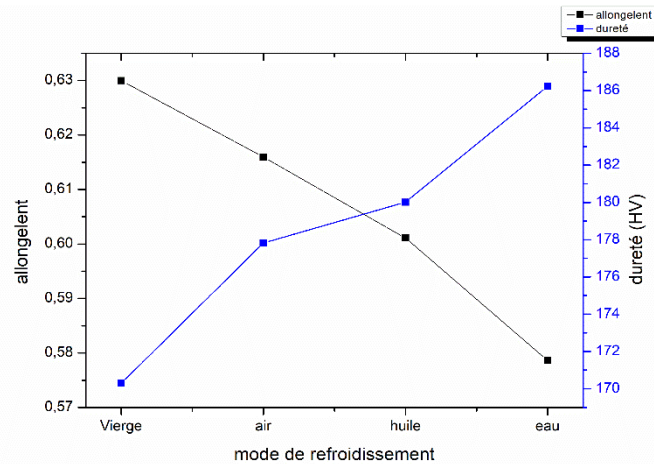


(a)



(b)

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS



(c)

Figure III-16 : Évolution de l'allongement et de la dureté en fonction de (a) la température, (b) temps de maintien et (c) mode de refroidissement.

A partir de (a) on déduit qu'à mesure que l'allongement augmente, la dureté diminue. Cette relation inverse est due aux transformations microstructurales qui se produisent pendant le traitement thermique. Lorsque le matériau subit une recristallisation, les grains se réorganisent et croissent, réduisant les défauts cristallins et augmentant la ductilité (allongement). Cependant, cette même recristallisation et croissance des grains réduisent la résistance aux déformations locales, ce qui se traduit par une diminution de la dureté.

De la figure (b) on déduit : qu'à mesure que le temps de maintien augmente, l'allongement augmente et la dureté diminue. Cette relation inverse est typique des traitements thermiques où une recristallisation prolongée favorise la formation de grains plus grands, augmentant ainsi la ductilité mais réduisant la dureté.

À mesure que la rapidité du refroidissement augmente (de l'air à l'huile puis à l'eau), l'allongement diminue et la dureté augmente. Cette relation inverse s'explique par les transformations microstructurales induites par le refroidissement rapide, qui favorisent la formation de structures cristallines dures comme la martensite.

La figure suivante montre l'évolution de la contrainte max et de la contrainte élastique en fonction de (a) la température (950°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C et l'éprouvette vierge), (b) temps de maintien (30 minutes, 60 minutes, 120 minutes et l'éprouvette vierge) et (c) mode de refroidissement (Air, Huile, Eau et l'éprouvette vierge).

