

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Ben Bouali de Chlef

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Mécanique

Par

ARZOUR FATIMA ZOHRA

Thème:

**Effet thermocinétique sur la ténacité des
aciers austénitiques le 304 et le 316 : étude
expérimentale**

Soutenue le.....06/02/2025.....devant le jury composé de:

Ali Khelil	Professeur	Université de Chlef	Président
Mohammed HADJMELIANI	Professeur	Université de Chlef	Rapporteur
BELALIA Azeddine	Professeur/MCA	Université de Chlef	Examineur
GUEDRI Abd El Moumen	Professeur	Université de Souk ahrass	Examineur
HAMMADI Fodil	Professeur	Université de Bechar	Examineur
Ljubica Milovic	Professeur	Université de Belgrad	Examineur

REMERCIEMENT

Je remercie d'abord ALLAH le tout puissant d'avoir donné la force pour achever ce travail.

Il me sera très difficile de remercier toutes les personnes qui ont contribué à ce modeste travail, je sais qu'ils sont nombreux, pour que je puisse conduire à bien ma mission de ma soutenance de thèse de doctorat, une thématique liée aux aciers austénitiques de la série AISI et à un des procédés de soudage à l'état solide, basé sur le phénomène de la friction.

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon directeur de thèse, le Professeur Mohammed HADJ MELIANI, pour toute son aide et sa patience. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de ses longues années de l'élaboration de la thèse.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury d'avoir acceptés d'évaluer ce modeste travail de thèse,

Je tiens donc à remercier le professeur pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse et pour sa participation scientifique ainsi que le temps qu'il a consacré à ma recherche.

Je remercie toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études et notamment ces années de thèse.

Mes derniers remerciements vont à ma grande famille et surtout à mes trois enfants.

Dédicace

Je dédie cette thèse à mon défunt père.

A ma famille; a ma mère tout particulièrement

Sommaire:

Chapitre 1.....	3
Partie1.Procédé de soudage par friction rotative.....	3
1. I.1.1 - Introduction.....	
2. I.1.2- Définition du soudage.....	3
3. I.1.3-Soudage par Friction.....	4
4. I.1.4-Principe de soudage par friction rotative.....	5
-Processus de soudage par friction rotative.....	5
-Modes de soudage par friction rotative.....	7
-Domains d'applications du soudage par friction rotative.....	7
-Avantages et limites du soudage par friction rotative.....	9
Partie 2.-Soudage par friction rotative de l'acier inoxydable austénitique.....	10
5. I.2.1 Propriétés de l'acier AISI.....	11
Partie3.Essais Destructifs.....	12
-Contrôle Destructif.....	12
-Essai de traction.....	12
-Diagramme de traction.....	13
-Caractéristiques obtenues lors d'un essai de traction.....	
-Essai de dureté.....	
-Principe de l'essai.....	
-Dureté Brinell (symbole HB).....	
-Dureté Vickers.....	
Partie4-Essai son Destructifs.....	14
-Contrôle non destructif.....	14
-Principe du contrôle non destructif.....	15
6. I.4.3-Différentes techniques du CND.....	16
-Contrôles ressuage(PT).....	
-Contrôle par Ultrasons.....	17
-Contrôles par radiographie.....	
-Principe de radiographie.....	18

7. I.4.4-Avantages et Inconvénients des méthodes de CND.....	19
Chapitre II- Matériels et méthodes.....	19
-Introduction.....	20
Opération de soudage par friction rotative sur l'acier AISI.....	21
-Moyens et matériau utilisé.....	23
8. II.1.4-Paramètres de soudage.....	24
Contrôle non destructif.....	24
Ressuage.....	24
9. II.5.2-Radiographie X.....	25
10. II.5.3- Ultrason.....	27
-Contrôle destructif.....	27
Chapitre III. Résultats et discussions.....	26
- Introduction.....	35
-Opérations de soudage par friction sur l'acier AISI	
-Effet d u temps et de la pression du forgeage.....	
-Contrôle non destructif.....	38
11. III.2.1- Ressuage.....	38
12. III.2.2- Ultrason.....	39
13. III.2.3- Rayon X.....	43
Chapitre IV. Interprétations	
IV.1- Introduction	40
IV.2-Lois de Comportement	51
IV.2.1-Loi de Ludwik	53
IV.2.2-Loi de Hollomon	54
IV.2.3Loide Swift	55
IV.2.4Loide Ludwigson	59
14. IV.5-Modélisation des lois de comportement d'écroutissage isotrope.	61
15. Références Bibliographiques	79

RESUME

Le soudage par friction rotative est une méthode permettant donc, de réaliser des soudures en phases solide, au cours de laquelle un premier élément est mis en rotation et un second en contact sous pression par rapport à l'autre, les deux par rapport à l'axe de rotation, afin de produire de la chaleur autour des deux surfaces de contact.

La qualité de la soudure dépend essentiellement des paramètres utilisés pour une opération de soudage, à savoir la vitesse de rotation, le temps et la pression de friction et le temps et la pression du forgeage.

En premier lieu donc, des opérations de soudage ont été réalisées sur des barres en acier inoxydable austénitique, de la famille AISI 304L et AISI 316L, sous une vitesse de rotation constante de l'ordre 3000 tr/min, dont :

- le premier objectif est d'analyser par l'utilisation de l'AISI 304 L l'effet de deux paramètres simultanés, respectivement deux temps et deux pressions de forgeage, de l'ordre pour le temps (5 et 8s) et (280 et 300 MPa).
- le second objectif est d'analyser l'effet par l'utilisation du AISI 316L de cinq temps, de la phase de friction (4, 5, 7, 9 et 11s), le reste des paramètres sont fixes et la pression de friction et une pression de forgeage de l'ordre de 280 MPa.

En second lieu, un contrôle de qualité a été appliqué à l'ensemble des joints soudés par les techniques du Contrôle Non Destructif (CND) tels que, ressuage, rayon X et ultrason, afin d'analyser l'effet des paramètres de soudage suscités sur la qualité des joints.

Les résultats obtenus montrent la présence de défauts au niveau de certains joints de soudure, estimé à 25% en termes de joints, essentiellement pour les faibles, temps ou pression de forgeage.

Introduction Générale

Introduction Générale

Parmi les techniques d'assemblages possibles, on trouve les procédés de soudage à l'état solide qui sont historiquement les plus anciens. Lors d'une opération de soudage de ce type, les joints sont produits par diffusion à des températures inférieures au point de fusion des matériaux de base, sans addition de métal d'apport. Le soudage à l'état solide présente de nombreux avantages, aucune fusion n'est impliquée, ce qui réduit considérablement les problèmes liés à la fusion et à la solidification dans les techniques de soudage par fusion (soudage laser ou à l'arc), et rend alors possible d'assembler des alliages difficilement soudables par les techniques conventionnelles. De plus, la formation de phases intermétalliques autour de l'interface, peuvent être fragiles.

Dans les assemblages à l'état solide, le bon choix des paramètres du processus tels que le temps, la température et la pression peut améliorer la qualité de l'assemblage. Les procédés de soudage à l'état solide comprennent le soudage sous pression à froid, le soudage par diffusion, le soudage par explosion, le soudage à la forge, le soudage par ultrasons, le soudage par friction, etc. Ces procédés impliquent, d'une manière générale, un ou plusieurs des phénomènes suivants : La diffusion d'atomes à travers une interface, la pression et le mouvement relatif des surfaces en contact. Le soudage par friction est l'une des méthodes de soudage à l'état solide les plus économiques et les plus productives pour joindre des métaux semblables ou dissemblables. Il est souvent la seule technique connue dans l'industrie qui peut surmonter les difficultés rencontrées lors de l'assemblage de matériaux présentant des caractéristiques physiques très différentes tels que la conductivité et la dilatation thermique.

Le soudage par friction concerne les procédés de soudage à l'état solide qui conduisent à des jonctions de matériaux sous l'influence de la chaleur générée par frottement, produit par un mouvement de glissement induit mécaniquement entre deux surfaces en contact. Le frottement mécanique peut être produit entre deux pièces maintenues sous pression, une en rotation et fixe (friction rotative) ou les deux pièces en mouvement linéaire oscillatoire (friction linéaire) ou à l'aide d'un outil en mouvement entre deux pièces fixes (friction malaxage). Lors du soudage par friction rotative (Rotary Friction Welding en anglais), la chaleur nécessaire pour une opération de soudage est produite par frottement, ce dernier généré par un mouvement de rotation d'un côté et un mouvement de translation de l'autre côté. Cette méthode repose sur la conversion directe de l'énergie mécanique en énergie thermique, pour former le joint, sans application de chaleur provenant d'une autre source. La qualité de la soudure produite par soudage par friction est étroitement liée aux paramètres de

Ce processus, tels que la vitesse de rotation, le temps de friction et de forgeage, la pression de friction et de forgeage. Ces paramètres doivent être optimisés pour assurer la qualité de la soudure.

La chaleur générée par friction à l'interface crée une zone plastique entre les deux pièces à assembler. Dans cette zone, et sous l'effet du cisaillement se produit entre les deux pièces une pression axiale, qui transforme une partie de la matière en écoulement plastique pour permettre la jonction et la formation du bourrelet.

Les aciers austénitiques, et plus précisément **AISI 304L** et **AISI 316L** [1], deviennent indispensables dans de nombreux domaines, on peut citer : le nucléaire, le bâtiment et les travaux publics, la construction navale, l'automobile, l'aéronautique, l'outillage, l'industrie la mécanique, l'agro-alimentaire, le chimique, le transport, le médical, etc.

Cette large possibilité de leur utilisation dans différents domaines d'applications peut être étendue au soudage en raison de leurs caractéristiques impressionnantes telles que: limite élastique, ductilité, résistance à la corrosion et à l'oxydation, la soudabilité, la formabilité et le niveau de la ténacité.

Dans cette partie du texte, nous nous intéressant au soudage par friction direct, comme procédé de liaison à l'état solide, ce procédé utilise la chaleur générée entre deux surfaces de friction [2]. Ce processus utilise deux phases : (i) le frottement et (ii) le forgeage [3]. Cinq paramètres majeurs contrôlent le processus qui est, la vitesse de rotation, la force et le temps de maintien de la phase de frottement et de la phase de forgeage [4]. Les modifications microstructurales produites dans le joint soudé, change fortement par écrouissage les propriétés mécaniques des matériaux de base.

Ce procédé est d'un grand intérêt pour les chercheurs contemporains notamment pour l'utilisation des aciers austénitiques [5,6]. Les travaux publiés dans ce domaine concernent en général l'effet des paramètres mentionnés ci-dessus et la manière d'optimiser ses derniers pour obtenir pour le joint de propriétés les plus proches au matériau de base.

Au cours des deux dernières décennies notamment en ce qui concerne les aciers austénitiques, beaucoup de travaux ont été publiés, **Ozdemir** [7] par exemple, a clairement analyser l'effet de la variation de la vitesse de rotation lors d'une opération de soudage par friction directe, réalisée sur des barres de 12 mm de diamètre en utilisant deux aciers austénitiques, le **AISI 304L** et le **AISI 4340**. A la suite de ses travaux l'auteur conclut qu'une vitesse de rotation d'environ **2500 tr/min** augmente la résistance à la traction du joint post-soudage. Une autre étude importante réalisée sur l'alliage d'aluminium **AA6082** et de l'acier

inoxydable austénitique **AISI 304**, a montré que la force de frottement a un grand impact sur la résistance à la traction du joint produit, suivie par les deux temps, celui du maintien du frottement et de forgeage.

Dans le même ordre d'idées, **Kurt et al, [8]** ont réalisés des opérations de soudage mixte sur des échantillons prélevés sur l'**AISI1010** et sur l'**ASTMB22**, les barres utilisées

L'objectif de ce travail de thèse est double, analyser l'influence du temps de friction sur la qualité du joint soudé par friction directe, pour le AISI 304L et le second objectif porte sur l'effet du temps de forgeage, toujours sur la qualité du joint, pour le AISI 316L. Pour cela on fait appelle aux méthodes de contrôle non destructif tel que le ressuage, radiographie (rayon X) et l'ultrason.

Ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres, le premier consiste à présenter le procédé de soudage par friction rotative, avec l'exposition de ses différents types, leurs principes de base, leurs avantages et leurs inconvénients. Le second chapitre en trouve le mode opératoire et le matériel utilisé, par contre, le troisième chapitre porte sur l'analyse la qualité de la soudure, par le Contrôle Non Destructif (CND), pour rappel: le ressuage, radiographie et l'ultrason. Enfin, le quatrième chapitre porte sur l'interprétation des résultats expérimentaux et l'utilisation de quatre lois de comportement pour analyser l'effet d'écrouissage post-soudage, suivi par une large discussion des résultats et bien sûr leurs interprétations. Enfin une conclusion générale accompagnée de quelques perspectives.

CHAPITRE1:

I. Procédé de soudage par friction rotative

I.1-Introduction

La recherche autour du soudage ne cesse de prendre de l'ampleur aux fils du développement de la technologie et de la complexité des installations industrielles, le soudage est le moyen d'assemblage le plus utilisé sous différents aspects. De là, qui dit soudage, dit matériaux, donc le soudage utilise la matière façonnée par l'homme en associant un apport de chaleur, ce dernier se décline sous différentes formes, on peut invoquer le soudage à l'arc, le soudage aux gaz, le soudage par friction, etc. Les paramètres les plus importants de ce procédé sont ceux qui ont une influence sur la nature du joint et sur ces paramètres, il s'agit de la nature de la conception et ses spécifications, la vitesse, le temps et le coût. Derrière tout ça, c'est la recherche de meilleures propriétés mécaniques pour un joint soudé.

Dans cette modeste étude on va réaliser un certain nombre d'opération de soudage à l'état solide en faisant varier le temps de friction, par l'utilisation de l'acier austénitique de la famille **AISI**. Les paramètres utilisés pour des opérations de soudage, vont être déclinés plus loin dans ce travail. D'après les résultats de certains nombres de travaux de recherches publiés suggèrent que le soudage par friction est l'un des procédés d'assemblage le moins coûteux, le moins polluant, utilisant tous types de matériaux, allant de l'acier, de l'aluminium, les polymères cristallin et semi-cristallins, etc. [1].

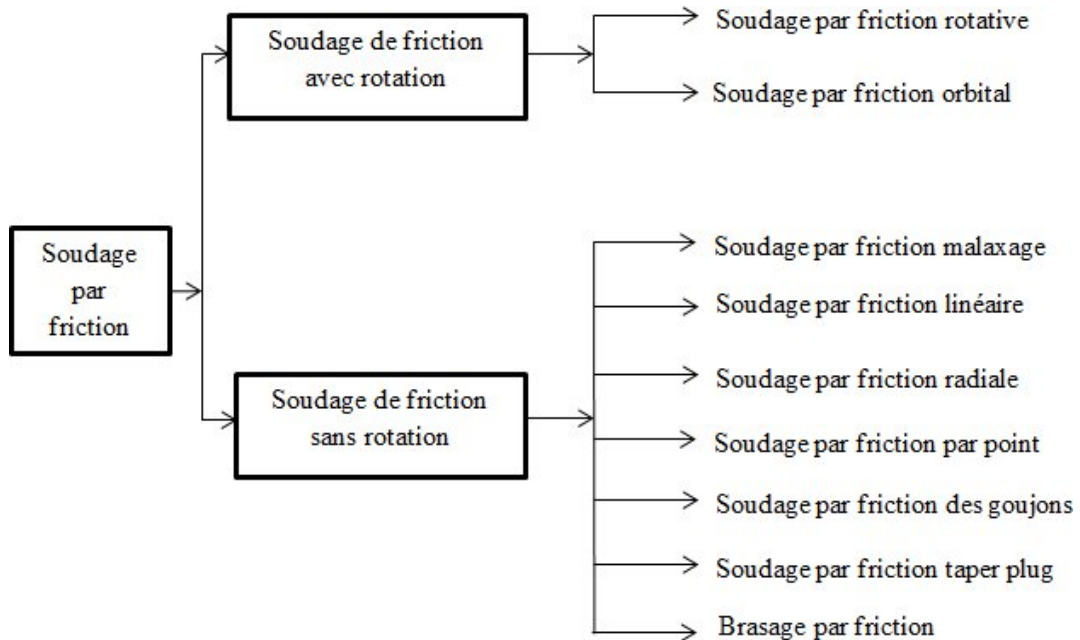
I.2-Définition du soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage permanent qui consiste à réunir deux ou plusieurs pièces, afin d'assurer la continuité de la matière. La jonction s'effectue par action d'une énergie calorifique et mécanique générée par divers modes, dénommé souvent par le terme "soudure ou de joint de soudure"[2].

Le soudage classique est généralement basé sur l'effet la température de fusion, généré par plusieurs passes, le plus souvent comme complément métallique appelé «métal d'apport», introduit dans le joint en une ou plusieurs passes. Si le métal d'apport est différent du métal de base avec un point de fusion inférieur, il s'agit d'un "soudage hétérogène" et s'il n'y a pas de composant métallique ou le point de fusion a la même composition, il s'agit d'un "soudage auto-générateur". Le soudage idéal est celui qui assure la continuité des propriétés mécaniques, métallurgiques et physiques entre les pièces assemblées, de sorte que la soudure

ne se distingue pas ou peu du métal environnant. Une opération de soudage par friction obéie à une démarche schématisé par le diagramme ci-contre :

L'organigramme montre les principaux procédés de soudage par friction.



Classification des procédés de soudage par friction

1.2.1-Soudage par Friction

Le soudage par friction est un procédé d'assemblage à l'état solide pouvant produire des soudures de haute qualité si les paramètres sont maîtrisés et bien utilisés entre deux pièces de même matériaux ou de matériaux dissimilaires. Les pièces à souder par friction sont misent en contact l'une contre autre, générant par frottement de la chaleur autour de l'interface, par effet de mise en rotation de la première partie d'un côté et par une application d'un effort axiale sur la seconde partie de l'autre côté.

Le frottement fait augmenter de la température autour de l'interface des deux pièces, parfois qui avoisine les 1000°C, pour baisser rapidement par effet naturelle, gouverner par l'évolution de l'état de la matière initialement solide et qui deviennent pâteuse, en d'autres termes par abaissement de la friction (frottement) [3].

Principe de soudage par friction rotative

Le principe du soudage par friction est schématisé par la **figure I.1**, supposons que deux pièces doivent être liées bout à bout, une est fixée, tandis que l'autre est mise en rotation à une vitesse constante. Quand les deux pièces sont mises en contact, la force de friction provoque un couple résistant (ou couple de frottement), l'énergie qui en résulte est transformée en chaleur autour de l'interface des deux surfaces en contact. La chaleur générée augmente rapidement gouvernée par un niveau de la friction dépendant de la taille de la surface de contact, cette dernière peut atteindre une certaine valeur maximale. Ensuite, la pièce en rotation est arrêtée, et une force de forgeage axiale est appliquée afin de réaliser un joint de part et d'autre des deux pièces voulons les associer [4].

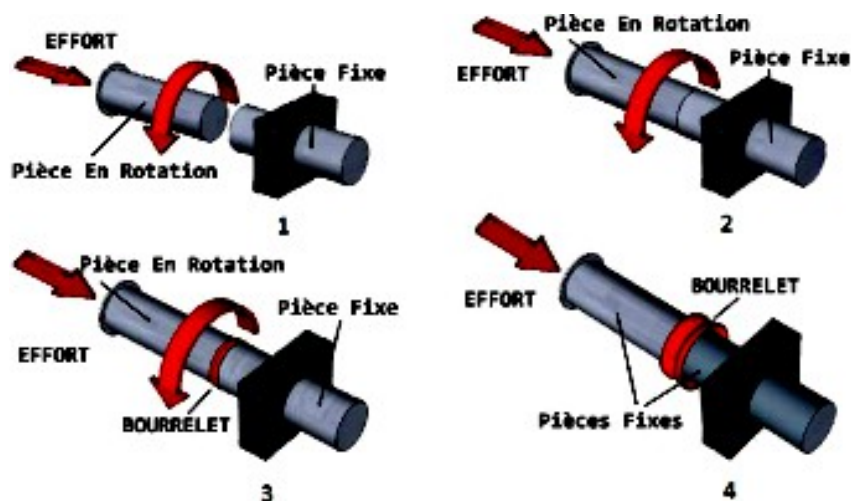


Figure I.1.Principe général de soudage par friction rotative

Processus de soudage par friction rotative

Le processus de soudage par friction rotative comporte deux phases, celle de friction et celle de forgeage. La **figure I.2** représente les variations du temps du couple résistant de la phase de friction, cette variation est subdivisée en quatre stades distincts [5].

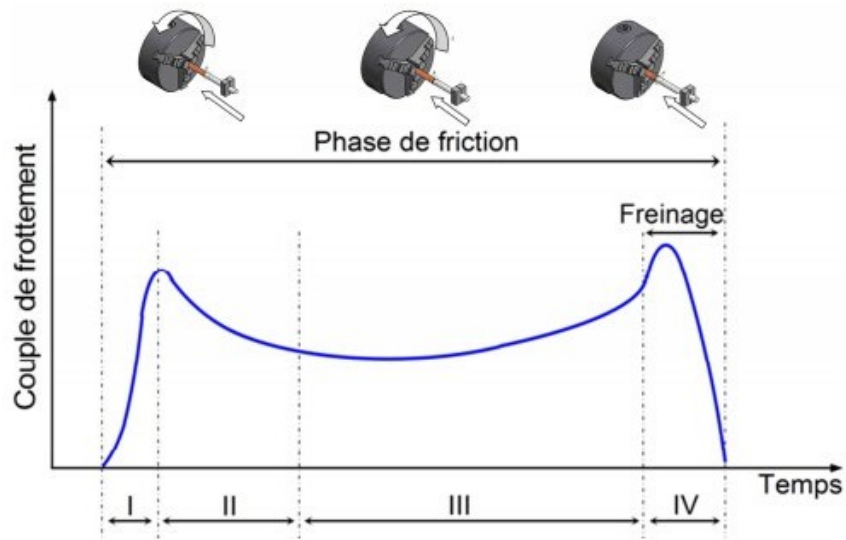


Figure I.2. Variations du couple de frottement durant la phase de friction[5]

Stade I : Ce stade commence lorsque les deux pièces entrent en contact l'une contre l'autre, générant une friction sèche entre les deux surfaces. Les aspérités des deux surfaces grippent et s'arrachent en fragments plus ou moins gros et nombreux selon la valeur de la vitesse de rotation et de la force axiale appliquée. Le couple de frottement, fait augmenter la température autour de l'interface, jusqu'à une valeur maximale, appelée température maximale. L'augmentation de la température provoque un adoucissement suivi par un écoulement plastique des fragments autour de l'interface.

Stade II : Ce stade est transitoire, il débute lorsque le couple commence à diminuer annonçant le déclin du frottement et par là, le niveau de la température maximale chute et se termine lorsqu'il atteint une valeur d'équilibre presque constante. Des couches plastiques commencent à se développer de part et d'autre de l'interface pour être expulsée vers la périphérie sous l'effet à la fois des forces radiales (d'inertie) et sous l'effet d'une force axiale. La matière expulsée annonçant la formation du bourrelet autour l'interface, **figure I.3.**

Stade III : C'est un stade d'équilibre, la température de la couche interrassiale commence à démunie, par conduction et activation interne, le métal adjacent et conduit à une consommation accrue des deux côtés en fonction du temps de friction.