, (b) temps de maintien et (c) mode de refroidissement

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

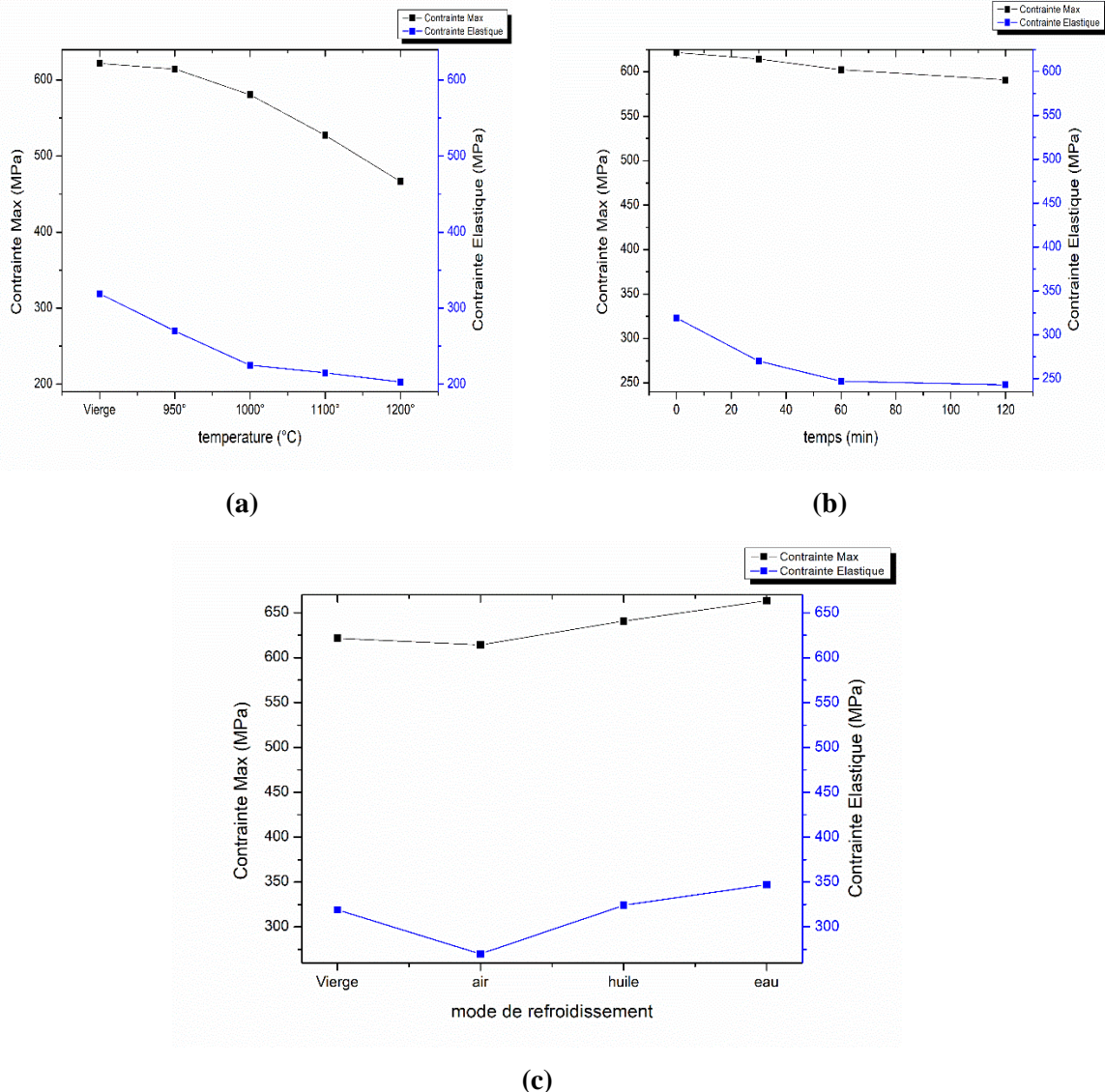


Figure III-17 : Évolution de la contrainte max et de la contrainte élastique en fonction de (a) la température, (b) temps de maintien et (c) mode de refroidissement.

Les données de la figure (a), montrent une diminution progressive de la contrainte maximale de tension et de la contrainte élastique à mesure que la température augmente. Cela est principalement dû à la recristallisation du matériau à des températures élevées, ce qui augmente la plasticité et diminue sa résistance mécanique. Ces informations sont cruciales pour comprendre comment les matériaux métalliques réagissent aux températures élevées, ce qui est essentiel pour la conception de processus industriels et le choix des matériaux dans des environnements à haute température.

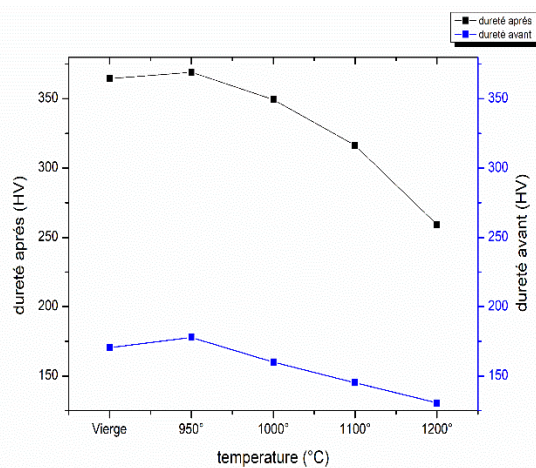
Les données de la figure (b), montrent clairement que la contrainte maximale de tension diminue avec une augmentation du temps de maintien à cette température spécifique, indiquant une réduction de la résistance mécanique du matériau due à des processus tels que

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

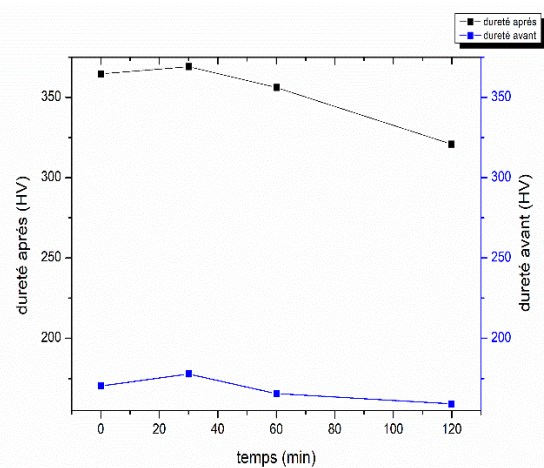
la relaxation des contraintes et la recristallisation. En même temps, la contrainte élastique diminue également, ce qui montre une augmentation de la plasticité du matériau à mesure que le temps de maintien augmente.

Les données de la figure (c), démontrent comment différents environnements (air, huile, eau) peuvent influencer la résistance mécanique et la capacité de récupération d'un matériau métallique sous charge. La contrainte maximale de tension varie légèrement selon le milieu, influencée par des facteurs tels que la lubrification, la protection contre la corrosion et la vitesse de refroidissement. De même, la contrainte élastique montre des variations, reflétant la capacité du matériau à résister à la déformation permanente.

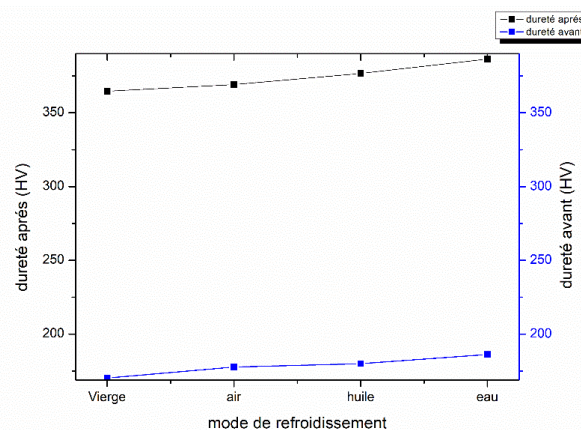
La figure suivante montre l'évolution de la dureté après déformation et de la dureté avant déformation en fonction de (a) la température (950°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C et l'éprouvette vierge), (b) temps de maintien (30 minutes, 60 minutes, 120 minutes et l'éprouvette vierge) et (c) mode de refroidissement (Air, Huile, Eau et l'éprouvette vierge), (b) temps de maintien et (c) mode de refroidissement.



(a)



(b)



CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

(c)

Figure III-18 : Évolution de la dureté après déformation et de la dureté avant déformation en fonction de (a) la température, (b) temps de maintien et (c) mode de refroidissement.

A partir de la figure (a) On observe une tendance générale où la dureté avant déformation diminue avec l'augmentation de la température de traitement thermique. La dureté après déformation suit également cette tendance, bien que le durcissement par écrouissage soit toujours présent. La différence entre les duretés avant et après déformation montre que l'acier subit un durcissement significatif lorsqu'il est déformé, mais cette capacité diminue à des températures de traitement plus élevées.

Pour la figure (b). À 950°C et avec un temps de maintien prolongé, la diminution de la dureté avant et après déformation peut être expliquée par la recristallisation et la croissance des grains. Ces processus modifient la structure du matériau, réduisant ainsi sa dureté initiale et la capacité à maintenir un durcissement significatif par écrouissage après la déformation.

Pour la figure (c). Lorsqu'un matériau est soumis à une déformation plastique, des dislocations se forment dans sa structure cristalline. Ces dislocations agissent comme des obstacles au mouvement des autres dislocations, renforçant ainsi le matériau. Cela conduit à une augmentation de la dureté du matériau après déformation par rapport à sa dureté initiale avant déformation.

III.6 Conclusion

Ces expériences montrent l'importance critique de contrôler précisément les paramètres de traitement thermique (température, temps de maintien, mode de refroidissement) pour optimiser les propriétés mécaniques des aciers TRIP304L. une compréhension approfondie des phénomènes est essentielle pour la conception et la fabrication de composants métalliques dans diverses industries ; où la performance mécanique sous charge et les propriétés de déformation sont des facteurs clés.