Stade IV : C'est le stade de décélération, il commence lorsque le freinage est appliqué pour arrêter la pièce en rotation. Durant ce stade, la couche plastifiée se déplace de nouveau

Vers la périphérie des deux pièces associées, contribuant à la croissance de la forme du bourrelet au fur et à mesure que la vitesse de rotation diminue.

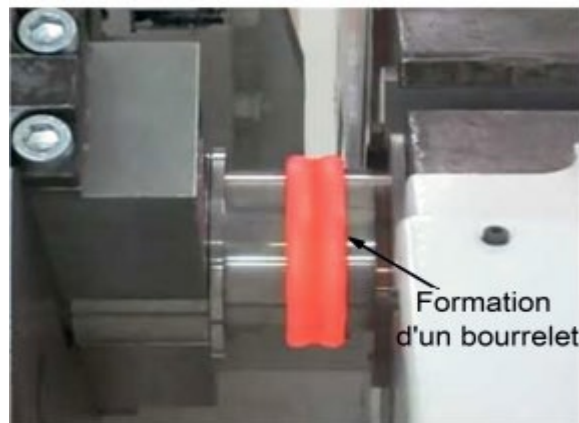


Figure I.3.Interaction des surfaces pendant la phase de friction [6]

- **Phase de Forgeage**

Le forgeage commence dès l'arrêt de la pièce tournante, à ce moment une seconde force axiale est maintenue à un niveau suffisant pour permettre le forgeage du matériau à chaud de part et d'autre de l'interface.

Modes de soudage par friction rotative

Selon la manière dont on exécute la friction, on distingue deux modes de soudage par friction rotative :

- Soudage par friction rotative à entraînement direct.
- Soudage par friction inertielle (Inertia Friction Welding).

Pour la suite, on va parler que du soudage à entraînement direct.

Soudage par friction à entraînement direct

Le soudage par friction à entraînement direct (ou entraînement continu) permis l'association de deux pièces par une jonction, ce type de jonction nécessite l'utilisation d'une machine à entraînement direct, c'est-à-dire le moteur fournit directement un couple de frottement pendant cette phase. Les paramètres essentiels de ce type de soudage sont contenus par deux phases, celle de friction et de forgeage :

Phase de friction	Phase de forgeage
Pression de friction (MPa)	Pression de forgeage (MPa)
Temps de friction(s)	Temps de forgeage(s)
Vitesse de rotation (tr/min)	

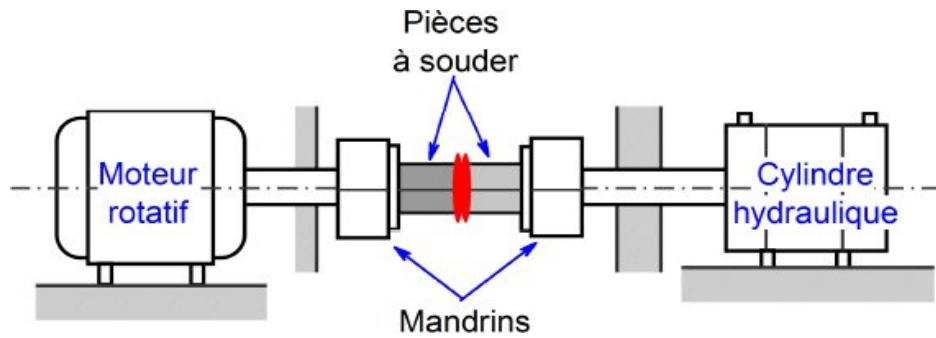


Figure I.4.Processus du soudage par friction rotative à entraînement direct [7]

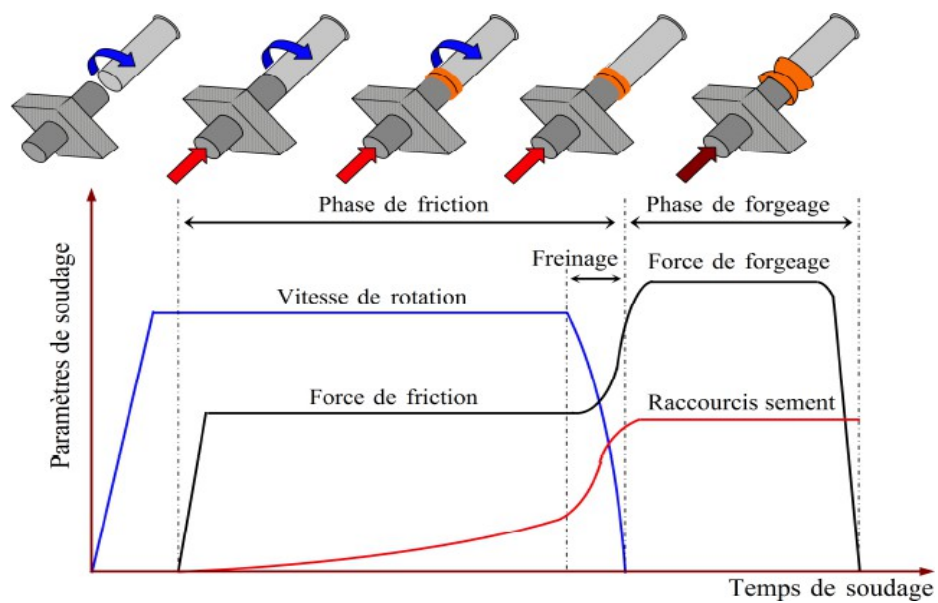


Figure I.5.Variations des paramètres du soudage par friction à entraînement direct [6]



Figure I.6: Pièces soudées par friction rotative [8]

Domaines d'applications du soudage par friction

Les différentes applications permises par le procédé de soudage par friction sont nombreuses et diverses, voici un certain nombre de cas :

- l'aviation et la navigation spatiale:
 - boulons à crochet.
 - Tiges de piston légères.
 - Eléments de boîtes de vitesse.
- La pétrochimie:
 - Brides des valves hydrauliques.
 - Tiges de forage.
- l'industrie automobile:
 - stabilisateurs.
 - soupapes.
 - Pompes à eau.

De plus, le soudage par friction permet l'association de matériaux qui ne pouvant être assemblé par des procédés conventionnels (soudage par fusion).

Avantages du soudage par friction rotative

- Développement des joints de haute qualité et de bonne structure métallurgique,

- Le processus ne nécessite aucune préparation spéciale au niveau des pièces à souder.
- Le procédé est plus rapide que les procédés de soudage conventionnels (par fusion).
- développement de faibles zones plastiques autour de l'interface, en raison du court temps de soudage et une température localisée.
- Possibilité de souder des matériaux dissimilaires.
- Procédé est écologique, sans gaz, ni fumée sans rayonnements.

Limites du soudage par friction rotative

- une des pièces à souder doit avoir un axe de symétrie pour pouvoir être entraînée en rotation autour de cet axe.
- ce procédé ne peut être appliqué sur des matériaux ayant un très faible coefficient de friction, comme la fonte grise, le bronze et le laiton.

Partie 2. Soudage par friction rotative de l'acier Inoxydable austénitique AISI 304L et AISI 316L

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans divers domaines d'applications pratiques telles que les industries nucléaires, chimiques et pétrochimiques [9]. Les aciers inoxydables sont identifiés comme des alliages à base de fer contenant de 8 à 25% de nickel et de 12 à 30% de chrome. Ainsi, les différentes sortes d'aciers inoxydables peuvent être subdivisées en trois types : martensitique, ferritique et austénitique.

Les aciers inoxydables austénitiques représentent le plus grand groupe et sont largement utilisés dans le système de traitement des liquides et les machines hydrauliques en raison de leur excellente résistance à la corrosion, de leur bonne usinabilité, de leur faible coût et de leur soudabilité [10]. Les aciers austénitiques affichent relativement de faibles caractéristiques mécaniques avec une résistance, R_e de l'ordre de 180 à 240 N/mm², qui peuvent être sensiblement améliorées par écrouissage et surtout par addition d'azote, de l'ordre de 0,12 à 0,22 % [11]. L'acier inoxydable est facile à souder, il existe néanmoins une différence selon le type. Les aciers inoxydables austénitiques par exemple, la série AISI 300, est la plus facile à souder que les martensitiques et les ferritiques, il s'agit de la série AISI400.

L'acier inoxydable de la série **AISI 304L** et **AISI 316L**, objet de notre travail est le plus utilisé pour des applications générales, il contient 18 à 20 % de chrome et 8 à 10,5 % de nickel. Grâce au bas niveau de carbone, il est peu sensible à la teneur en carbone libéré pendant le soudage.

II.1. Propriétés de l'acier AISI 304L & AISI 316L

L'acier **AISI 304L** et **AISI 316L** sont les plus utilisés pour des applications générales, par leurs teneurs de 18 à 20% de chrome et 8 à 10,5 % de nickel, ce qui leur confère de bonnes propriétés mécaniques et une bonne résistance à la corrosion, comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau I.1. Propriétés mécaniques de l'AISI304L et l'AISI316L [12]

Aciers Austénitiques	AISI304L	AISI316L
Densité g/cm ³	8.0	7.9
Point de fusion °C	1454	1180
Module d'élasticité (MPa)	1.93105	1.43071
Limite de rendement $\sigma_{0.1}$ (MPa)	≥ 600	≥ 650
Allongement (%)	≈ 47	≈ 48
Micro-dureté moyenne (Hv0.1)	280-286	205-215

Tableau I.2: Limites de composition chimique de l'acier **304L** et **316L** [13]

AISI304L									
Composants	C	Cr	Ni	Mo	N	P	S	Mn	Si
MIN	0	18,0	10	-	-	-	-	-	-
MAX	0,03	20,0	12	-	0,11	0,045	0,015	2,00	1,00
AISI316L									
Composants	C	Cr	Ni	Mo	N	P	S	Mn	Si
MIN	0	17	9	2	0,1	0,045	0,03	0	0,2
MAX	0,03	20	13	3	0,2	0,045	0,03	1,5	1

Essais Destructifs

Un assemblage par soudage doit offrir des garanties optimales de sécurité et d'endurance aux conditions de service. La qualité d'une liaison prend ses racines à divers stades de la construction, c'est-à-dire., avant, pendant et après fabrication.

Lors d'une opération de soudage, les facteurs régissant la qualité des assemblages sont nombreux et complexes, il y a lieu de prévoir trois types de contrôles distincts, en fonction du stade d'intervention, il s'agit d'un contrôle :

- avant soudage,
- pendant soudage,
- après soudage,(destructif, semi-destructif ,non destructif)[13].

Contrôle Destructif

Dans cette partie du texte il sera question d'essais destructifs de traction.

Essai de traction

Parmi tous les essais mécaniques, celui de traction est certainement le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques, telles que le module de d'élasticité, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement à rupture. Son exécution est facile et les résultats obtenus permettent un dimensionnement fiable pour toutes sortes de pièces, allant d'un pignon jusqu'à la structure métallique d'un grand hall, par exemple.

Dans le domaine de la recherche ce type d'essais permette la modification de courbe de traction nominale par une simple correction, cette dernière est connue par le diagramme rationnel. A partir de cette transformation on pourra remonter aux propriétés rationnelles qui se résument en coefficient de résistance (K) et un coefficient d'écrouissage, pour des applications industrielles et pour le contrôle qualité des matériaux et des alliages [14].

Diagramme de traction nominale

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force (F) et l'allongement (ΔL), plutôt que les contraintes et la déformation. L'évolution de la contrainte (σ), en fonction de la déformation peut être symbolisée par un diagramme **figure I.7**.

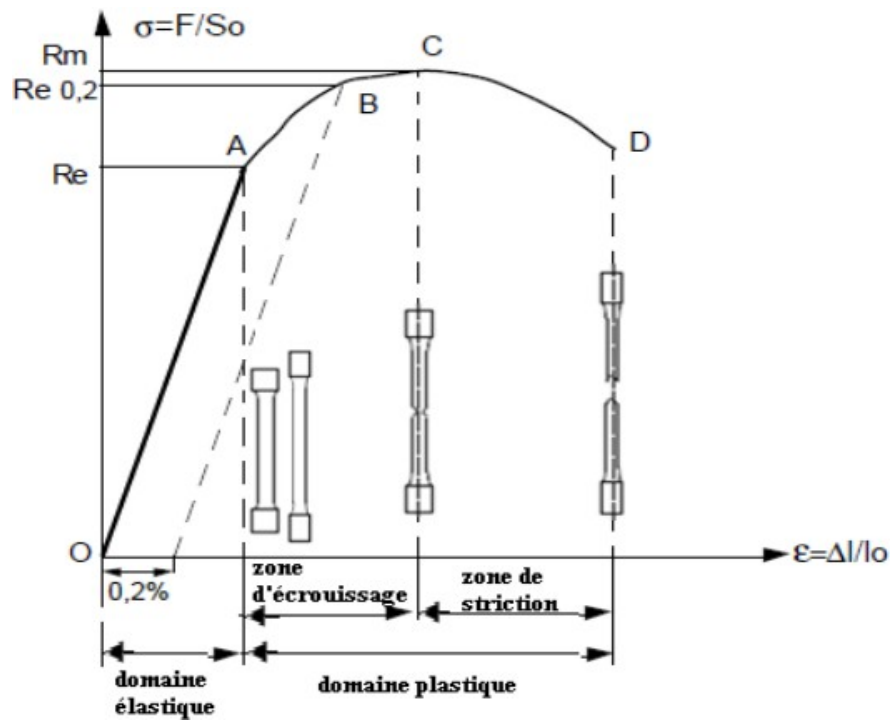


Figure I.7. Diagramme de traction [15]

Caractéristiques obtenues lors d'un essai de traction

- **Module d'Young E (MPa)** : Symbolisé par une constante reliant la contrainte de traction (ou de compression) à la déformation d'un matériau élastique isotrope.
- **Limite d'élasticité Re (MPa)** : Correspond à la contrainte à partir de laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement. C'est la contrainte pour laquelle on mesure une déformation plastique de 0,2%.
- **Résistance ultime, ou contrainte maximum de traction R_m (MPa)** : C'est la contrainte maximale que peut supporter le matériau. Utilisé dans le calcul des organes de sécurité, souvent appelée résistance à la rupture [15].

- **Allongement à rupture A%** : Est une caractéristique sans dimension des matériaux. Elle définit la capacité d'un matériau à s'allonger avant de rompre sous l'effet d'un effort ou d'une contrainte traction, caractérisé par le symbole A%.
- **Striction à la rupture** : Le niveau de déformation générant une striction le matériau perd l'homogénéisation de la contrainte provoquant ainsi une striction au niveau de la section la plus faible de l'éprouvette. C'est le phénomène de l'instabilité plastique la striction [15].

Coefficient de Poisson : Quantifier par le rapport de l'allongement provoquant une démunissions du diamètre pour le cas des barres et une double démunissions, dans le sens latérale et dans l'épaisseur, par conservation de la matière. En notant (ϵ) l'allongement longitudinal et ϵ_l l'allongement transversale, on peut exprimer l'expression du coefficient de Poisson [15, 16, 17, 18].

PARTIE3.ESSAISNON DESTRUCTIFS

Contrôle non destructif

Le contrôle non destructif (CND) est l'ensemble des techniques aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure industrielle sans l'endommager, celui-ci correspond à la détection et la calcification des différents défauts et imperfection qui menace la sécurité de fonctionnement des systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques, ou chimiques. Les phénomènes physiques et les techniques sont multiples : procédés optiques, ressuage, flux de fuites magnétiques, rayonnement ionisant, vibrations mécaniques, contrôle d'étanchéité, procédés électromagnétiques et d'autres applications variées [19].

On parle aussi d'essais non destructifs ou contrôle non destructifs (CND), ce qui évoque plutôt les examens en laboratoire que la qualité industrielle. En ce sens, le CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité et de la santé des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est la détection et la mise en évidence des hétérogénéités, anomalies et défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage

Auquel il est destiné, plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce [20].

Les Contrôles Non Destructifs (CND) permettent, par des méthodes non dommageables (non destructives) de détecter, mesurer, localiser, dimensionner, caractériser des défauts internes et externes d'éléments sensibles et de constater leurs évolutions [21].

Principe du contrôle non destructif

Plusieurs types de CND existent et se répartissent en 3 catégories : les contrôles surfaciques (examen visuel, ressuage, magnétoscopie...), les contrôles volumiques (radiographies, ultrasons...) et les contrôles d'étanchéité.

Le principe de ces méthodes est d'attaquer la pièce à contrôler avec un signal et de recueillir sa réponse qui va nous renseigner sur son état (paramètre physique, anomalie géométrique, hétérogénéité, ...).

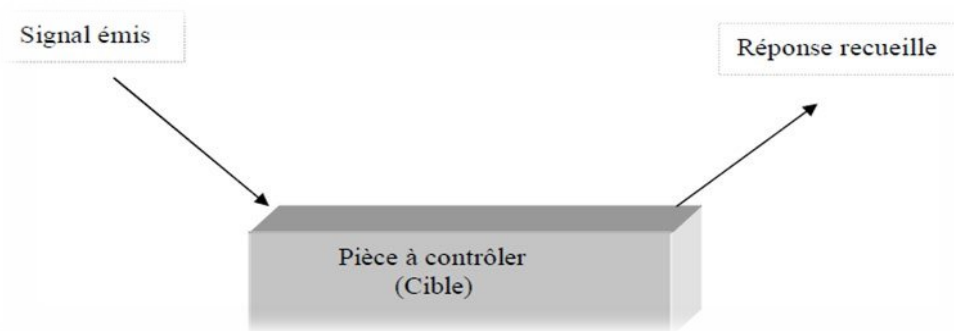


Figure I.8.Principe du contrôle non destructif [22]

Les techniques utilisées dans le CND sont très variées, le choix d'une entre elle peut-être conditionné par un certain nombre de paramètres dont les principaux sont :

- La nature du matériau à contrôler (propriétés physiques).
- l'information recherchée (détection, mesure, dimensionnement du défaut,...).
- l'environnement du contrôle (nature des perturbations externes,...).
- Le type de contrôle à effectuer (pièce mobile, possibilité de contact ou non,...).
- contraintes économiques.

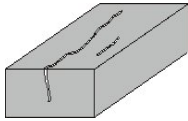
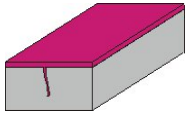
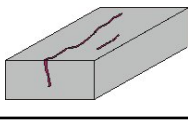
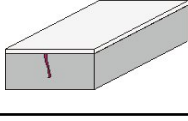
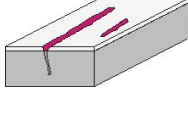
Techniques du CND

On peut citer parmi les méthodes les plus répandues dans l'industrie le contrôle surfacique les suivantes :

Contrôle par ressuage(PT)

Le ressuage est par définition la résurgence d'un liquide (ou d'un gaz) d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement introduit au cours d'une opération d'imprégnation. Prolongement logique de l'examen visuel, cette méthode permet donc de détecter les discontinuités débouchant en surface de la pièce contrôlée sous forme d'indications colorées ou fluorescentes, observées respectivement sur un fond blanc ou sur un fond noir.

Tableau I.3.Etapes de ressuage

1. Préparation de la surface à examiner.		Nettoyage de la surface à examiner à l'aide d'un dégraissant (acétone et solvant).
2. Application des pénétrants.		Application d'un pénétrant coloré qui entre par capillarité dans les discontinuités ouvertes à la surface de la pièce à contrôler.
3. Elimination des pénétrants		Élimination du pénétrant résiduelle (avec de l'eau ou à l'aide d'un chiffon humidifié de solvant).
4. Séchage et application du révélateur		Application d'un développeur.
5. Examen visuel		Le développeur absorbe le pénétrant resté dans les discontinuités se forme une image par contraste de couleur. Après contrôle : nettoyage des surfaces contrôlées à l'acétone ou au solvant.

Contrôle par ultrasons

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans les milieux solides ou fluides. Certaines modifications des caractéristiques du milieu de propagation, telles que les défauts qui, perturbent la progression de l'onde sonore entraînant des phénomènes divers tels que réflexion, réfraction ou atténuation [23]. Les ultrasons sont de même nature que les sons mais de fréquence plus élevée.

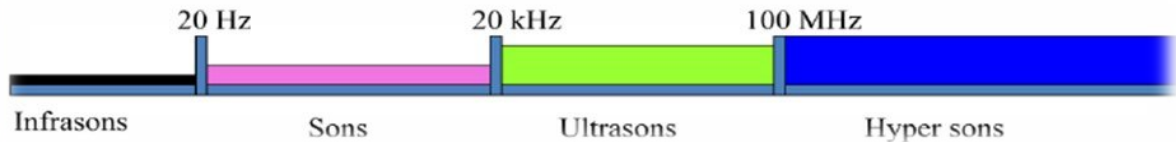


Figure I.9. Schématisation des différentes bandes sonores

Les vibrations sont transmises et reçues par un même capteur appelé transducteur qui comporte un élément piézoélectrique apte à transformer un signal électrique en vibration mécanique et inversement. L'impulsion acoustique émise se propage dans toute la matière et est réfléchiée par tout obstacle se trouvant sur son parcours. Le parcours de l'onde ultrasonore définit le faisceau acoustique, il est directif et limité dans l'espace.

Il peut être utilisé sur pratiquement tout type de matériau. Le contrôle de toute la pièce oblige l'opérateur à déplacer le transducteur qui est un dispositif électronique appelé aussi transducteur sur toute la surface de la pièce à contrôler [24].

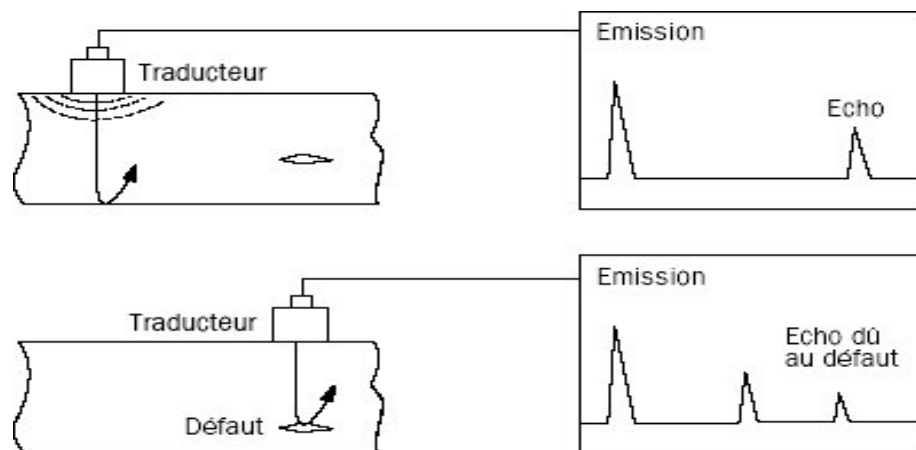


Figure I.10. Principe des ultrasons [22].

Contrôle par radiographie

La radiographie industrielle de rayonnements γ et X est une technique de contrôle non destructif (CND) très utilisée dans le domaine industriel notamment pour le contrôle des soudures, pour à la fois de la location des défauts des matériaux et les nuisances de la corrosion [25]. Deux types de rayons électromagnétiques sont utilisés :

- **Le rayon X:** génère dans un tube radiogène, un appareil électrique qui émet des rayons X lorsqu'il est mis sous tension.
- **Le rayon gamma :** il est généré par des éléments radioactifs (isotopes). Les isotopes les plus fréquemment utilisés sont le cobalt-60, le césium-137 et l'iridium-192 [26].

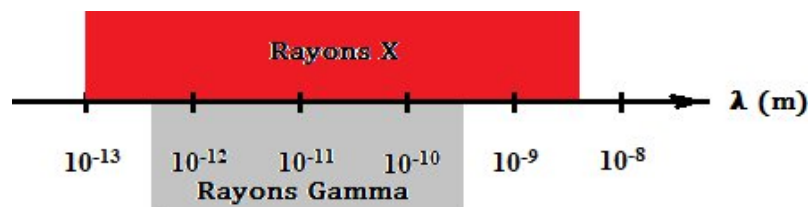


Figure I.11. Longueurs d'ondes des R X et γ [27]

Principe de Radiographie

Ce contrôle est basé sur l'absorption différentielle du rayonnement X ou gamma. Les différences de rayonnement émergeant de la pièce engendreront sur le film "image latente" qui sera ensuite révélée par voie chimique [28].

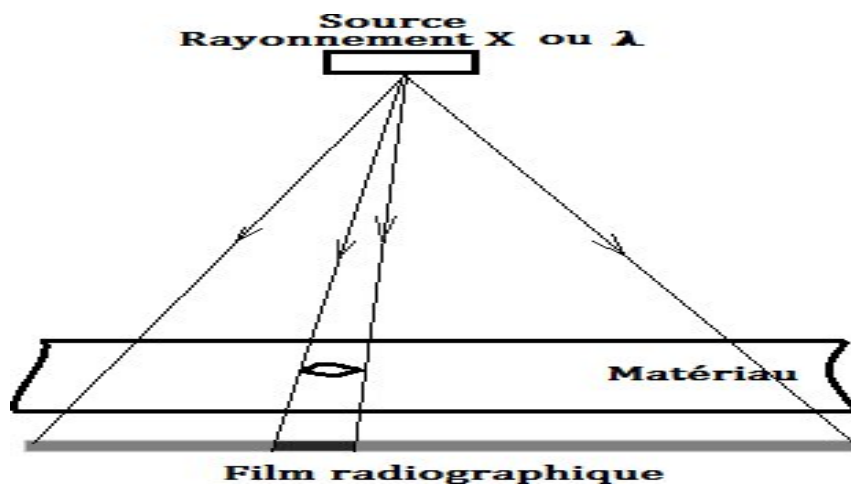


Figure I.12. Impression de l'image du défaut sur le film radiographique [28]

Tableau I.4 : Avantages et Inconvénients des méthodes de CND [21]

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Ressuage	<ul style="list-style-type: none"> - Facile d'emploi - Rapide et sensible - Peu onéreux 	<ul style="list-style-type: none"> - Uniquement sur défauts surfaciques - Bon état de surface nécessaire - Multiples manipulations
Radiographie	<ul style="list-style-type: none"> - Détection sur épaisseur important - Large gamme de matériaux - Traçabilité: film ou vidéo - Bonne reproductibilité 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Accès aux 2 faces - Orientation préférentielle - Méthode à risque pour le contrôleur
Ultrasons	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne résolution (dimensionnement et fissuration) - Résultats rapides - Dimensionnement et localisation - Accessible au TIVFFESSM 	<ul style="list-style-type: none"> - Influence d'état de surface - Utilisation de milieu intermédiaire - Importance de l'orientation des défauts

Chapitre II

Matériels et Méthodes

CHAPITRE2:MATERIELSET METHODES

II. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du matériau utilisé dans cette étude et en particulier les paramètres de soudage. Nous présentons, en ce qui suit, toutes les conditions expérimentales dans lesquelles nous nous sommes placés, la méthodologie choisie, les matériaux, les techniques et l'appareillage utilisé pour mener à bien notre étude.

Opérations de soudage par friction rotative

La genèse du soudage par friction est simple. Au début de l'opération, deux pièces sont mises en contact, un couple résistant aux forces de friction appliquées apparaît et l'énergie qui en résulte est transformée en chaleur provoquant l'élévation de la température jusqu'à sa valeur maximale (inférieure à la température de fusion).

Cette période est dénommée par la première étape de la phase de friction. Par la suite, on assiste à la diffusion d'une partie de la chaleur accumulée le long de la 1^{ère} étape lors de laquelle une quantité de métal plastique commence à être refoulée sous l'effet de la rotation et la pression de friction de telle sorte que le bourrelet caractéristique du soudage commence à se former. Cette période, dénommée par la seconde étape de la phase de friction, responsable en grande partie de la future microstructure du joint soudé. La pièce en rotation est ensuite détachée du mandrin freinée, dure.

Les **figures (II.1, II.2 et II.3)** montrent les étapes de la procédure du soudage par friction rotative :



Figure II.1 Accostage des deux pièces asoudées

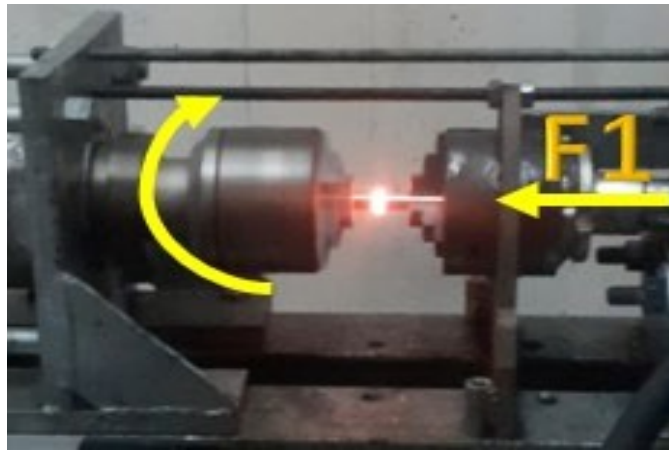


Figure II.2.Résultat de la friction entre la pièce mise en rotation à gauche et la pièce mise en translation axiale $F1$, pour faire l'augmentation de la température autour de l'interface des deux parties.

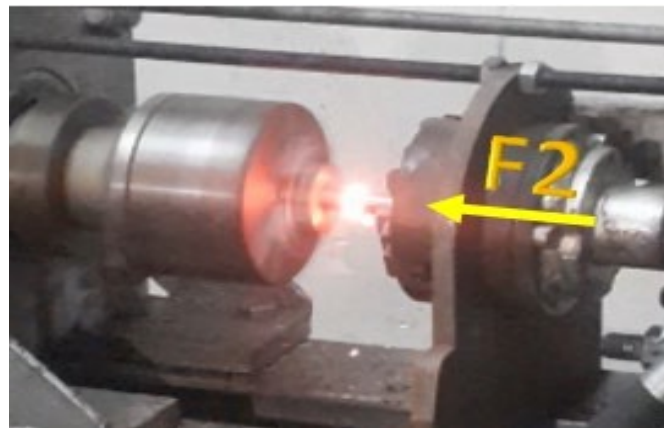
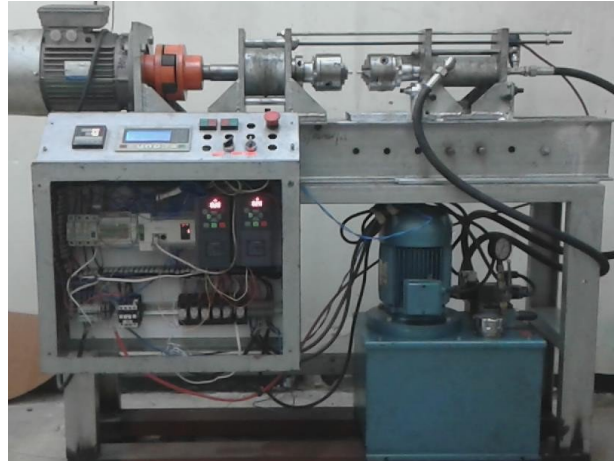


Figure II.3.Diffusion de la chaleur accumulée en rotation pour laisse place au forgeage freinée par l'application d'une force axiale $F2$

La machine de soudage par friction utilisée pour nos opérations de soudage a été conçue et fabriquée au niveau du Laboratoire de Mécanique Avancée (LMA) de l'UHTHB, selon la méthode de « reverse engineering ». La machine de soudage fonctionne par la méthode de la direction directe, les conditions de soudage sont contrôlées par commande numérique, ce qui facilite la bonne maîtrise des conditions de soudage.



Les opérations de soudage sont réalisées sur cette machine de soudage par friction à entraînement direct, **figure II.6**. Cette étude commence par l'optimisation des paramètres de soudage. La pression et le temps de friction à vitesse de rotation constante de 3000 tr/mn, dans le but d'analyser l'effet du temps et de la pression de forgeage sur la qualité du joint. La figure(II.4) montre un exemple d'un joint de soudure obtenu par soudage par friction rotative.



Figure II.4. Profil d'un joint de soudure par friction

Moyens et matériaux utilisés

a) Matériau utilisé

D'un point de vue pratique, nous avons soudé l'acier inoxydable de la série **AISI304L** et **AISI 316L**, ces aciers sont les plus utilisés pour des applications générales, par leur teneur de 18 à 20% de chrome et 10 à 12% de nickel, dont la composition chimique et les caractéristiques mécaniques figurent respectivement dans les **tableaux (I.1) et (I.2)**.

b) Moyens utilisés

Pour toutes nos opérations nous avons utilisé des échantillons de longueur de 45mm et de diamètre 12mm, découpés directement dans des barres de 6m. Après une opération de découpage a été engagée en respectant la planéité des surfaces qui seront misent en contact Le métal de base et la machine de soudage sont représentés respectivement dans les **figures(II.5)** et **(II.6)**.



Figure II.5.A gauche échantillons: avant soudage (métal de base) et à droite :après soudage (éprouvette d'essais)

Paramètres de soudage

Lors de nos opérations de soudage trois temps de friction ont étaient utilisés pour la même pression de friction et pour le temps et la pression de forgeage, qui ce déclines comme suit :

Vitesse de rotation	3000tr/min
Temps de friction	5s
Pression de friction	140 [MPa]
Pression de forgeage	0, 280, 300 [MPa]
Temps de forgeage	0s, 5s, 8s.

Contrôle non destructif

Trois contrôles ont étaient fait sur les joints soudés en comparaison avec ceux faites sur le matériau de base, il s'agit, du ressuage, la radiographie et l'ultrason.

Ressuage

Cette méthode est appliquée dans le but de découvrir les défauts surfaciques autour du joint soudé .Les surfaces des joints doivent-être bien nettoyées avant l'examen en enlevant

tous les impuretés avec un solvant pour un résultat plus précis. Pour cette effet nous avons utilisé cinq produits qui sont respectivement : Solvant / Pénétrant / Révélateur / Eau /Chiffons propres, la **figure (II.6)** représente ces produits :



Figure II.6.Photo du pénétrant et le révélateur

En premier lieu, on applique le pénétrant sur la surface du joint soudé illustré les discontinuités débouchant. Après 15 à 20 min, l'excès de pénétrant est éliminé pour pouvoir séché la surface, puis on applique le révélateur.

L'application du révélateur permet la remontée par capillarité du pénétrant contenu dans les défauts, générant ainsi l'apparition par contraste d'indications colorées sur le fond blanc du révélateur.

II.4.2RadiographieX

L'objectif de l'utilisation de radiographie est toujours la recherche des défauts internes, qui peuvent être nuisibles pour un cordant de soudure, il s'agit de: Pépite de commande / Générateur COMET / Négatoscope (pour interpréter les clichés), voir figures **(II.7, II.8 et II.9)**



Figure II.7.Pépite de commande COMET

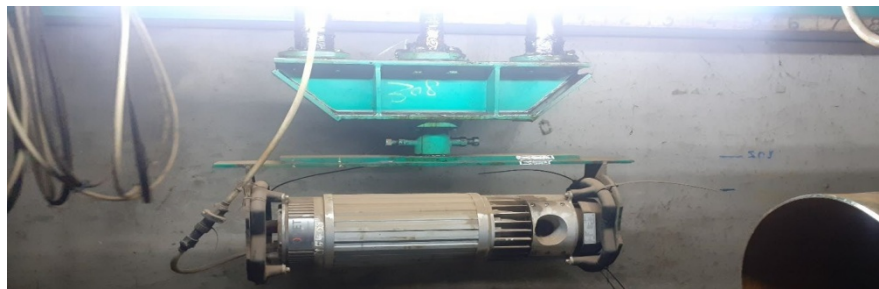


Figure II.8.Générateur COMET



Figure II.9.Négatoscope qui interprète les clichés

L'exposition du récepteur par un faisceau de rayonnement X à travers le matériau, ce dernier absorbe le rayonnement en fonction de la nature et de la densité du matériau, permettant d'obtenir une image en niveaux de gris de la projection du contenu du matériau sur le récepteur. En cas de présence de défaut, ceci engendrera généralement des teintes plus sombres ou parfois plus claires. Ces paramètres se déclinent comme suit :

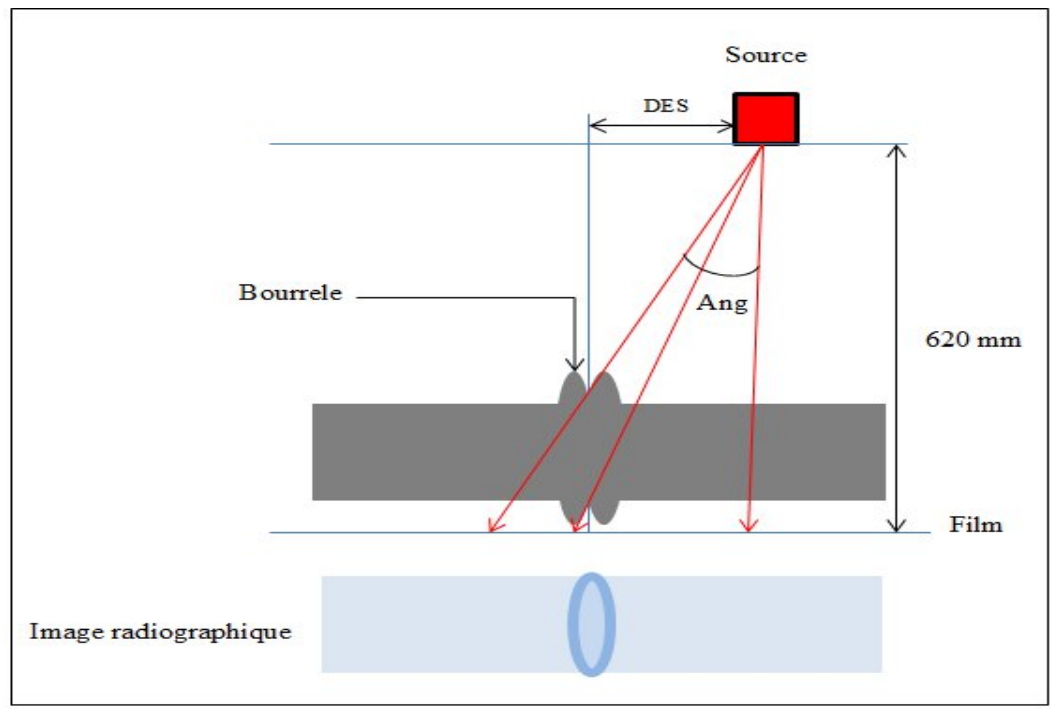


Figure II.10 : Schéma démonstratif de l'application de la radiographie

Tension170KV/**Intensité** 3mA/**Temps de pose**10s/**Distance source/film** 620mm/
Angle entre15et20 degré/**Nombre d'exposition**2 expositions à 90°.

II.4.3.Ultrason

Il existe deux types d'ultrasons, manuel et automatique, ce dernier ne s'applique pas sur les petites pièces, donc on a travaillé avec le type manuel. Le matériel utilisé nécessite un poste ultrasons type impulsion (A-scan), montré dans la **figure (II.10)**. Il s'agit d'un appareil de marque OLYMPUS, de type EPOCH 600 et du numéro de série 110113301 et enfin de fréquence comprise entre 1 et 20 MHz et pour terminer une bouteille d'huile.



Figure II.11.Poste ultrasons type impulsion

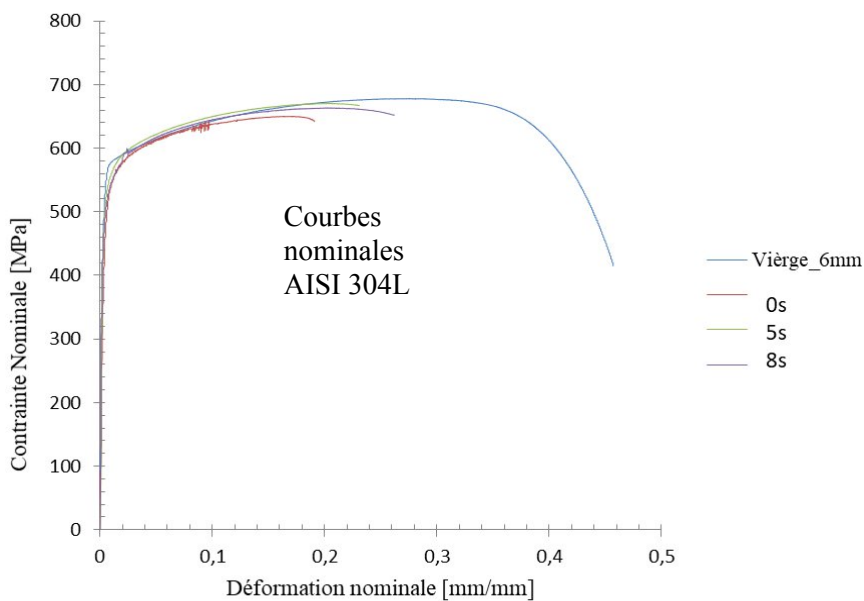
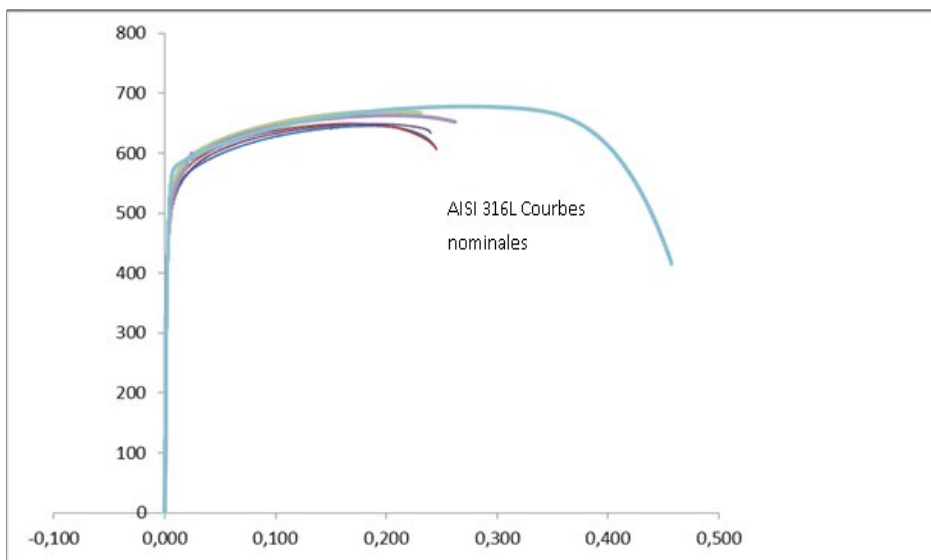
En premier lieu, on applique l'huile sur l'interface du transducteur et la pièce examinée, l'élément piézo-électrique du transducteur engendre des vibrations mécaniques qui se propagent

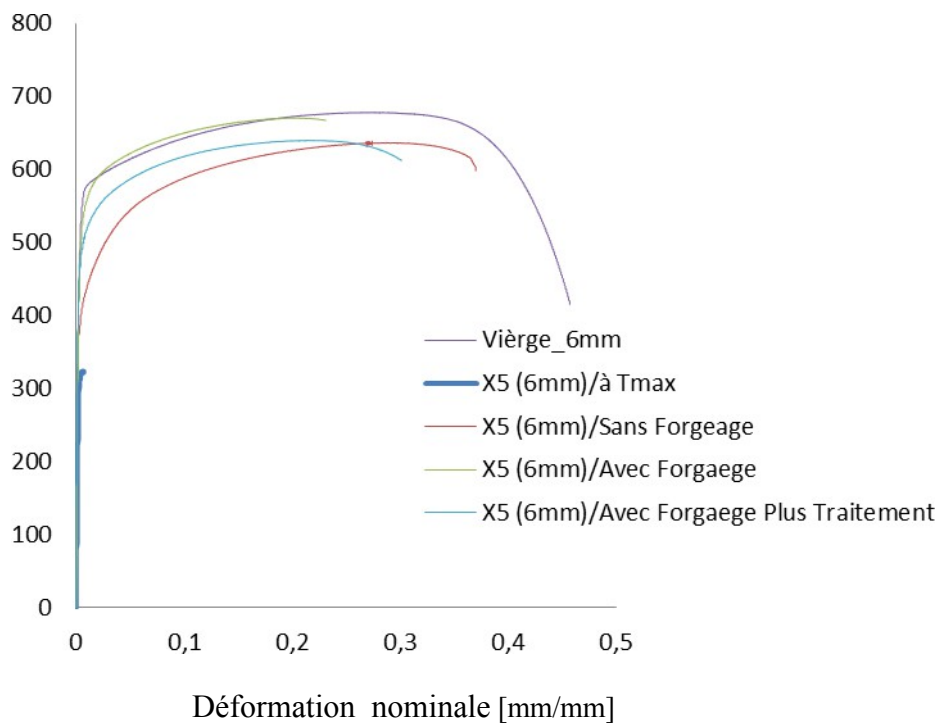
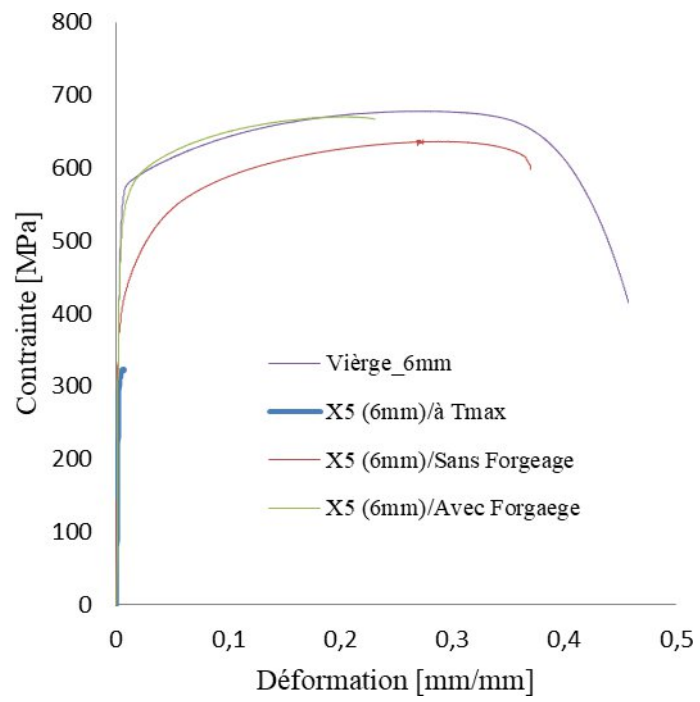
dans la section de la pièce en se réfléchissant sur les faces. Une partie du faisceau acoustique est interceptée par le défaut et renvoyé vers le traducteur qui convertit la vibration en signal électrique. L'œil observe sur l'écran de visualisation un écho caractéristique apparaissant à une distance donnée sur la base de temps, il est alors possible de détecter la présence du défaut, d'évaluer sa position et son étendu.