- **Impact de la Température :**

- Les températures élevées facilitent la recristallisation et réduisent la résistance mécanique initiale du matériau. Cependant, elles peuvent améliorer la plasticité et la facilité de déformation, selon les besoins de l'application finale.

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS

- **Effet du Temps de Maintien :**

- Un temps de maintien prolongé à une température donnée entraîne une diminution de la dureté et de la résistance mécanique du matériau, tout en augmentant sa plasticité. Cela peut être crucial pour ajuster les propriétés du matériau en fonction des exigences de résistance et de déformation.

- **Influence du Mode de Refroidissement :**

- Le choix du mode de refroidissement (air, huile, eau) après le traitement thermique influence significativement la microstructure et donc les propriétés mécaniques finales du matériau. Chaque mode offre des compromis différents entre dureté, résistance et plasticité, adaptés aux exigences spécifiques de l'application.

IV. Conclusion Générale

IV.1 Conclusion générale :

Cette étude avait pour objectif d'évaluer et optimiser les propriétés mécaniques d'un matériau métallique par le biais de différents traitements thermiques, notamment des variations de température, de temps de maintien et de modes de refroidissement.

- Évaluer comment les variations de température (950°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C) affectent la résistance mécanique, la ductilité et la dureté du matériau métallique.
- Examiner l'impact du temps de maintien (30 minutes, 60 minutes, 120 minutes à 950°C) sur la structure et les propriétés mécaniques du matériau après traitement thermique.
- Identifier le mode de refroidissement optimal pour maximiser la résistance, la dureté et d'autres propriétés spécifiques du matériau en fonction des exigences de l'application.
- Déterminer les conditions de traitement thermique (température, temps de maintien, mode de refroidissement) qui permettent d'obtenir les meilleures performances mécaniques du matériau.

• **Impact de la température :** Nous avons observé que des températures plus élevées, telles que 1100°C et 1200°C, tendent à réduire la dureté initiale du matériau avant déformation. Cependant, ces températures favorisent une recristallisation plus complète et une meilleure plasticité, ce qui peut être avantageux pour les applications nécessitant une haute résistance à la déformation permanente.

• **Effet du temps de maintien :** Nous avons constaté qu'un temps de maintien prolongé, comme 60 minutes et 120 minutes à 950°C, conduit à une réduction supplémentaire de la dureté initiale. Cependant, cela améliore également la ductilité et la résistance à la fatigue du matériau, suggérant une meilleure adaptation aux charges variables et prolongées.

• **Influence du mode de refroidissement :** Les différents modes de refroidissement, tels que l'air, l'huile et l'eau à 950°C, ont montré des effets distincts sur la structure et les propriétés mécaniques du matériau. L'eau a tendance à produire la dureté la plus élevée après déformation, indiquant une microstructure plus fine et une meilleure résistance mécanique, idéale pour des applications nécessitant une résistance élevée.

Les résultats ont révélé plusieurs tendances importantes : à des températures plus élevées, nous avons observé une diminution de la dureté initiale avant déformation, mais une meilleure plasticité et une résistance accrue à la déformation permanente. Les temps de maintien prolongés ont favorisé une recristallisation plus complète, réduisant ainsi les contraintes internes et améliorant la ductilité du matériau. De plus, le mode de refroidissement a également joué un rôle crucial : l'eau a produit la dureté la plus élevée après déformation, indiquant une microstructure plus fine et une meilleure résistance mécanique.

En combinant ces observations, les conditions optimales de traitement thermique pour obtenir les meilleures performances mécaniques du matériau métallique seraient celles qui favorisent une recristallisation adéquate pour réduire les contraintes internes tout en maintenant une dureté et une résistance mécanique optimales. Par exemple, une température de traitement légèrement inférieure à 1100°C avec un temps de maintien prolongé de 60 minutes et un refroidis-

sement rapide à l'eau pourrait offrir un équilibre optimal entre résistance, ductilité et résistance à la déformation permanente pour répondre aux exigences spécifiques de votre application industrielle.

En conclusion, cette étude enrichit notre compréhension des possibilités offertes par les traitements thermiques pour optimiser les performances des aciers TRIP 304L. Ces connaissances sont essentielles pour l'industrie, offrant des perspectives prometteuses pour le développement de matériaux métalliques plus robustes, durables et adaptés à diverses applications industrielles exigeantes.