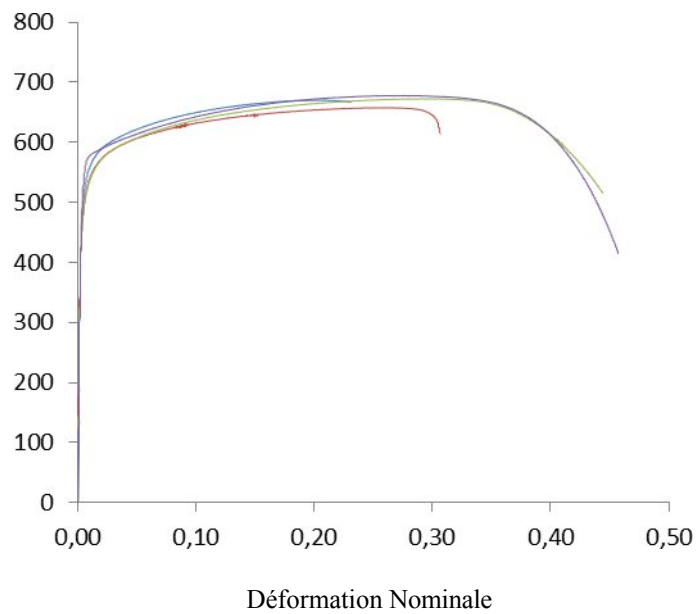
Des essais de traction ont été conduits sur des éprouvettes usinées dans le matériau vierges dans les pièces soudées on vue de localiser pour les différents cas la zone de rupture et le rapport du quottions, limite élastique R_e résistance ultime R_m .

Nous avons réalisé la série d'essais de traction afin d'identifier la zone de rupture.

COURBES DE TRACTION NOMINALE

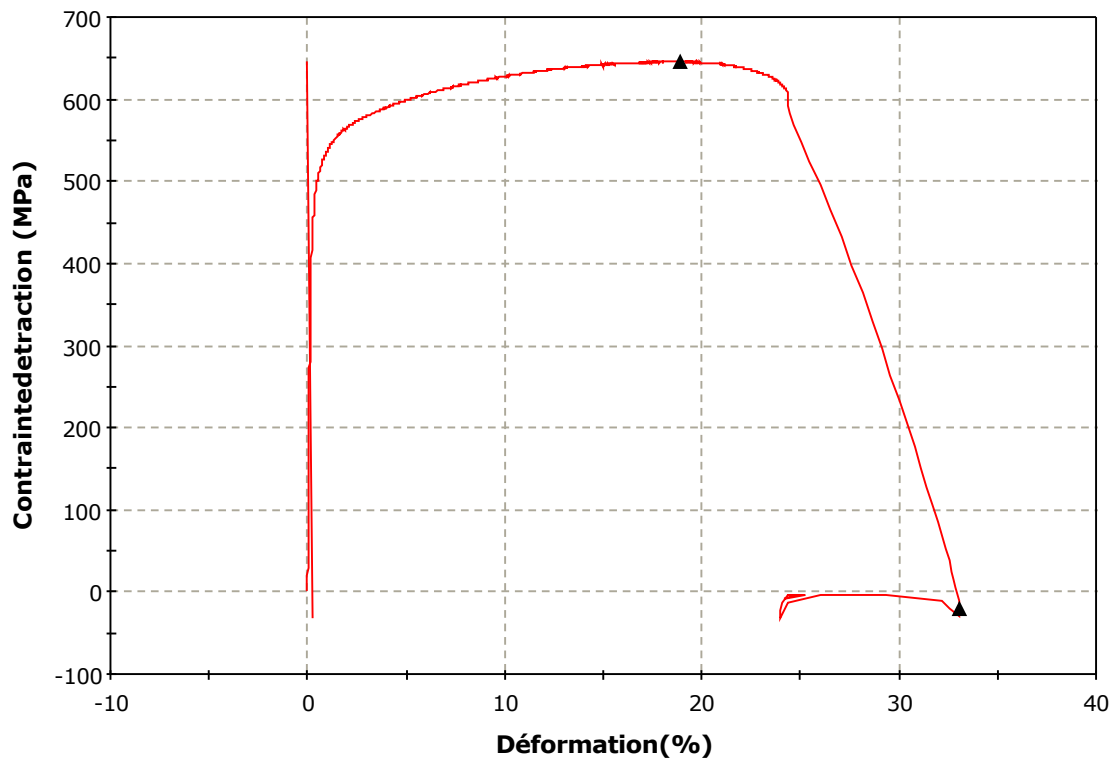






Entrées texte : Comment	AISI316L (8mm)
Entrées numériques: Humidité(%)	60,00
Entrées numériques: Température (deg C)	16,00
Dimension : Géométrie	Circulaire
Dimension: Diamètre	6,08mm
Dimension: Longueur	19,500mm
Essai: Vitesse1	0,00160 /s
Fin d'essai: Action	Arrêter
Find'essai: Critère1	Déplacement
Find'essai: Findel'essai1	-

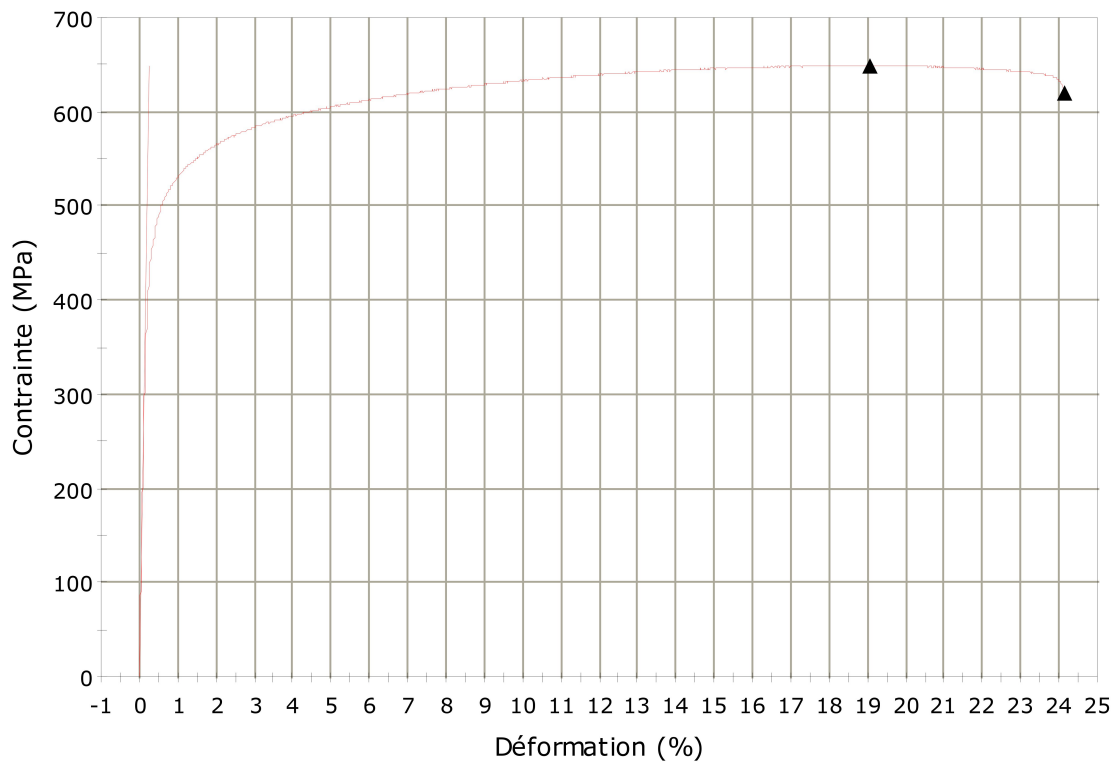
Contrainte (déformation)



Charge Max (kN)	Contrainte max. (MPa)	Déformation à charge max (%)	Déformation Max (%)
18,753	645,913	18,885	24,5

Entrées texte: Comment	AISI316L (8mm)
Entrées numériques: Humidité(%)	65,00
Entrées numériques: Température (deg C)	20,00
Dimension: Géométrie	Circulaire
Dimension: Diamètre	8,18mm
Dimension: Longueur	19,500mm
Essai: Vitesse1	0,00160 /s
Fin d'essai: Action	Arrêter
Find'essai: Critère1	Taux de charge
Find'essai: Findel'essai2	-

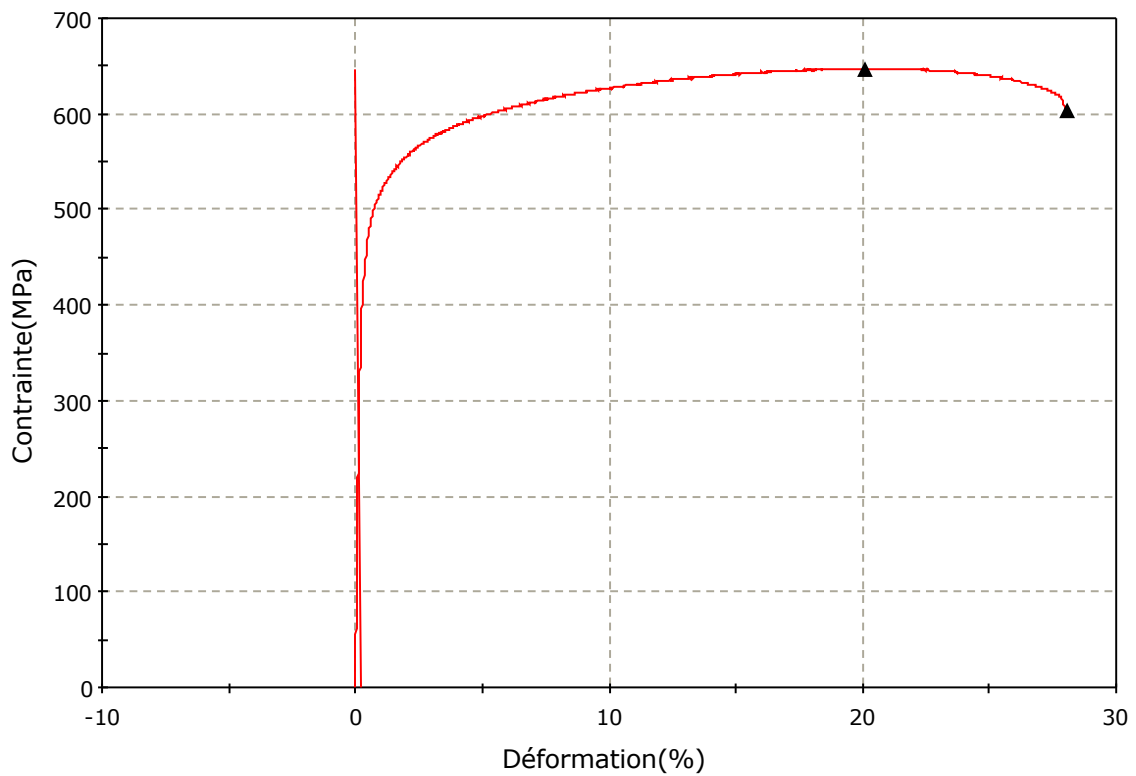
Contrainte (déformation)



Charge Max (kN)	Contrainte à charge Max (MPa)	Déformation à Charge Max. (%)	Déformation Max. (%)
34,118	649,212	19,074	24,168

Entrées texte: Comment	AISI316L (8mm)
Entrées numériques : Humidité(%)	65,00
Entrées numériques: Température (degC)	20,00
Dimension: Géométrie	Circulaire
Dimension: Diamètre	8,14mm
Dimension: Longueur	19,500mm
Essai : Vitesse1	0,00160 /s
Fin d'essai: Action	Arrêter
Fin d'essai: Critère1	Taux de charge
Find'essai:Findel'essai2	-

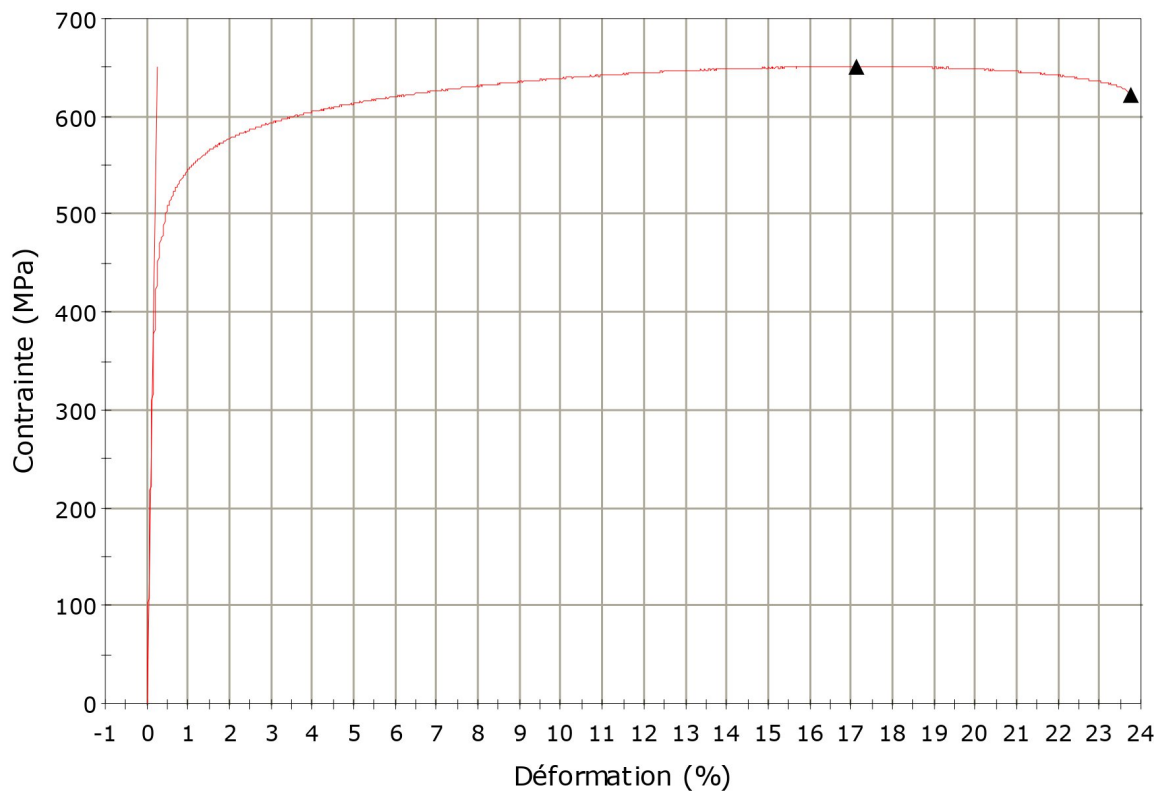
Contrainte (déformation)



Charge Max (kN)	Contrainte à charge Max (MPa)	Déformation à Charge Max. (%)	Déformation Max. (%)
33,687	647,322	20,072	28,038

Entrées texte: Comment	AISI316L (8mm)
Entrées numériques : Humidité(%)	65,00
Entrées numériques : Température (degC)	20,00
Dimension: Géométrie	Circulaire
Dimension : Diamètre	8,24mm
Dimension: Longueur	19,500mm
Essai: Vitesse1	0,00160 /s
Fin d'essai: Action	Arrêter
Find'essai: Critère1	Taux de charge
Find'essai: Findel'essai2	-

Contrainte (déformation)



Charge Max (kN)	Contrainte à charge Max (MPa)	Déformation à Charge Max.(%)	Déformation Max. (%)
34,736	651,373	17,156	23,749

Chapitre III

Résultats

Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter l'ensemble des résultats obtenus du contrôle destructif et non destructif et nous présentons les différents types de défauts observés dans les pièces soudées pour les différentes conditions de soudage. On va discuter les résultats obtenus et les commenter suivis par une conclusion générale qui clôturera ce chapitre pour donner un sens au présent chapitre basé sur des résultats expérimentaux rigoureux.

Opérations de soudage par friction sur l'acier AISI304L&AISI316L

Dans ce travail, cinq opérations de soudage ont été réalisées pour analyser avec et sans forgeage, trois valeurs de pression de forgeage ont été retenues (0, 280 et 300 MPa) et un temps de friction (0, 5 et 8s) montré dans le **tableau III.1**. Le test de contrôle non destructif a été initialement réalisé sur les pièces destinées aux opérations de soudage, puis sur les pièces soudées, c'est-à-dire sur le joint soudé, avec et sans le bourrelet. Les échantillons soudés sont montrés dans la **figure (III.1)**, le **tableau III.1** regroupe les résultats obtenus.

Tableau III.1. Conditions d'opérations de soudage

Effet du temps de frictionsurAISI304L					
Conditions	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Vitesse de rotation [tr/min]	3000				
Pression de friction [MPa]	140				
Temps de friction[s]	5				
Pression de forgeage [MPa]	0	280	300	280	300
Temps de forgeage[s]	0	5	5	8	8
Effet du temps de friction sur AISI316L					
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Vitesse de rotation [tr/min]	3000				
Pression de friction [MPa]	140				
Temps de friction[s]	4	5	7	9	11
Pression de forgeage [MPa]	280				
Temps de forgeage[s]	5				



de(1) à (5)

de(a) à (e)

Contrôle non destructif

Il existe différents types de défauts quand il s'agit d'un cordant de soudure, ces défauts peuvent être détectés et répertoriés par les techniques du contrôle non destructif. Ce chapitre vise les méthodes de contrôle non destructif (CND), on peut citer, le ressuage, les ultrasons et la radiographie.

Contrôle Par Ressuage

Le contrôle par ressuage des cinq joints, concernant l'AISI 316 L révèle une absence des défauts débouchant en surface, pour les temps de friction indiqués, **figure III.1.A.B.**



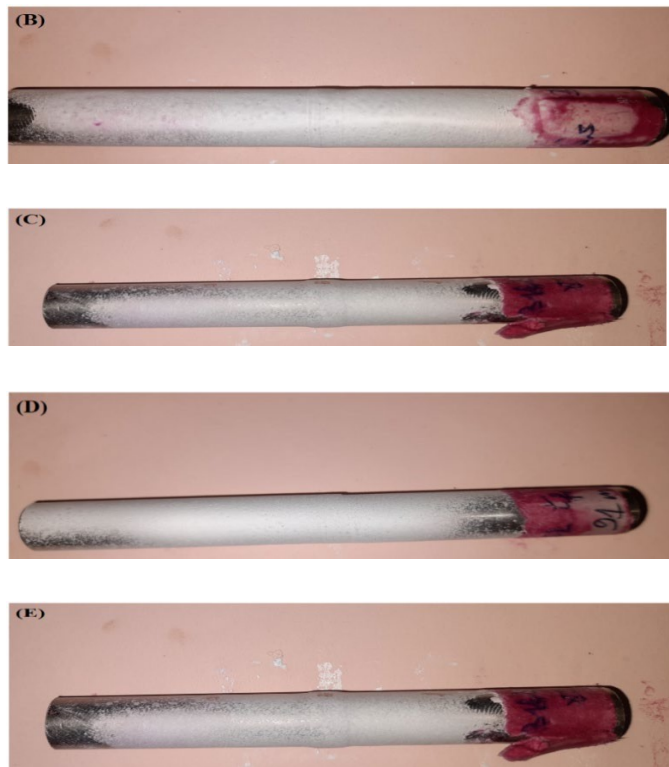


Figure III.7A: Contrôle des joints par ressage, conditions (A, B, C, D et E)

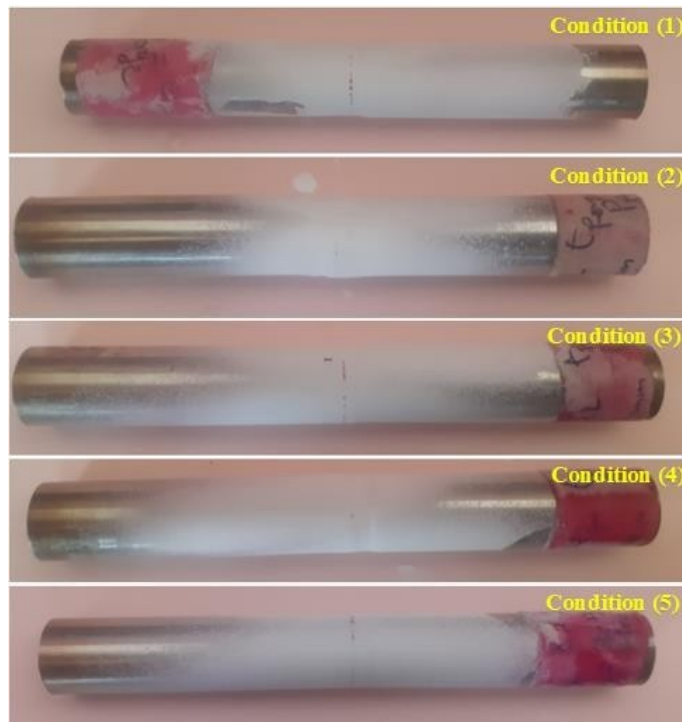


Figure III.1B: Contrôle par ressage des joints, conditions (1, 2, 3,4et5)

-Rayon X

Les figures III.1àIII.5, montrent les clichés obtenus parle négoscopie pour les cinq

Conditions de soudage. Ce contrôle est visuel par changement de la couleur au niveau du joint soudé, sur une zone limitée. Si la couleur vire vers une couleur différente, cela veut dire que cette zone contient des défauts, d'ordre volumique par pénétrations.

Nous tenons à signaler que le contrôle de qualité des joints soudés obtenus par rayons X, ont été réalisés aussi sur les AISI 316L ; **Figure III.7.**

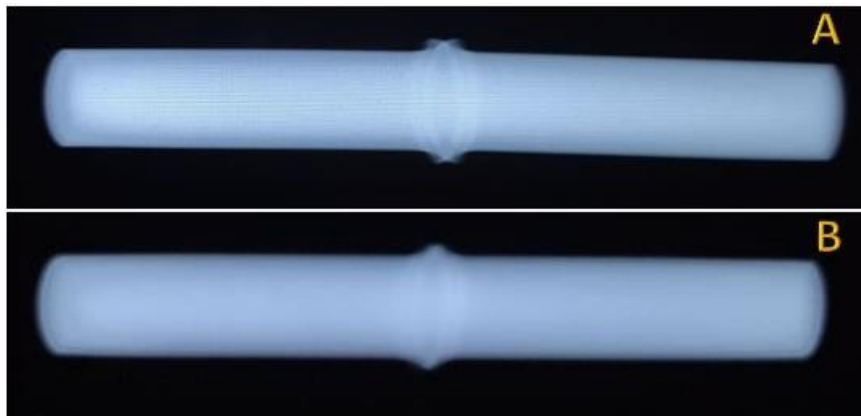


Figure III.2.Contrôle par rayon X de la pièce(1)Face A, Face B

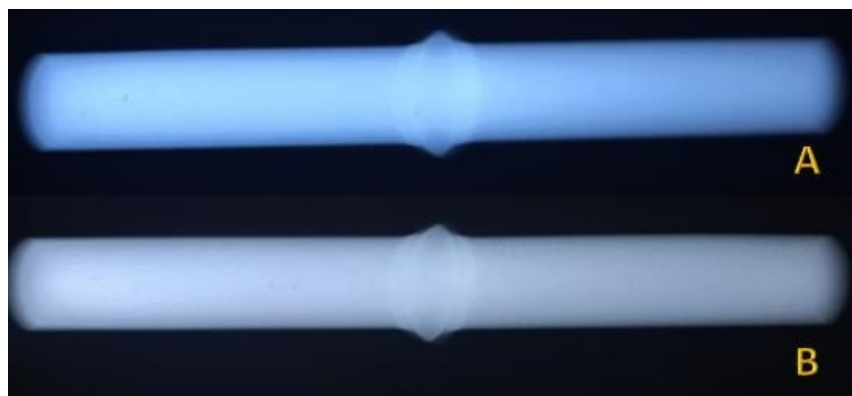


Figure III.3.Contrôle par rayon X de la deuxième pièce Face A, Face B

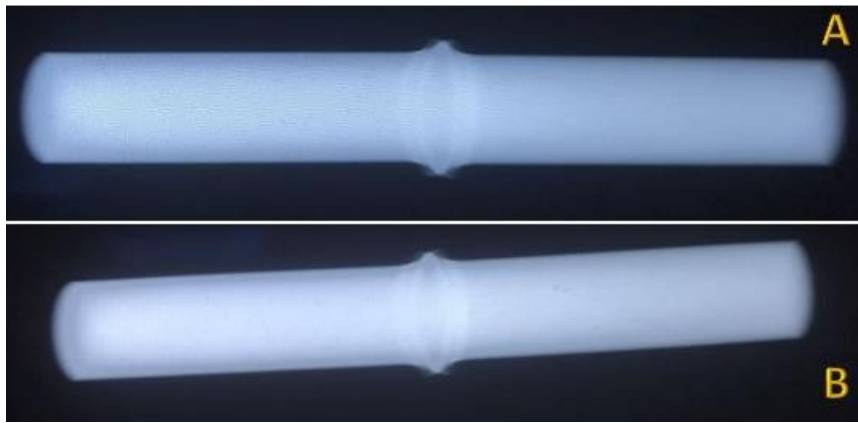


Figure III.4.Contrôle par rayon X de la troisième pièce FaceA, FaceB

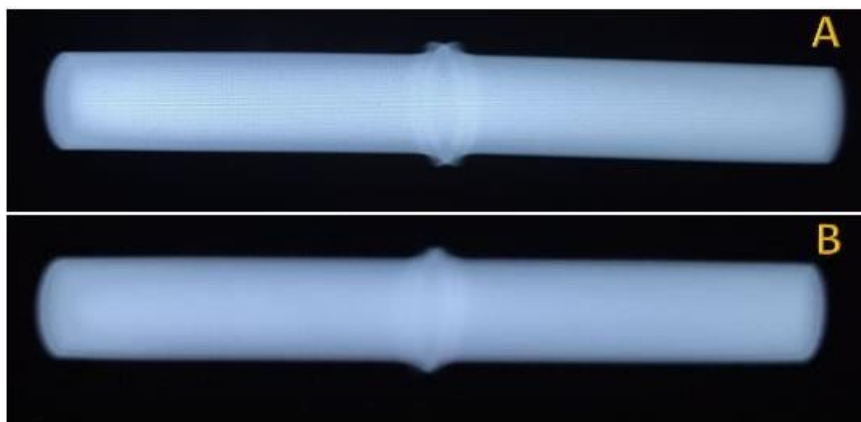


Figure III.5.Contrôle par rayon X de la quatrième pièce Face A, Face B

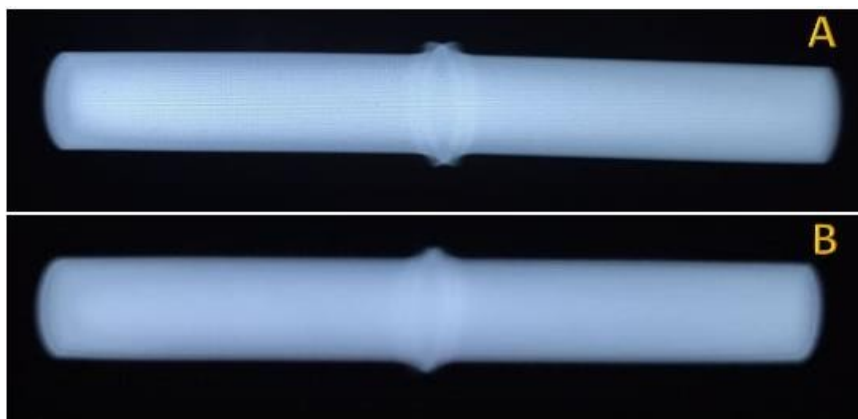


Figure III.6.Contrôle par rayon X de la cinquième pièce Face A, Face B

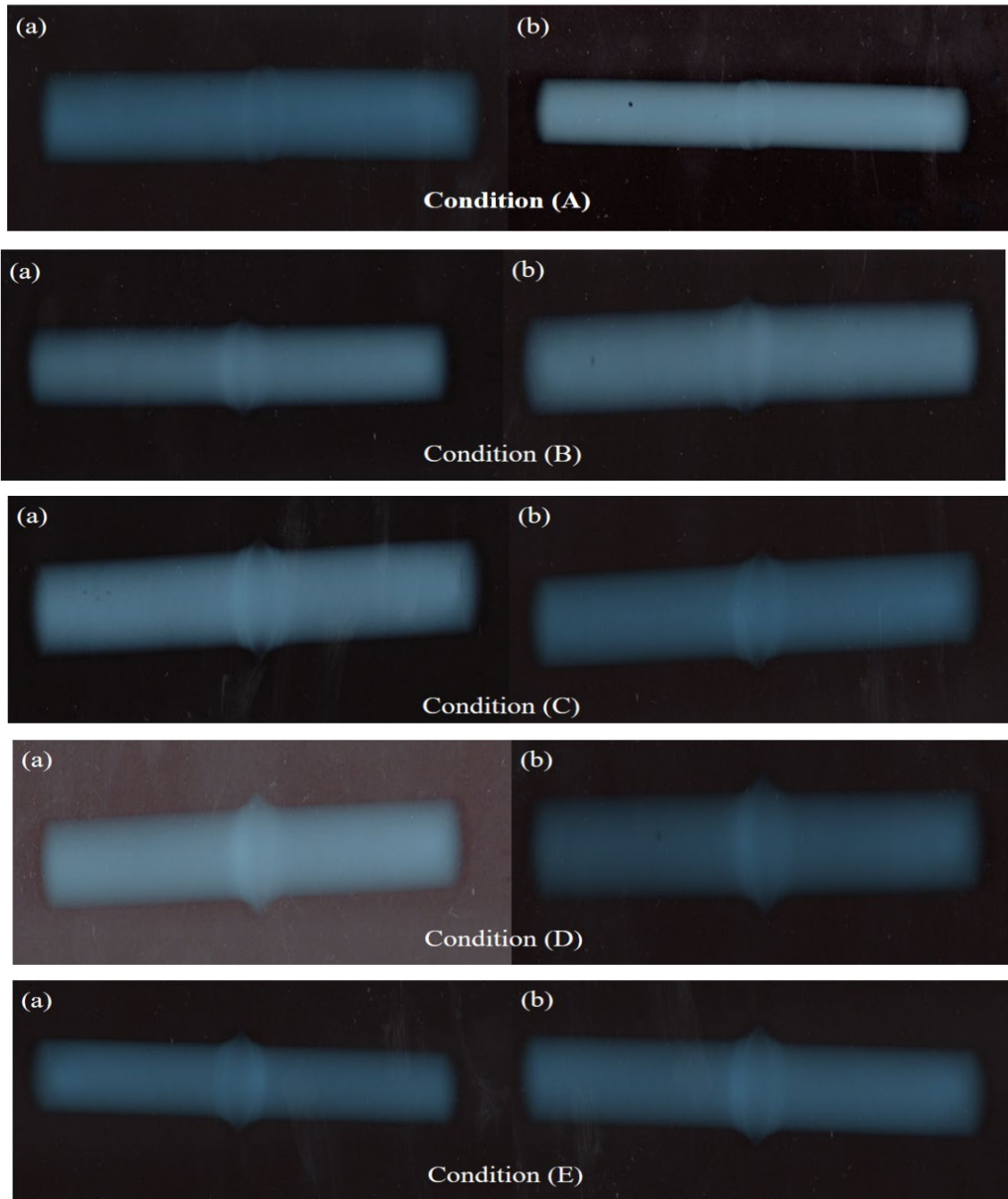


Figure III.7:Contrôle par radiographie des joints A, B, C, soudés, conditions D et E)

Observations: Sur ces images nous constatons la présence de défauts post-examen par rayons X, qui se traduit par une zone où la couleur est plus claire ou bien plus foncée. L'utilisation de cette technique sur l'ensemble des joints soudés par friction rotatif montre qu'aucun défaut n'apparaît pour les cinq conditions, **figure III.7**, et le résultat montre que ce procédé génère moins de défauts volumiques macroscopiques.

: Ultrason

Cet examen est aussi visuel, l'apparition de pics entre le pic de départ et le pic du fond signifie l'existence d'un défaut à une distance montrée sur l'écran du poste de l'ultrason, si l'amplitude du pic est plus grande alors le défaut est plus grand et le contraire est vrai. Les figures suivantes montrent les résultats obtenus sur par l'appareil d'ultrason sous forme de pics :

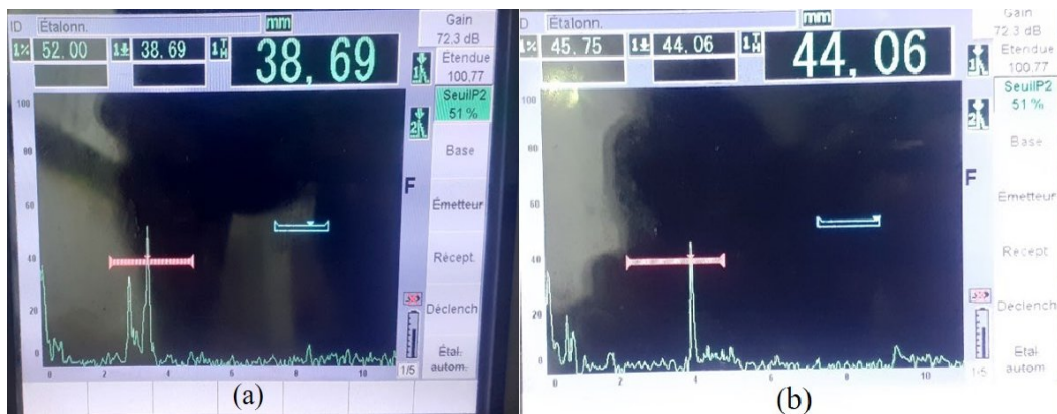


Figure III.8.Condition(1),(a)avec bourrelet et(b)sans bourrelet



Figure III.9.Condition(2), (a)avec bourrelet et(b) sans bourrelet



Figure III.10.Condition(3), (a)avec bourrelet et(b) sans bourrelet

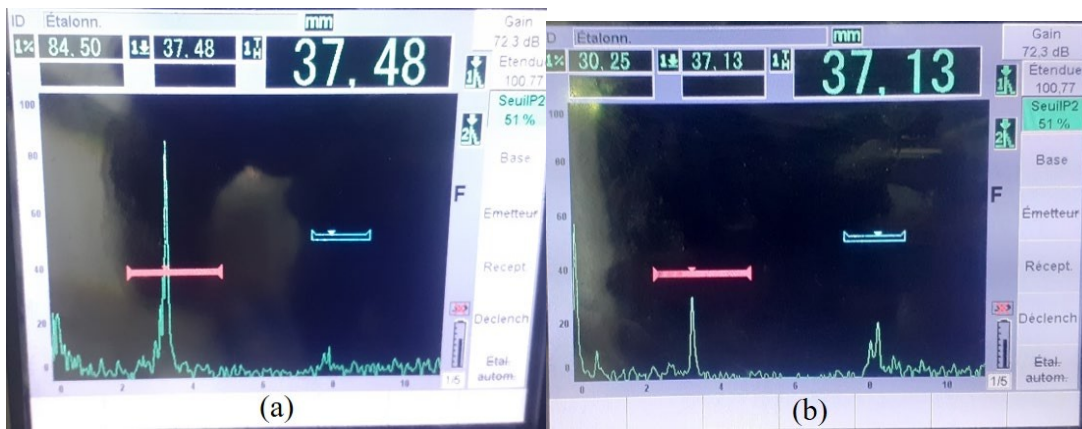


Figure III.11.Condition(4), (a)avec bourrelet et(b) sans bourrelet

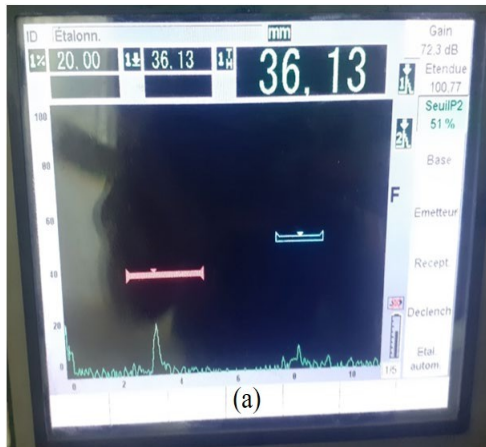


Figure III.12.Condition(5), (a)avec bourrelet et(b) sans bourrelet



Figure III.13: Contrôle par ultrason de la condition(A), (a) avec bourrelet et(b)sans bourrelet

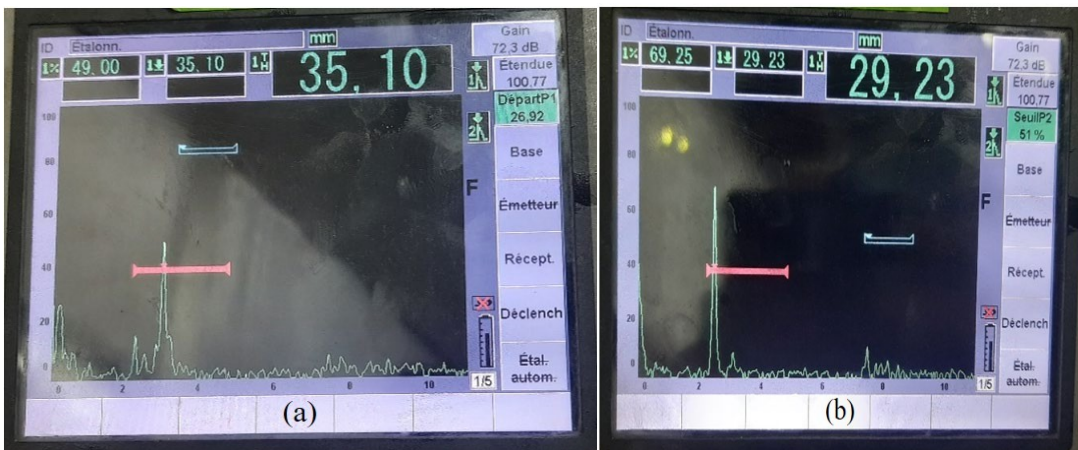


Figure III.14: Contrôle par ultrason de la condition(B), (a)avec bourrelet et(b)sans bourrelet

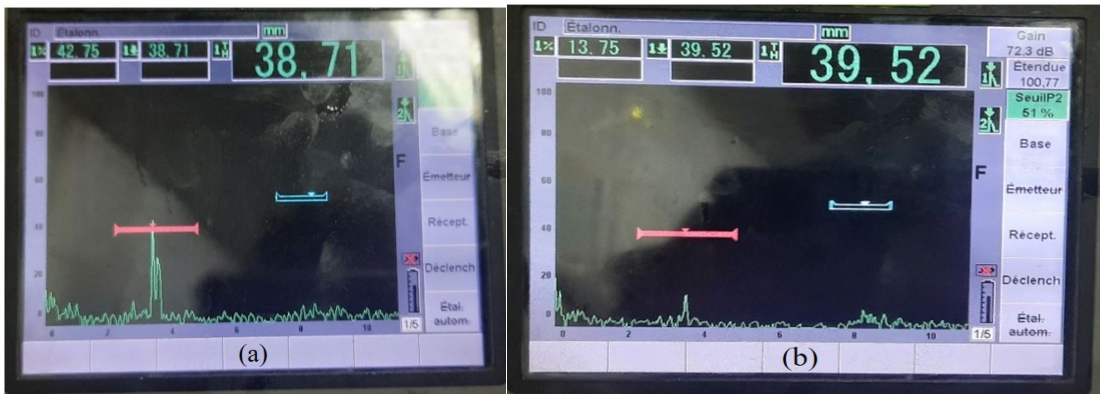


Figure III.15: Contrôle par ultrason de la condition(C), (a)avec bourrelet et(b)sans bourrelet

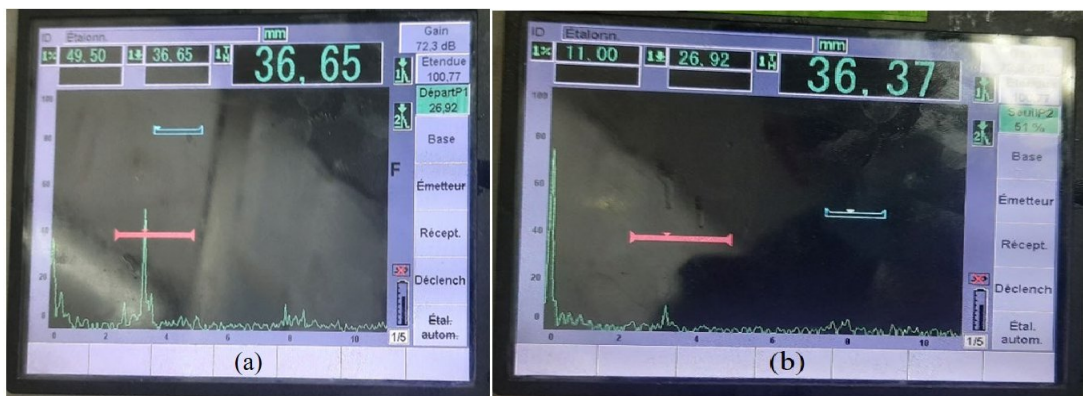


Figure III.16: Contrôle par ultrason de la condition(D), (a)avec bourrelet et(b)sans bourrelet

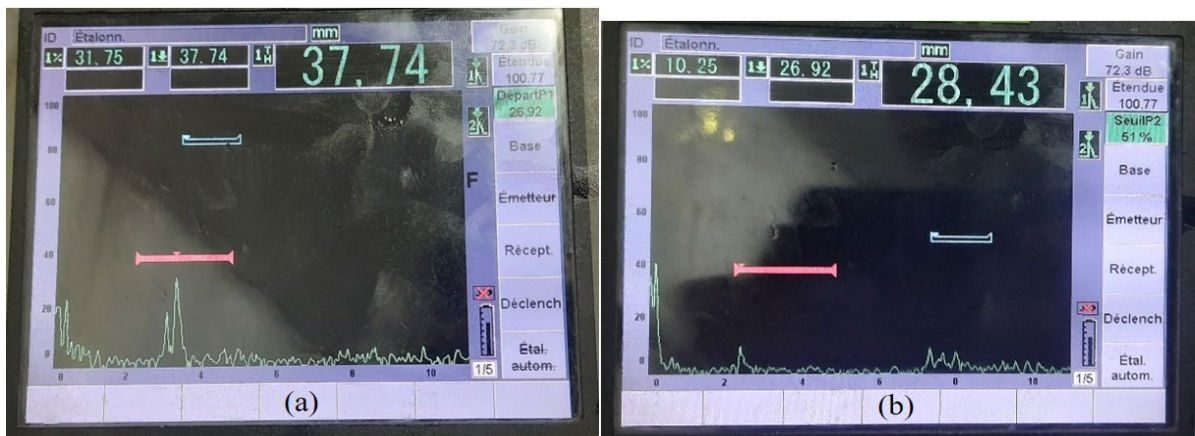


Figure III.17: Contrôle par ultrason de la condition(E), (a)avec bourrelet et(b) sans bourrelet

Les pièces avec bourrelet montrent une apparition de deux pics adjacents pour les cinq conditions. Ce résultat est due peut être à la discontinuité qui existait aux alentours du bourrelet, ce qui fait donner une impression d'une présence d'un défaut. De plus, l'intensité du pic est quasiment la même pour tous les cas. Donc, l'examen avec bourrelet ne donne pas des informations fiables, **figures III.12-14**.

L'analyse des pièces sans bourrelet montre une apparition d'un pic pour les cinq conditions. L'intensité du pic est maximale et supérieur au seuil pour les deux premières conditions (A et B), c.-à-d. les pièces soudées avec un temps de friction de 4 et 5s respectivement, les **figures III.13-14**. Puis l'intensité du pic diminue en fonction du temps de friction pour les trois dernières conditions où le temps de friction égale à **7, 9 et 11s**, respectivement.

Conclusion

Dans ce travail, l'objectif est double, il s'agit en premier lieu de l'effet du temps de la phase de friction ET en second lieu l'effet de deux temps de la phase de forgeage, sur la qualité de soudure. Pour ce faire, les procédés du Contrôle Non Destructif (CND) ont été utilisés sur l'ensemble des joints. Deux applications ont été réalisées sur deux aciers austénitiques de la famille **AISI 304L** et **316L**. Les résultats du contrôle par ressuage montrent des discontinuités surfaciques suite à l'utilisation du liquide de ressuage. En générale cette technique est plus facile à utiliser est moins coûteuse par rapport aux autres techniques, comme l'ébrasons et les rayons X, mis a par, le ressuage fait apparaitre :

- l'absence des défauts pour les cinq conditions de A à E, concernant l'**AISI 316L**.
- Concernant le **AISI 304L**, la non application du forgeage, la soudure montre des défauts surfaciques de la pièce (1), d'où l'impotence de cette phase.
- l'apparition de certains défauts sur le joint pour les conditions (3) et (5), peut être due à l'augmentation de la pression du forgeage.

Suite à l'analyse par ressuage, qui montre l'existence de certains défauts, nous avons procédé sur mêmes échantillons par une analyse par rayons X, ce dernier nous a permis de conclure que le soudage par friction rotatif produit moins de défauts volumiques macroscopiques selon les conditions de soudage de l'acier AISI 304, ce dernier ne produit pas de défauts macroscopiques.