Des modèles numériques et des simulations sont en Développement pour prédire les comportements mécaniques des aciers TRIP 304L sous différentes conditions de traitement thermique et de chargement mécanique. Ces outils pourraient aider à optimiser les processus de fabrication et de traitement. Ainsi qu'une caractérisation Avancée des Microstructures pour analyser plus finement les transformations microstructurales résultant des différents traitements thermiques.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[1] : Alliage Ferreux (aciers et fontes), Pr.H.Azzouzi , Licence GI

[2] : Aide-Mémoire métallurgie-Métaux, alliages, propriétés de Guy Murry, édition DUNOD, Paris 2004

[3] : LOUNI Kahina, l'influence de la tri-axialité des contraintes sur la transformation austénite-martensite des aciers TRIP : Etude numérique acier TRIP (304L), UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU 2020.

[4] : Dudognon Julien : Étude des modifications structurales induites par implantation ionique dans les aciers austénitiques, thèse de doctorat de l'université d'Orleans, Décembre2006.

[5] : Structures en acier inoxydable Guide de Conception, quatrième édition, SCI Steel knowledge,2017. (p3)

[6] : Pierre-Jean Cunat, « Aciers inoxydables, critères de choix et structures », traité « Matériaux métalliques », Techniques de l'ingénieur, juin 2000, p. M4541-6.

[7]: M K.AHN, know & H.M.Lee : quantitative comparison of the influences of tungsten and molybdenum on the passivity of Fe-29Cr ferritic stainless steels, Elsevier (1998).

[8] : Jean VARIOT : chaudronnerie en acier inoxydable, Technique de l'Ingénieur A869.

[9] : LI Hua-bing, JIANG Zhou-hua, ZHANG Zu-mi, Xu Bao-Yu, Liu Fu-Bin: Mechanical properties of nickel free high nitrogen austenitic stainless steels, materials symposium (2007)

[10] : Shannxi Shew-E Tuyau En Acier Co., Ltd | Apr 15, 2020

[11] : Mihai RADU, relation entre la microstructure et le comportement mécanique des aciers TRIP pour application automobile, ENSMP Paris 2005.

[12] : LABARUSSIAS Thomas, Les aciers AHSS à effet TRIP pour la sécurité automobile, Années : 2007-2008.

[13] : LOUNI Kahina, l'influence de la tri-axialité des contraintes sur la transformation austénite-martensite des aciers TRIP : Etude numérique acier TRIP (304L), UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU 2020.

[14] : Mohammad Sadeghi, Bagher. *Analyse et Identification du comportement mécanique d'aciers à effet TRIP à partir de mesures de champs cinématiques*. Diss. Paris, ENSAM, 2010.

[15] : Régis KUBLER, comportement thermomécanique des aciers a effet TRIP : approches micromécaniques et phénoménologiques « applications à la mise en forme », ENSMA Paris 2004.

[16] : Serri J. Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement plastique d'aciers à transformation martensique. Applications à la mise en forme, Thèse de doctorat. L'Université Paul Verlaine de Metz (2006).

[17]: Elena Pereloma, David V.Edmonds, phase transformation in steels, Woodhead Publishing Limited,2012.

[18] : Youssri El Majaty. Approche renouvelée du mécanisme de Greenwood-Johnson de la plasticité de transformation pour les aciers et alliages. Matériaux. Sorbonne Université, 2021

[19] : [I.Lakhetin, Métallographie et traitement thermique des métaux, Edition mir, moscow, 1986.]

[20] : [Slim Chouchen, Introduction to Materials Engineering, chapitre 5,2018]

[21] : [SAID BENSAADA, Elaboration des métaux ferreux (fontes et aciers), 2010.

[22] : [Science et génie des matériaux modulo Editeur, 2001,233AV Dunbar Mont Royal Québec, Canada]

[23] : [T.V. Rajan, C.P. Sharma and Ashok Sharma, Heat Treatment Principles and Techniques, Second Edition, New Delhi, 2011]

[24] : [Minkévitch N. Manuel des traitements thermiques de l'acier. Editions scientifiques et techniques unifiées, 1935]

[26] : WORKING WITH STAINLESS STEEL, 1 mars 2008, EDP Sciences par pierre jean conat