Une troisième analyse été décidée, il s'agit de ultrasons, ce dernier montre que la taille du défaut augmente lorsque :

- le temps de friction est plus court, de l'ordre 4 et 5s; par contre pour les trois dernières conditions, avec un temps de 7, 9 et 11s, la taille du défaut est très petite.
- Le cas sans forgeage (condition 1) présente la taille de défaut la plus importante
- le rôle de la pression du forgeage à un effet très significatif sur la diminution de la taille d'un défaut, il disparaît pour les conditions (3) et (5).

Il est préférable de souder l'acier AISI 316L avec les trois conditions (C), (D) et (E) pour minimiser la taille et le nombre de défaut.

Chapitre IV

Interprétations

CHAPITRE 4

Résumé

L'objectif principal de ce travail est d'analyser de durcissement structural par effet de soudage par friction directe sur deux matériaux austénitiques de la série **AISI 304L** et **AISI 316L**, séparément (Soudage similaire) puis combinés (soudage mixte). Les paramètres de soudage par friction rotative tels que la vitesse de rotation a pression appliquée (frottement et forgeage) et le temps de maintien ont été sélectionnés.

Ils étaient respectivement de **3000 tr/min**, **280** et **300 MPa** et **5s**, à l'exception du temps de maintien de la phase de friction, trois périodes ont été appliquées de **7, 9 et 11s**. Une quarante d'opérations de soudage et une trentaine d'essais de traction nominale post-soudage normalisés ont été réalisés, dans le seul but, d'aboutir aux courbes rationnelles. La microstructure de chaque état de joint soudé a été analysée et comparée les unes aux autres.

Les courbes rationnelles vont nous permettre, de procéder par une modélisation analytique classique pour quantifier l'effet du soudage sur le comportement à l'écroutissement des deux aciers inoxydables. Pour atteindre cet objectif, les résultats des essais de traction ont été utilisés. Quatre lois constitutives bien connues ont été opérées, ce sont la loi de **Ludwick**, la loi d'**Holomon**, la loi de **Swift** et la loi de **Ludwigson**. Ensuite, à travers les résultats de traction, l'identification des paramètres d'écroutissement pour ces modèles. Il est reconnu que les lois de **Ludwik** et de **Ludwigson** donnent de meilleures prédictions pour les deux métaux de base, considérant que, d'autre part, la loi de Swift donne de meilleures prédictions par rapport aux autres lois, cette dernière décrit fidèlement le comportement d'écroutissement de deux combinaisons, celle du **AISI 304L** et **AISI 316L**. Enfin, celle de **Ludwigson** est la plus appropriée, selon nos résultats pour l'AISI 316 L.

A travers ce travail, l'intérêt est d'analyser l'effet de l'érouissage, généré par le soudage par friction rotative directe (RFW), sur deux matériaux de la série **AISI**, à savoir le **304L** et le **316L**. Par ce travail on s'intéresse à l'évolution de la contrainte d'écoulement et la ductilité post-soudage. A cet effet, une étude expérimentale basée sur une quarantaine d'opérations de soudage et une trentaine d'essais de traction post-soudage standardisés a été réalisée dans le but principal d'identifier les paramètres d'érouissage, par l'utilisation de quatre lois de comportement bien connues, qui sont la loi de **Ludwik**[11], la loi de **Hollomon** [12], la loi de **Swift** [13] et enfin la loi de **Ludwigson** [14].

Ensuite, une analyse via ces quatre lois analytiques a été menée en utilisant plusieurs combinaisons d'opérations de soudage, sur des joints obtenus par l'utilisation de matériaux similaires et combiné (mixte), c'est-à-dire différents, afin de quantifier le niveau de dégradation de certaines propriétés mécaniques et en particulier la contrainte d'écoulement et la ductilité, en faisant varier la température. A notre connaissance, peu de travaux ont été réalisés sur le comportement à l'érouissage et son évolution post-soudage par friction directe, dans cette trajectoire **Kumar et al** [15] utilisent quatre température, en plus de ambiante, 550, 600 et 650°C, pour montrer que les propriétés mécaniques de l'acier Super 304HCu se dégradent par la réduction d'un niveau de la température. En utilisant la loi de **Hollomon**, les prédictions des résultats obtenus montrent que l'érouissage se manifeste sur deux étapes.

De même, **Kashyap et al** [16, 17, 18] en associant l'intervalle de la température de 21 à 900°C, à des essais de traction réalisés sur l'AISI 316L, en faisant varier la vitesse de déformation de 10^{-5}s^{-1} à 10^{-3}s^{-1} , ses auteurs montrent qu'il existe une présence de deux à trois taux de déformation distincts. De même, **Samuel et al** [18, 19, 20], arrivent à la même conclusion, par l'utilisation de résultats d'essais de traction réalisés sur l'AISI 316L et l'AISI 316LN, préalablement laminés à froid.

Par l'utilisation de deux lois de comportement, celles de **Hollomon** et de **Ludwigson**. Ses auteurs concluent que le comportement post-traitement peut être correctement décrit par la loi de **Ludwigson**, confirmé par les résultats d'essais de traction sur l'**AISI 316L** et l'**AISI 316LN** laminés à froid.

1. Résultats

Essais de traction nominale

L'opération de soudage par friction rotative* (RFW) entre deux surfaces misent en contact génère autour de l'interface un flux de chaleur, où le premier échantillon est fixe mise en rotation et le deuxième se déplace linéairement sous l'effet d'une force axiale. Le mouvement des deux pièces de part et d'autre fait augmenter la température pour atteindre les 1000°C, dans certaines conditions, liée aux deux surfaces en friction, la conductivité de la matière utilisée et le diamètre utilisé.

Ce niveau de température ramène la matière solide autour de l'interface à l'état pâteux. Naturellement le frottement diminue, la température commence à baisser à l'air libre sous l'effet de la rotation. Suivi d'un arrêt de rotation, annonçant le début de la phase de forgeage, créant immédiatement, une nouvelle zone de déformation par contact, accentuant la consommation de la matière et donnant forme définitive du bourrelet, **figure 1**.

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine d'essai universelle INSTRON 5500 avec une capacité de charge de ± 100 kN. L'ensemble des tests ont été effectués dans les mêmes conditions de soudage, sous une vitesse de déformation quasi-statique de $1,6 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$. Quelle que soit la configuration du joint, les éprouvettes ont été découpées dans le sens axial selon la spécification standard de l'ISO 6892-1:2009 (F), un diamètre effectif de 6 mm a été retenu, **figure 2**, la ligne de l'interface du joint est placée au centre de l'éprouvette cela a permis l'utilisation d'un extensomètre, mise de part et d'autre de l'interface du joint. Les courbes de traction nominale ont été enregistrées en contrainte - déformation, concernant le métal de base et les joints soudés, par l'utilisation du **AISI 316**, du **AISI 304**, **figure 2**. Les propriétés mécaniques post-soudage de ces deux métaux sont résumées dans le **tableau 1**, chaque test a été répété de fois.

Figure2:Exemple de la courbe traction nominale d'opération de soudage par friction

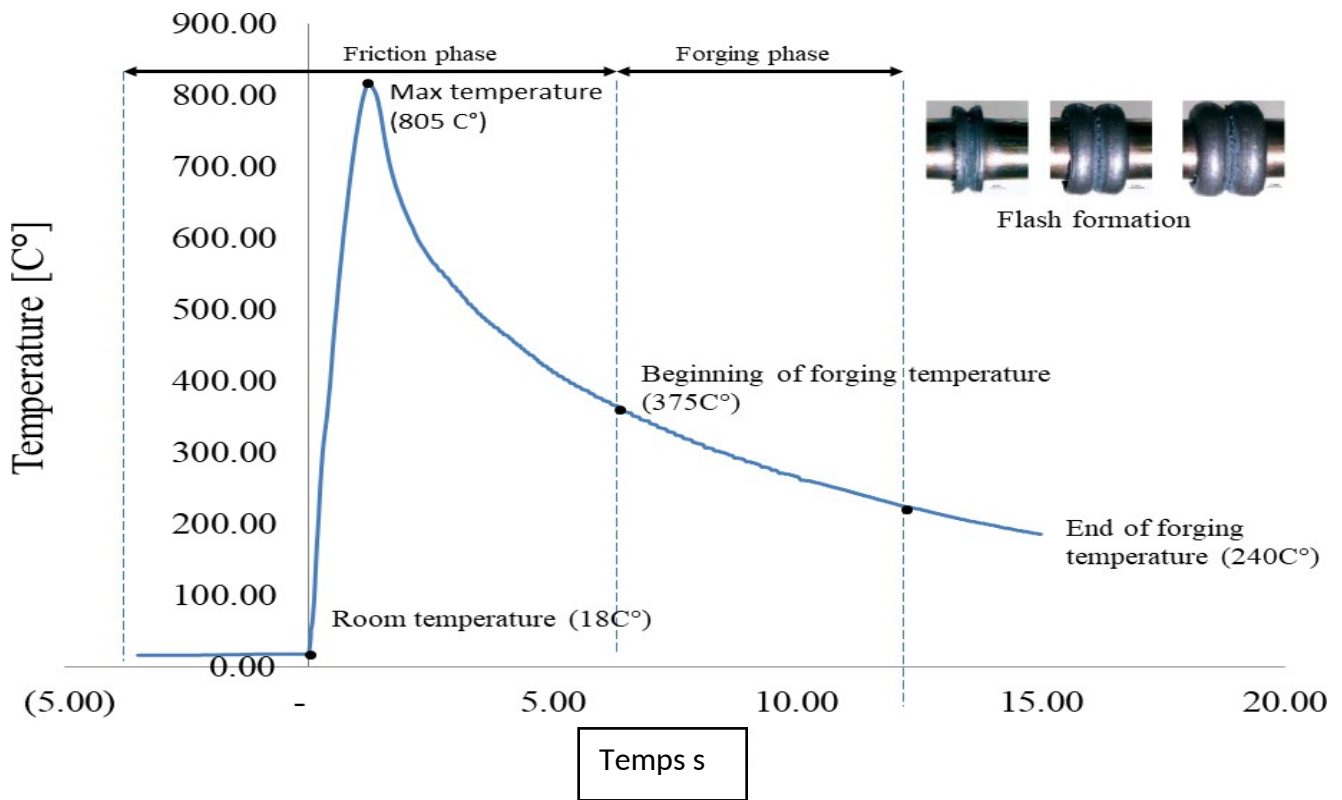
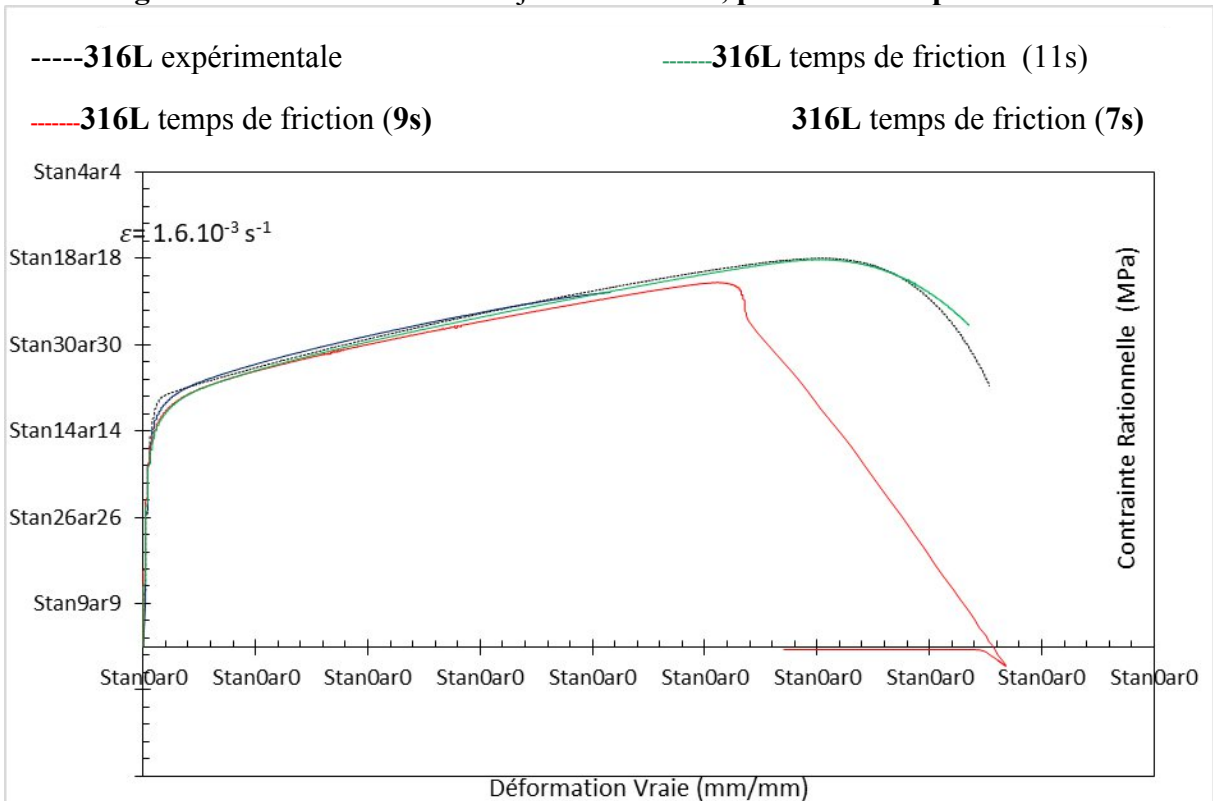


Figure3a: Essais de traction du joint AISI316L, pour trois temps de friction



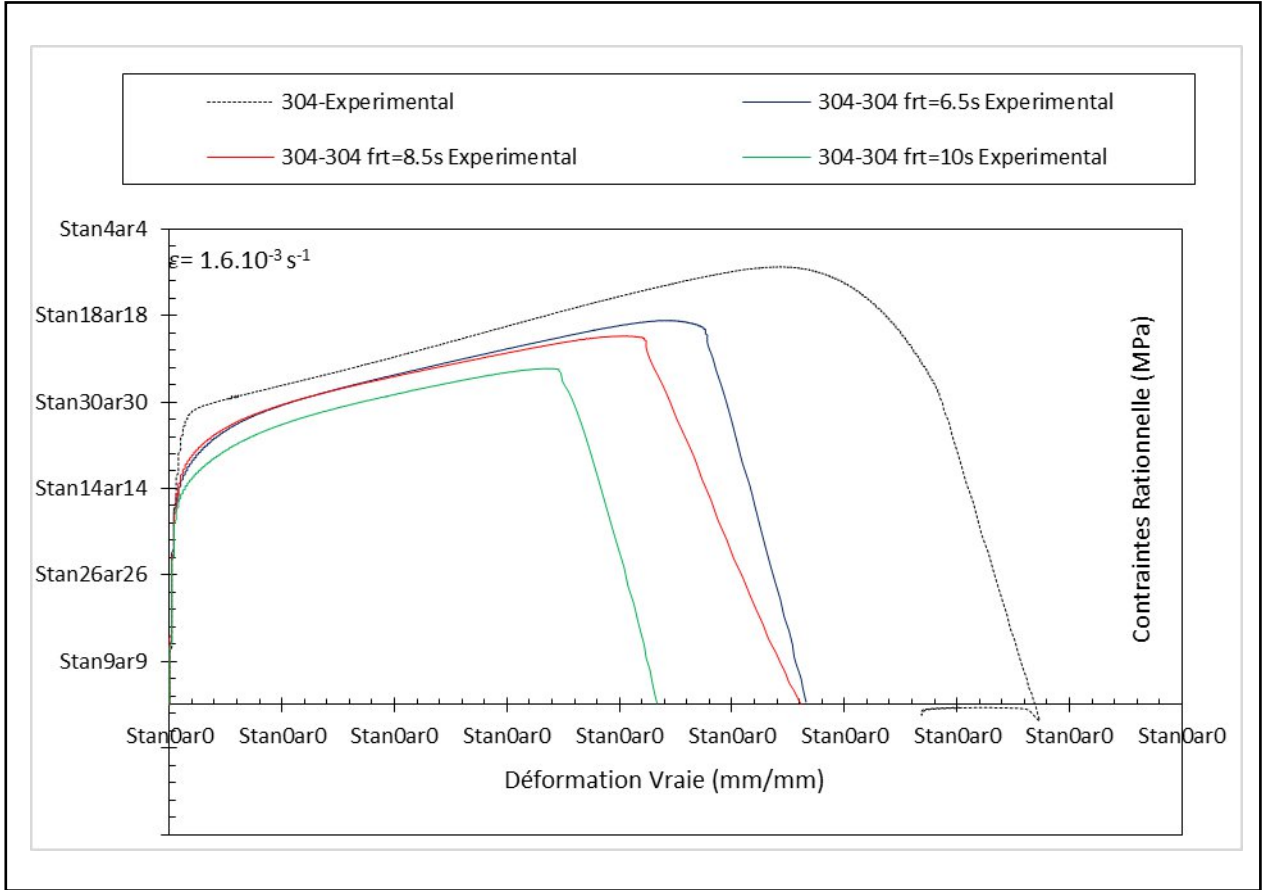


Figure 3b : Essais de traction du joint AISI 304L, pour trois temps de friction & matériau de base

Tableau1:Propriétés mécaniques post-soudage des deux métauxAISI304L etAISI316L

AISI304L	618.74	0.005	781.41	0.468
AISI316L	541.47	0.005	678.19	0.457
AISI304L				
pdf.=0	499.59	0.004	718.11	0.327
pdf.=280 MPa	502.91	0.004	703.68	0.324
pdf.=300 MPa	450.19	0.003	661.83	0.242
AISI316L				
tdf.= 7s	476.52	0.004	672.90	0.444
tdf.= 9s	482.43	0.004	658.07	0.468
tdf.= 11s	500.69	0.004	670.63	0.231

tdf. Temps de friction

Identification des paramètres des lois de durcissement

Pour décrire l'effet du temps de la phase de friction sur le comportement du joint soudé, on a préféré d'utiliser quatre lois de comportement parmi les plus anciennes, ces quatre lois se présentent comme suit :

Loi de Ludwik:

$$\sigma = \sigma_0 + K_L \varepsilon_p^{n_L} \quad (1.1)$$

$$\ln(\sigma - \sigma_0) = \ln(K_L) + n_L \ln(\varepsilon_p) \quad (1.2)$$

Loi de Hollomon:

$$\sigma = K_H \varepsilon_p^{n_H} \quad (2.1)$$

$$\ln(\sigma) = \ln(K_H) + n_H \ln(\varepsilon_p) \quad (2.2)$$

Loi de Swift:

$$\sigma = K_S (\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^{n_S} \quad (3.1)$$

$$\ln(\sigma) = \ln(K_S) + n_S \ln(\varepsilon_0 + \varepsilon_p) \quad (3.2)$$

Loi de Ludwigson:

$$\sigma = K_1 \varepsilon_1^{n_1} + \exp(K_2 + n_2 \varepsilon_p) \quad (4.1)$$

$$\sigma_1 = K_1 \varepsilon_1^{n_1} \quad (4.2)$$

$$\Delta = \exp(K_2 + n_2 \varepsilon_p) \quad (4.3)$$

Avec:

σ : Contrainte Rationnelle

σ_0 : Contrainte Seuil

K: Coefficient d'Ecrouissage.

ϵ_0 : Déformation Seuil

ϵ_p : Déformation Plastique

n_L, n_H, n_S : Coefficients d'écrouissage respectivement de Ludwik, de Hollomon et de Swift.

K_1, n_1 : Coefficients de résistance et d'écrouissage de Hollomon.

K_2, n_2 : Coefficients de résistance et d'écrouissage de Ludwik.

La première loi utilisée pour décrire le comportement mécanique des métaux lors de l'écrouissage est la loi de **Ludwik** utilisée à partir de l'année 1909 exprimée par **l'équation 1.1**, avec :

σ_0 , la contrainte seuil, déterminée à partir d'un essai de traction, symbolisée par K_L et n_L obtenue par régression linéaire en traçant la courbe de **l'équation 1.2**, illustrée sur la **figure 4**. L'utilisation de ce modèle sur les deux métaux de base, soudés ou non soudés, montre un bon ajustement pour les deux métaux de base et essentiellement pour **AISI 316L** ; en revanche, un mauvais ajustement est noté pour les trois autres métaux post-soudés. La meilleure correspondance est enregistrée pour la combinaison **AISI 316L**, voir **tableau 2**. Pratiquement la loi de **Ludwik** donne de meilleurs résultats pour les grandes déformations.

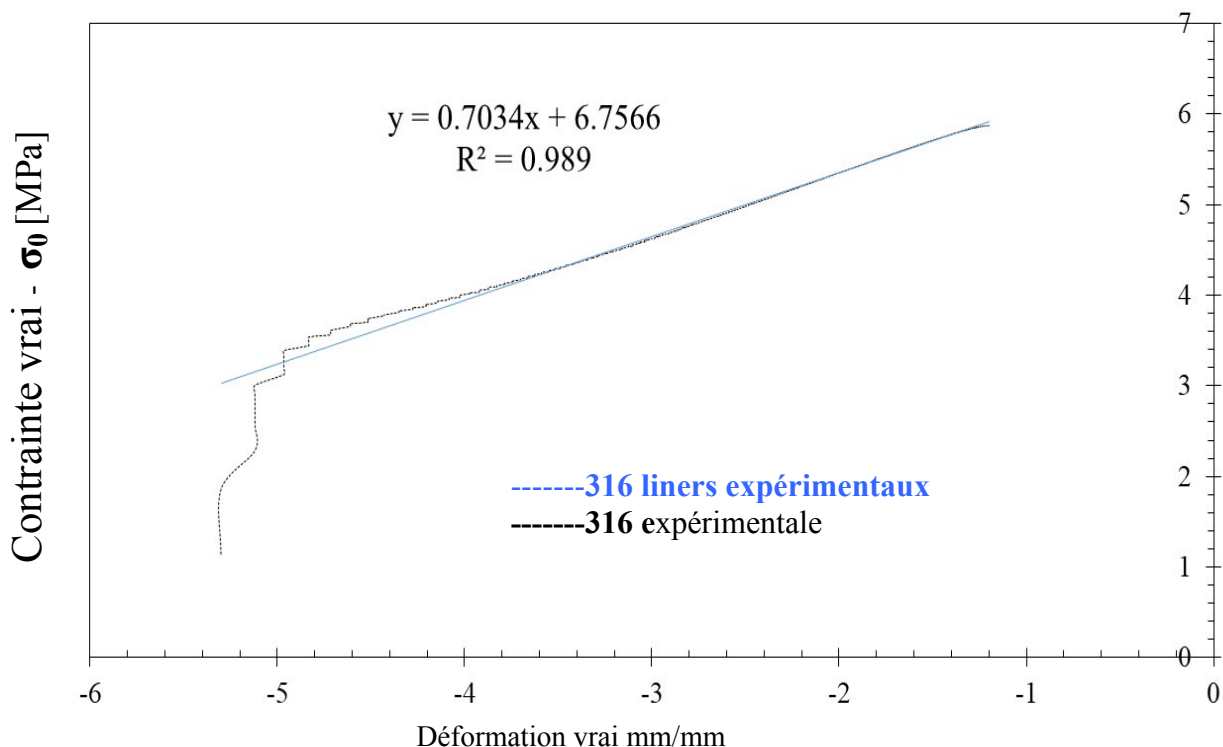


Figure 4 : Exemple de courbe d'écrouissage de Ludwik

Tableau2: Paramètres d'écroissage obtenus par lissage des courbes rationnelles

Matériau de Base				
AISI304L		920.57	0.6704	0.9665
AISI316L		859.71	0.7034	0.9890
Joint soudé				
AISI304L	pdf.=0s	1020.14	0.5953	0.9203
	pdf.=280 MPa	901.26	0.5498	0.9188
	pdf.=300MPa	999.74	0.5719	0.9268
AISI316L	tdf.=7s	851.67	0.5703	0.9591
	tdf.=9s	788.31	0.5597	0.9527
	tdf.=11s	807.46	0.5681	0.9468

pdf: pression de forgeage (pdf) & temps de friction (tdf)

L'utilisation que de la deuxième partie de la loi de **Ludwik** et celle de **Hollomon équation 1.1** en négligeant le premier terme exprimé par la contrainte seille σ_0 , pour écrire **l'équation 2.1**

Le tracé de cette dernière en contrainte - déformation rationnelle nous a permis de déterminer par régression linéaire deux autres paramètres, **figure 5**, appelés paramètres de **Hollomon**, pour accéder au deux paramètres d'écrouissage K_H et n_H , voir **tableau 3**. A partir de ce tracé, on constate que cette seconde loi montre la présence d'une double zone de durcissement pour les deux métaux de base et pour le métal post-soudé **AISI 316L**. En revanche, elle ne montre qu'une seule zone pour l'**AISI 304 L**, **figure 5**.

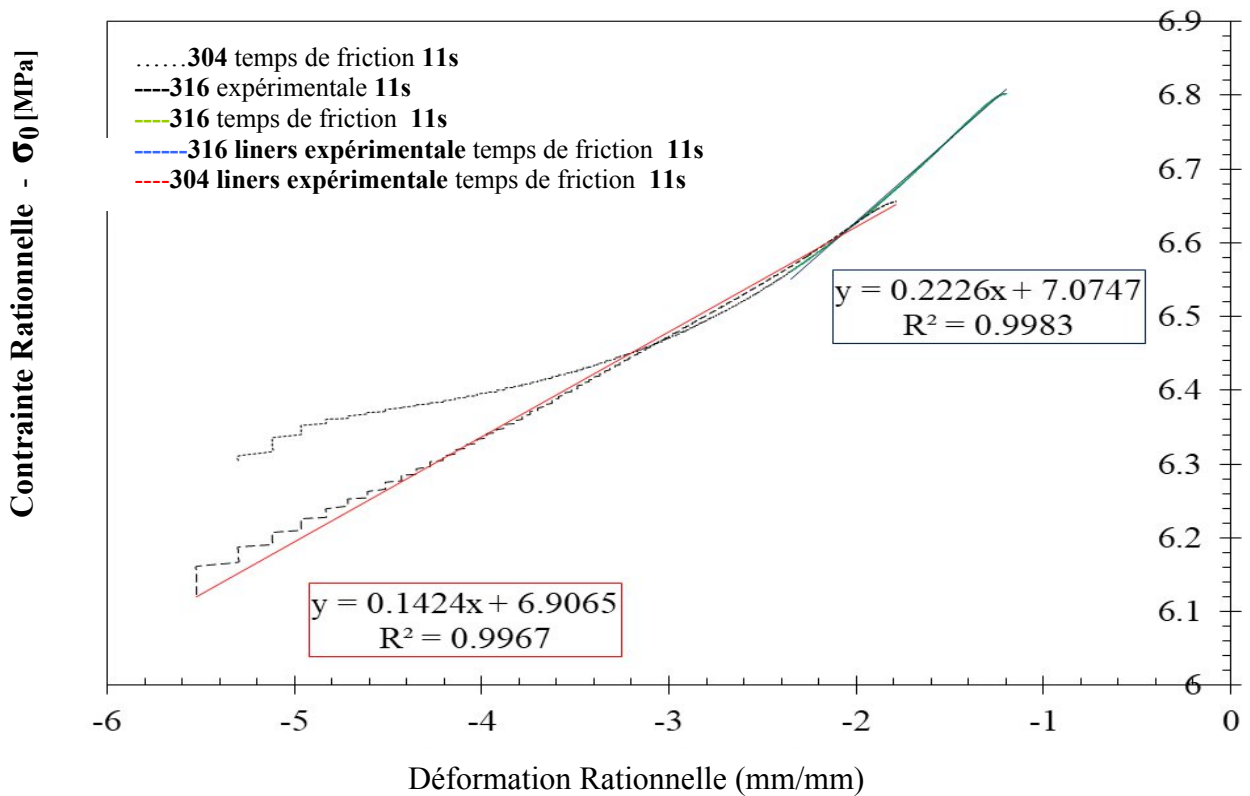


Figure 5:Exemple de courbe d'écrouissage de Hollomon

Tableau3:Paramètres d'érouissage de la loi de Hollomon

Matériaux de Base*				
AISI304L		1422.11	0.2539	0.9983
AISI316L		1181.68	0.2226	0.9983
Joints Soudés				
AISI304L	pdf.=0 MPa	1096.41	0.1504	0.9873
	pdf.=280 MPa	1043.56	0.1334	0.9906
	pdf.=300MPa	998.74	0.1424	0.9967
AISI 316L*	tdf.=7s	1190.46	0.233	0.9977
	tdf.=9s	1117.22	0.2059	0.9969
	tdf.=11s	1082.46	0.1759	0.9977

tdf.: temps de friction,(*):paramètres d'érouissage pour les grandes déformations

En plus des paramètres de la loi de puissance de Swift, K et n , obtenus par lissage de l'équation 3.2, basée sur l'équation de Hollomon, équation 3.1, un terme supplémentaire désigné par (ϵ_0) a été inclus, considéré comme une pré-déformation plastique. Les mêmes remarques accordées à la loi de Hollomon peuvent être faites concernant la présence de deux zones d'érouissage, figure 6. La différence entre les deux dernières lois est que la loi de Swift est plus précise que la loi de Hollomon, tableau 4.

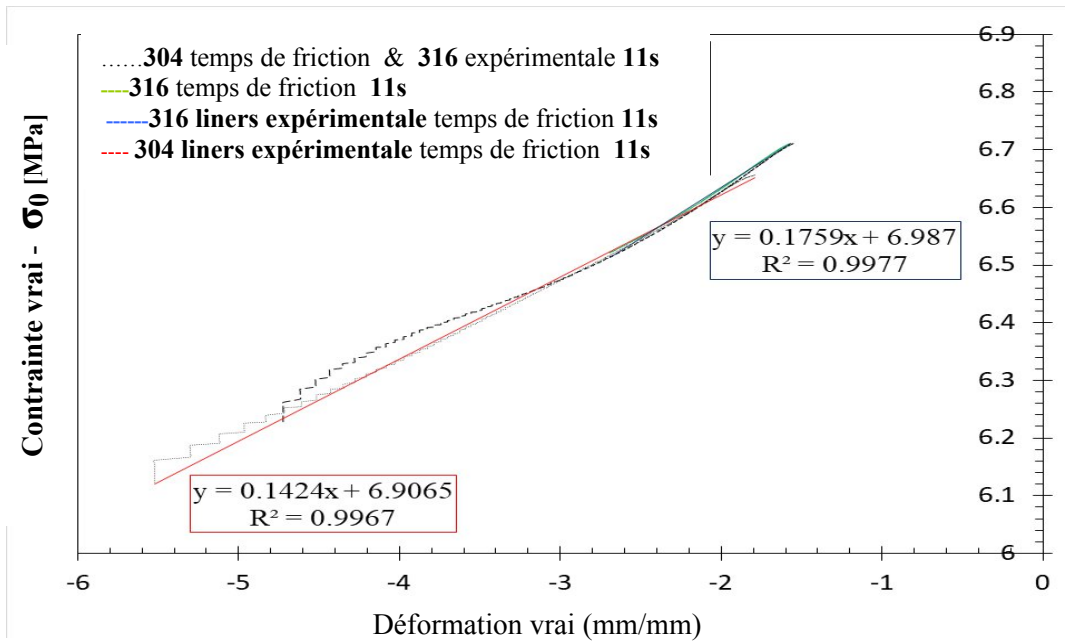


Figure 6: Courbe d'érouissage de Swift

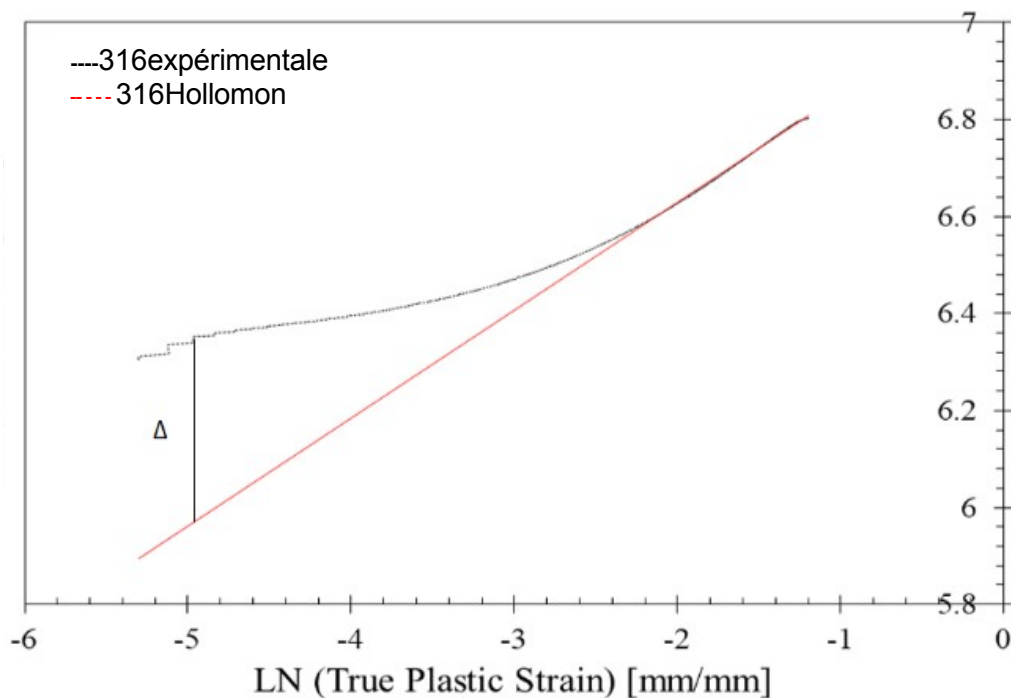
Métal de Base*					
AISI304L		1429.38	0.2612	0.0049	0.9985
AISI316L		1182.04	0.2262	0.0049	0.9981
Jointés soudés	Temps & Pression de pression (s)				
AISI304L	0 MPa	1123.72	0.165	0.0039	0.9928
	280 MPa	1070.09	0.1475	0.0039	0.9949
	300 MPa	1025.46	0.1558	0.0029	0.9992
AISI 316L*	7s	1194.28	0.238	0.0039	0.9979
	9s	1121.69	0.211	0.0039	0.9973
	11s	1089.09	0.1817	0.0039	0.9981

tdf: temps de friction, (*): work hardening parameter sat large strain

Tableau 4: Paramètres d'érouissage de la loi de Swift

Pour tenir compte des petits écarts de distorsion obtenus en utilisant les trois premières lois précédentes, **Ludwigson** a proposé de modifier la loi de **Hollomon** en ajoutant un second terme, représenté par l'équation 4.1. Le tracé de cette loi, dite loi de **Ludwigson**, figure 7, montre deux comportements à tendance linéaire, le premier dans le domaine des grandes déformations, équation 4.2 et le second dans le domaine des petites déformations. Équation 4.3. Dans cette loi, les deux paramètres K_1 et n_1 sont les paramètres de la loi de **Hollomon**.

Par contre, Δ est défini par la différence entre la contrainte expérimentale et celle de **Hollomon**, Eq. 4.3, à partir de laquelle, K_2 , n_2 peut être obtenu par régression linéaire par l'équation : $\ln \Delta - \epsilon_p$, qui donne les valeurs regroupées dans le tableau 5.



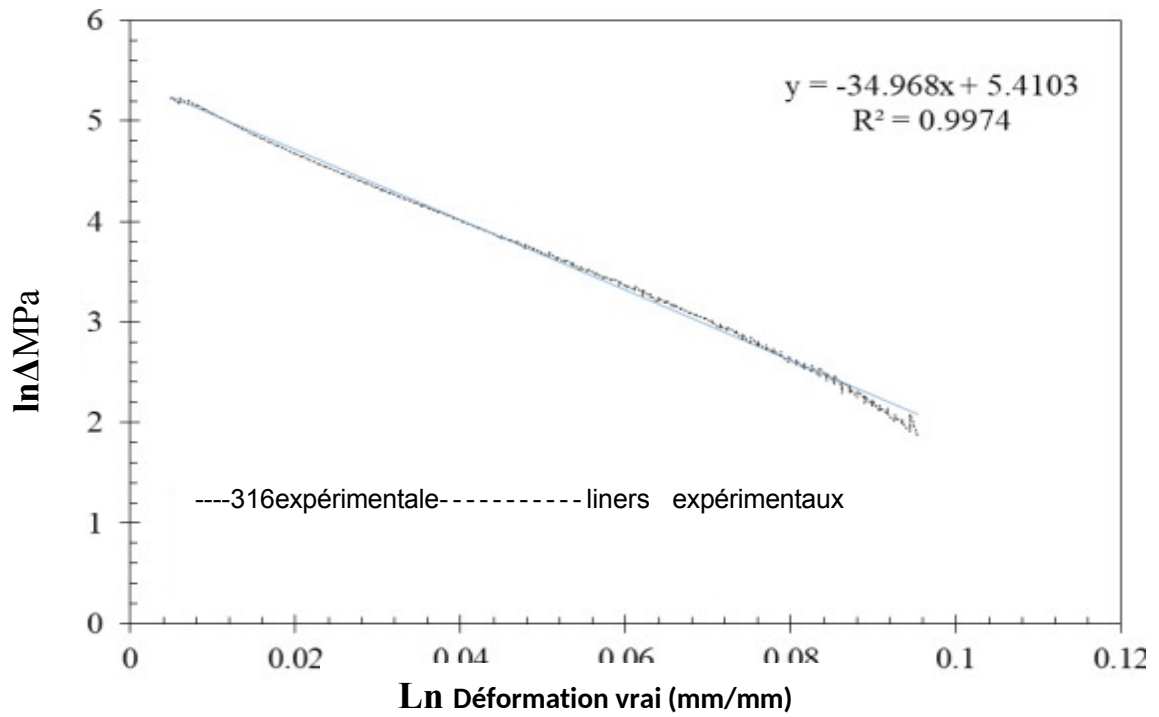


Figure 8: Exemple de courbe d'érouissage de Ludwigson

Métal de Base						
AISI304L		1422.11	0.2539	5.8759	-32.727	0.9890
AISI316L		1181.68	0.2226	5.4103	-34.968	0.9974
Joints Soudés						
AISI316L	tdf.=7s	1190.46	0.233	5.2414	-28.323	0.9953
	tdf.=9s	1117.22	0.2059	5.1095	-31.83	0.9905
	tdf.=11s	1082.46	0.1759	4.9194	-44.216	0.9923

tdf. Temps de friction

Tableau 5: Paramètres d'érouissage de la loi de Ludwigson

4. Discussion

Propriétés Mécaniques

La **figure 2**, illustre les vraies courbes de traction des métaux de base, dite courbes rationnelles des joints soudés similaires et dissemblables. De plus, les propriétés mécaniques de ces métaux sont présentées dans le **tableau 1**. Sur ces courbes on peut lire que la limite d'élasticité des joints soudés similaires et dissemblables a diminué par rapport à celle des métaux de base.

En effet, pour un temps de frottement de **7s**, une diminution d'environ **19,25%** est constatée pour le joint **AISI 304L** **12%** pour le joint **AISI 316L**. Ces résultats confirment une rigidité élevée du métal **AISI 304L** par rapport à celle de l'**AISI 316L**. En revanche, il y a une ductilité plus élevée pour, l'**AISI 316 L**, contrairement au métal **AISI304L**. A titre d'exemple, pour un temps de frottement de **7s**, une diminution de la ductilité de l'ordre de **2,84 %**, notée pour le joint **AISI 316**, **30,12 %** pour le joint **AISI 304L** respectivement. De plus, il est observé que pour un joint soudé similaire avec un temps de friction plus long, une faible résistance à la traction, une faible ductilité, un niveau élevé de micro-dureté et une ZDP élevée, tandis que pour un temps de friction plus court, une tendance inverse est obtenue en raison, la chaleur accumulée au niveau du joint n'a pas suffisamment de temps à ce diffuser.

Par conséquent l'utilisation d'une vitesse de rotation plus élevée et un temps de friction plus court, augmente la contrainte maximale du joint soudé [7]. D'autre part, pour un joint dissemblable, une ductilité élevée enregistrée avec un temps de frottement de **7s** et une résistance à la traction élevée dans le cas d'un temps de frottement de **9s**, en raison des propriétés mécaniques et thermo-physiques sur l'érouissage post-soudage du joint dissemblable ont principalement une influence sur le comportement mécanique de ce type de joint, car la température atteinte par chaque joint dépend des propriétés thermo-physiques des deux métaux à souder et de la durée de frottement choisie [1]. Par conséquent, les relations entre la contrainte - température pour chaque joint affecteront les propriétés du joint résultant de l'opération de soudage [21].

Avec un temps de frottement plus court de **7s** montre un durcissement au niveau de la partie tournante et un ramollissement au niveau de la partie fixe, ce qui signifie la faible action mécanique liée à la partie tournante. Cependant, à un temps de friction plus long de **11s**, donne une forme symétrique du profil de l'adoucissement des deux côtés. Dans le même

Procédé, on peut évidemment pour le joint **AISI 304L**, on constate un adoucissement général du faciès de rupture. Pour un temps de friction plus court **7s** la Zone Hautement Déformée Plastiquement (HZDP), ce trouve au niveau du joint **AISI 316L**. Par conséquent, à un temps de friction plus long **8,5s** la **HZDP** a une valeur moyenne d pour le **AISI 304L** [1].

Capacité de durcissement

La capacité de durcissement d'un matériau peut être considérée comme un rapport de la résistance ultime à la traction σ_{max} , à la limite d'élasticité σ_y [23, 24], **affine et al** [23] redéfini un paramètre normalisé de capacité de durcissement, noté par H_c , comme suit :

$$H_c = \frac{\sigma_{max} - \sigma_y}{\sigma_y} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_y} - 1 \quad (5)$$

La capacité de durcissement des métaux de base et des joints soudés similaires et dissemblables est indiquée dans le **tableau 6**. Il est constaté qu'il y a une amélioration de la capacité de durcissement des joints soudés par rapport aux métaux de base. Dans le cas de joints soudés similaires, il existe une capacité de durcissement plus élevée du joint **AISI 304L** –**AISI304L**, en raison d'une capacité de durcissement plus élevée du métal de base **AISI 304**. De même, une capacité de durcissement plus élevée est obtenue sur les joints soudés dissemblables **AISI 304L** et la capacité de durcissement diminue en fonction du temps de frottement pour le joint **AISI 316L** mais augmente pour le joint **AISI 304L**. La capacité de durcissement d'un matériau est normalement liée à sa limite d'élasticité qui était en outre associée à la microstructure et à la texture du matériau.

Une augmentation de la taille des grains diminuerait la valeur de la limite élastique selon la relation de **Hall-Petch** [25, 26, 27] et augmenterait la capacité de stockage des dislocations, conduisant à une capacité de durcissement plus élevée. Une diminution de la taille des grains réduit la différence de résistance à l'écoulement entre le joint de grain et l'intérieur, ce qui a son tour réduit la capacité de durcissement [24]. Cependant, la capacité de durcissement des joints soudés similaires et dissemblables est supérieure à celle des métaux de base malgré l'affinement du grain observé dans la zone hautement déformée plastiquement, **ZHDP**, **figure 3**.

AISI304L	618.74	781.41	0.27
AISI316L	541.47	678.19	0.25
AISI304L tdf. =0 s	499.59	718.11	0.43
AISI304L tdf. =5 s	502.91	703.68	0.39
AISI304L tdf. =8 s	450.19	661.83	0.47
AISI316L tdf.= 4s	476.52	672.90	0.41
AISI316L tdf. =5 s	482.43	658.07	0.36
AISI316L tdf.=7 s	500.69	670.63	0.33
AISI316L tdf. =9 s	427.94	629.40	0.47
AISI304L tdf.=11s	453.48	677.12	0.49

tdf:Temps de friction

Tableau6:Capacité d'écrouissage du matériau de base et du joint soudé

Modélisation du durcissement post-soudage

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du comportement de l'écrouissage isotrope à l'aide de quatre lois identifiées dans la première partie de ce chapitre. Pour rappel, nous avons travaillé sur deux métaux de base **figure 9a et 9b**, avant de traiter les joints soudés. A partir de cette figure, on remarque une bonne similitude entre deux lois de comportement, celles de **Ludwik** et **Ludwigson**, avec une meilleure précision pour le second modèle qui se rapproche mieux du comportement de l'**AISI 304L** et de l'**AISI 316L**. La **figure 9a** montre un petit écart dans la zone des faibles déformations de la courbe expérimentale.

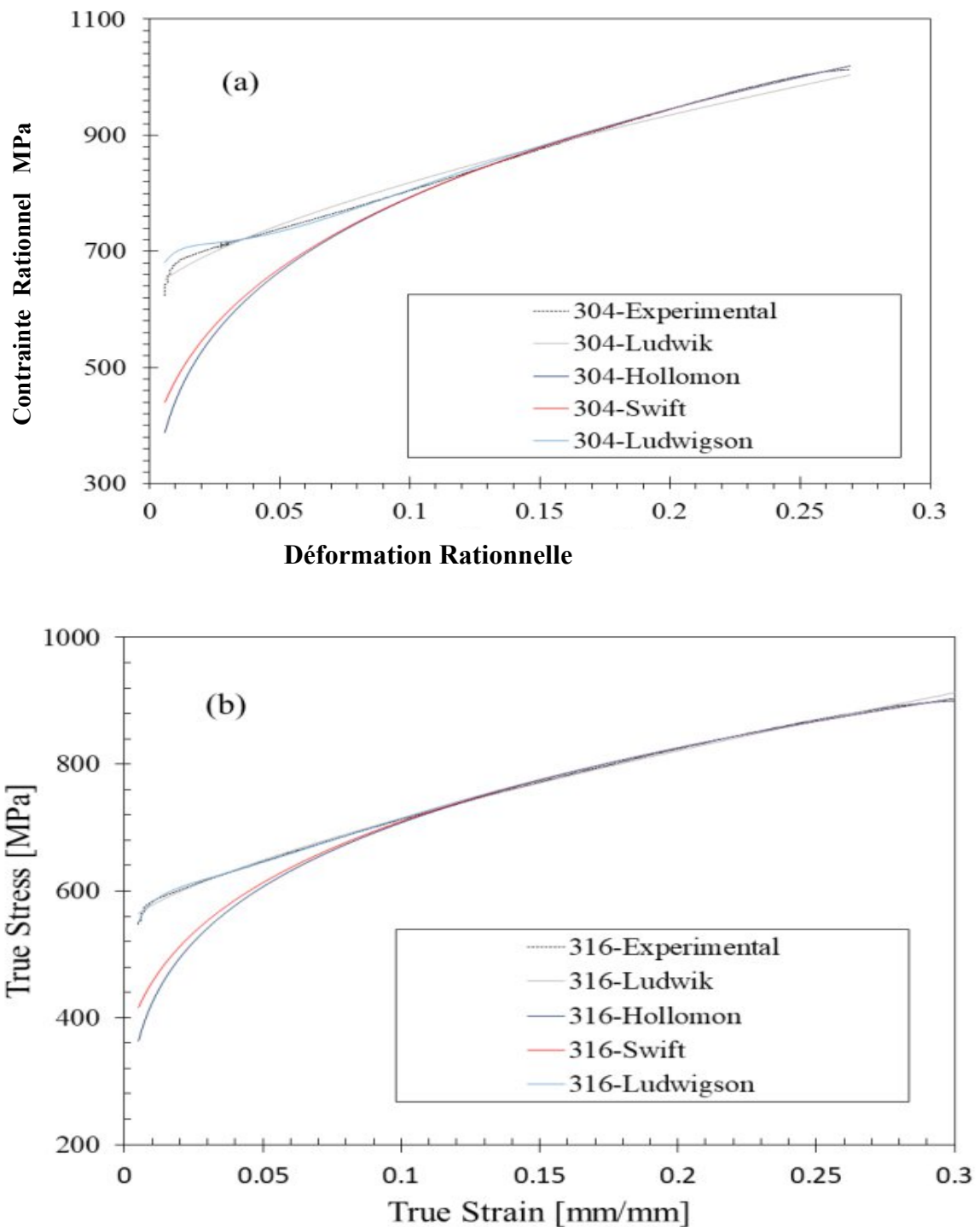
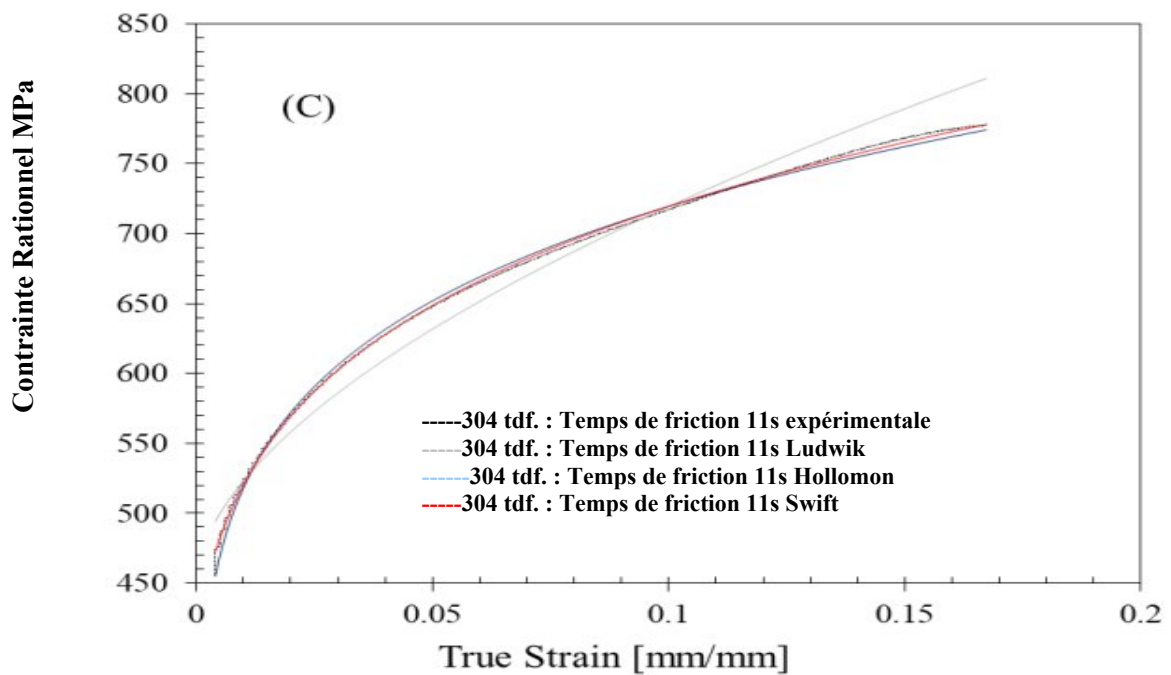
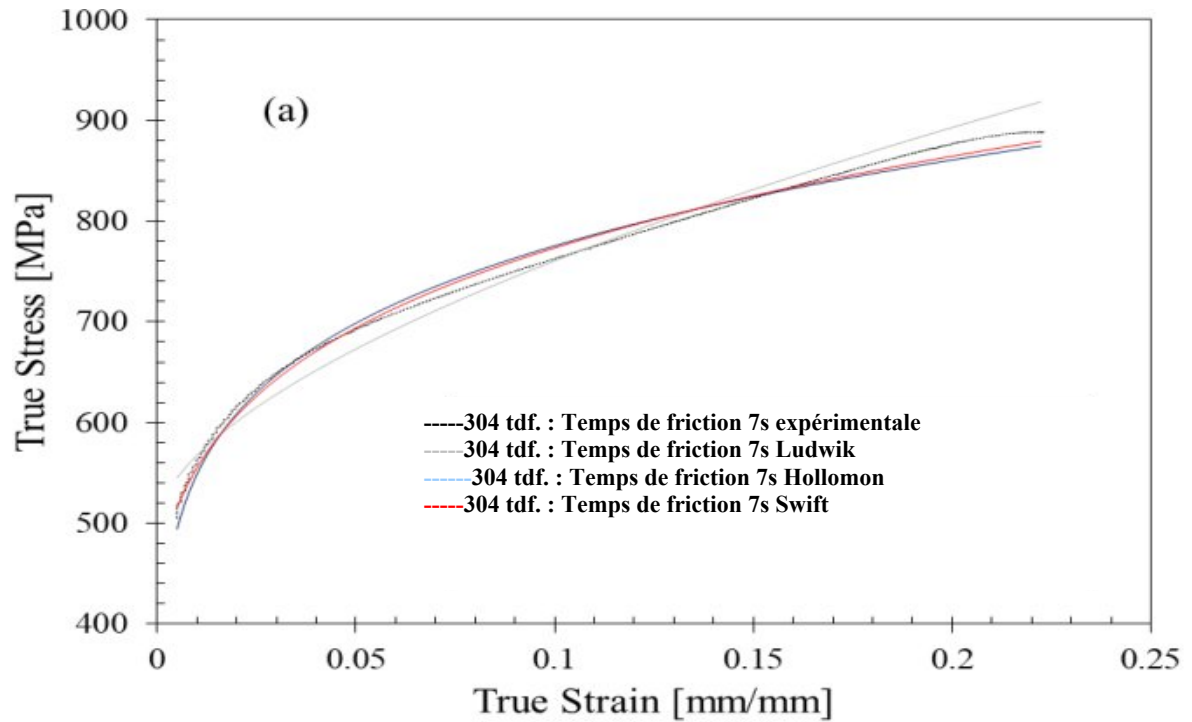


Figure (9) : Comparaison des modèles avec les résultats expérimentaux pour les deux matériaux de base

Deuxièmement, à partir des résultats post-soudage, nous pouvons affirmer que les deux lois de **Ludwik** et de **Ludwigson** donnent de meilleures prédictions pour l'AISI 316 L avec un temps de frottement

Procurent les mêmes résultats pour les deux temps restants, **7s** et **11s**, pour le **AISI316L**, **figure 10** et **figure 12**.

En conclusion, on peut dire que la loi de **Ludwigson** décrit mieux le comportement des deux métaux de base séparément et celui de la combinaison **AISI 316L**. En revanche, le modèle de **Swift**, à notre avis, est mieux adapté, que le modèle de **Hollomon**, pour les deux combinaisons, **AISI 304L** de 9s, **figure11**, Par contre les modèles **Hollomon** et **Swift**,



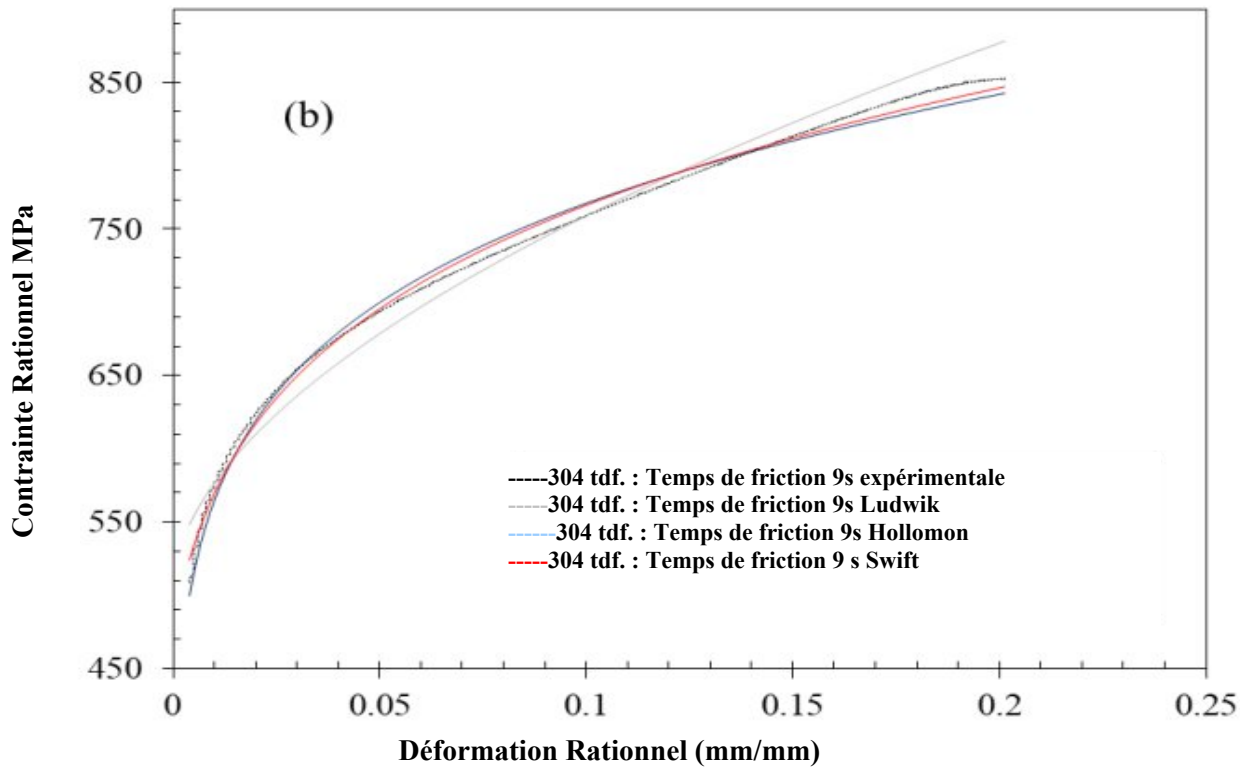
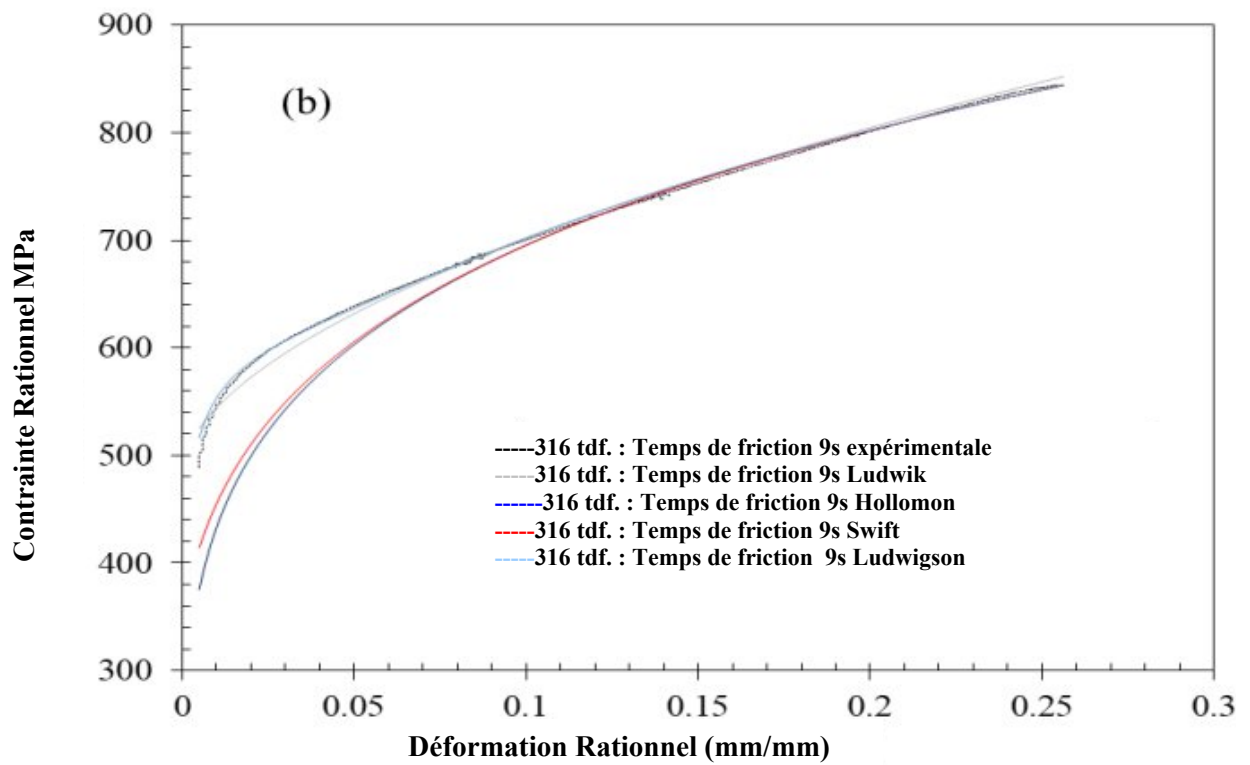
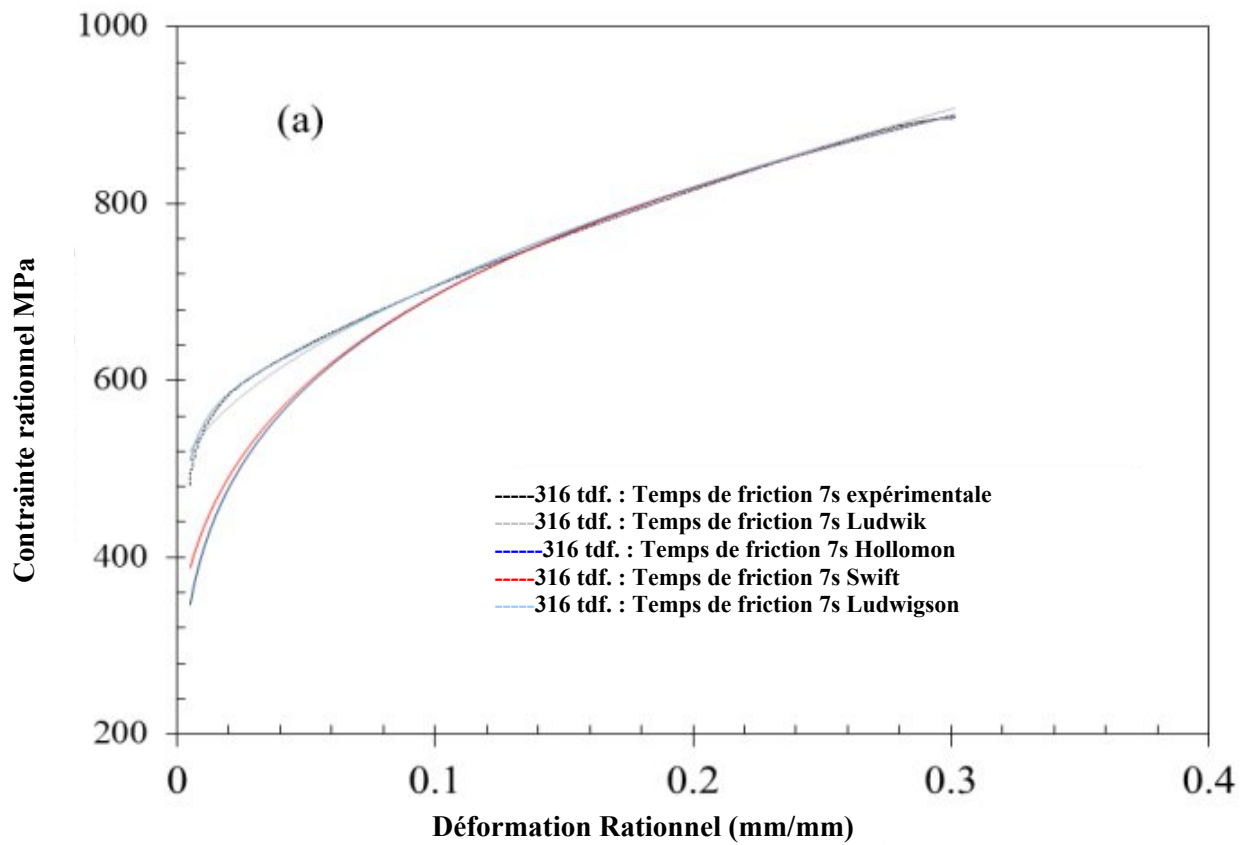


Figure 10 : Effet de la pression de friction sur l'érouissage post-soudage, AISI 304L



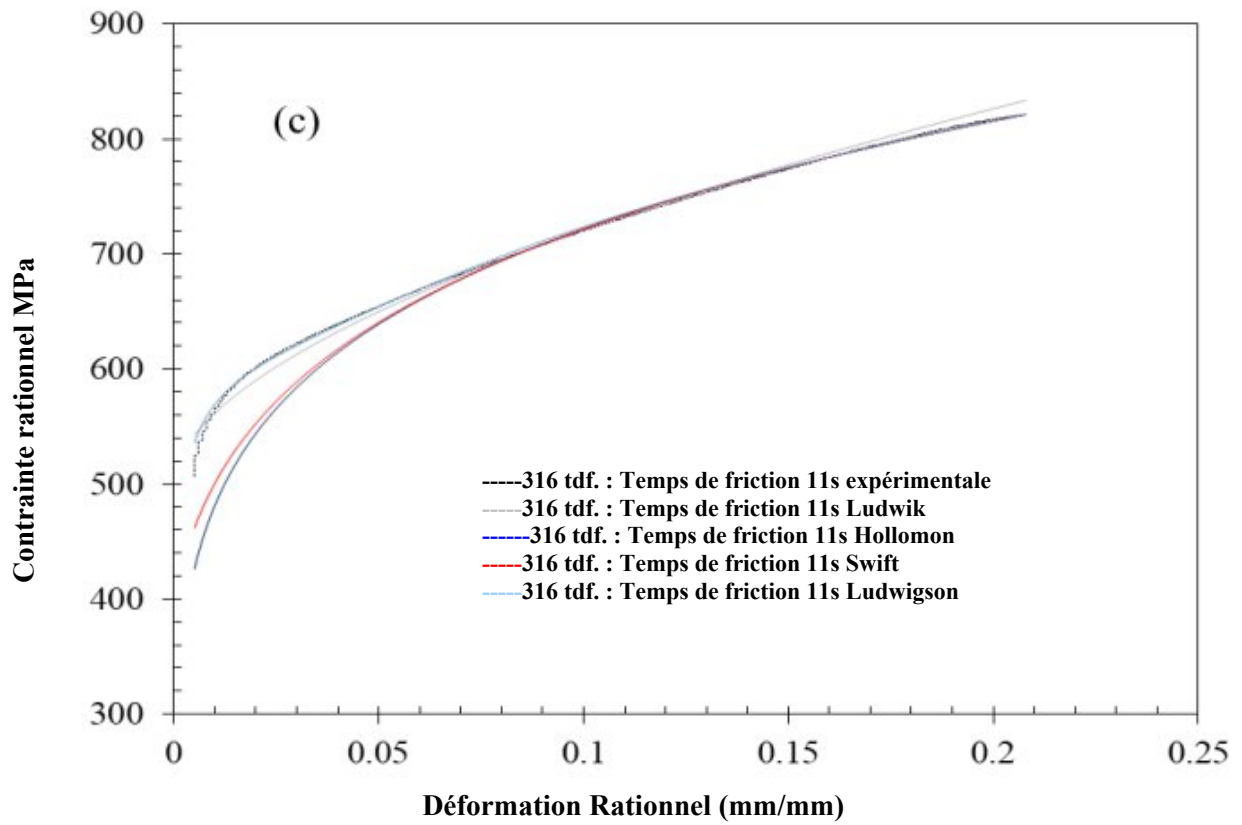


Figure 11 : Effet du temps de frottement sur l'écroutissage post-soudage, pour **AISI 316L**

Evolution des paramètres de durcissement en fonction du temps de friction

L'exposant d'érouissage a été évalué par les lois de Hollomon et Swift pour les deux joints **AISI304L** et **AISI 316L**, **figure 13**. Alors que l'exposant d'érouissage est évalué par la loi de Ludwigson pour le joint **AISI 316L**, **figure 15**.

L'exposant d'érouissage est une mesure de la capacité d'un métal à s'érouir ; plus son amplitude est grande, plus l'érouissage est important pour une quantité donnée de déformation plastique [25]. Plus la valeur (n) est élevée, plus le matériau peut se déformer avant l'instabilité et le matériau peut être étiré davantage avant le début de la striction [28]. D'après la **figure 13**, on peut constater que l'exposant de durcissement du joint **AISI304L**, pour un temps de frottement de **7s** est supérieur à celui du métal de base **AISI 304**, ce qui correspond à un durcissement plus élevé. L'exposant d'érouissage est réduit à un temps de frottement de **9s** puis remonte pour un temps de frottement égal à **10s**. Il est à noter que l'exposant d'érouissage prend la valeur maximale pour un temps de frottement de **10s**, correspondant au durcissement le plus élevé.

Les variations du coefficient d'érouissage normalisé (K/E) en fonction du temps de frottement pour les deux combinaisons **AISI304L** et **AISI316L** utilisant les deux lois de Hollomon et Swift sont illustrés sur la **figure 14**. On constate que le coefficient d'érouissage normalisé est maximal pour le joint **AISI 304L-AISI 304L** à un temps de frottement de **6,5s**, puis il diminue pour **8,5s** et il remonte à pour **10s**. Dans le cas du joint **AISI 304L**, on constate que les valeurs du coefficient d'érouissage normalisé sont très proches pour les temps de frottement **7s** et **9s**.

Les valeurs maximales sont enregistrées pour le joint soudé à **9s** et une diminution remarquable a été observée pour un temps de frottement de 10s. A partir de la figure 15-a, on observe que l'exposant d'érouissage n diminue lorsque le temps de frottement augmente dans le cas du joint **AISI 316L**. Mêmes observations notées pour les deux autres paramètres de la loi de Ludwигson, n_2 et K_2 , **figure 15-b**. Par rapport au métal-mère, l'exposant d'érouissage n_1 atteint sa valeur maximale pour un temps de frottement de 7s correspondant à l'érouissage le plus élevé.

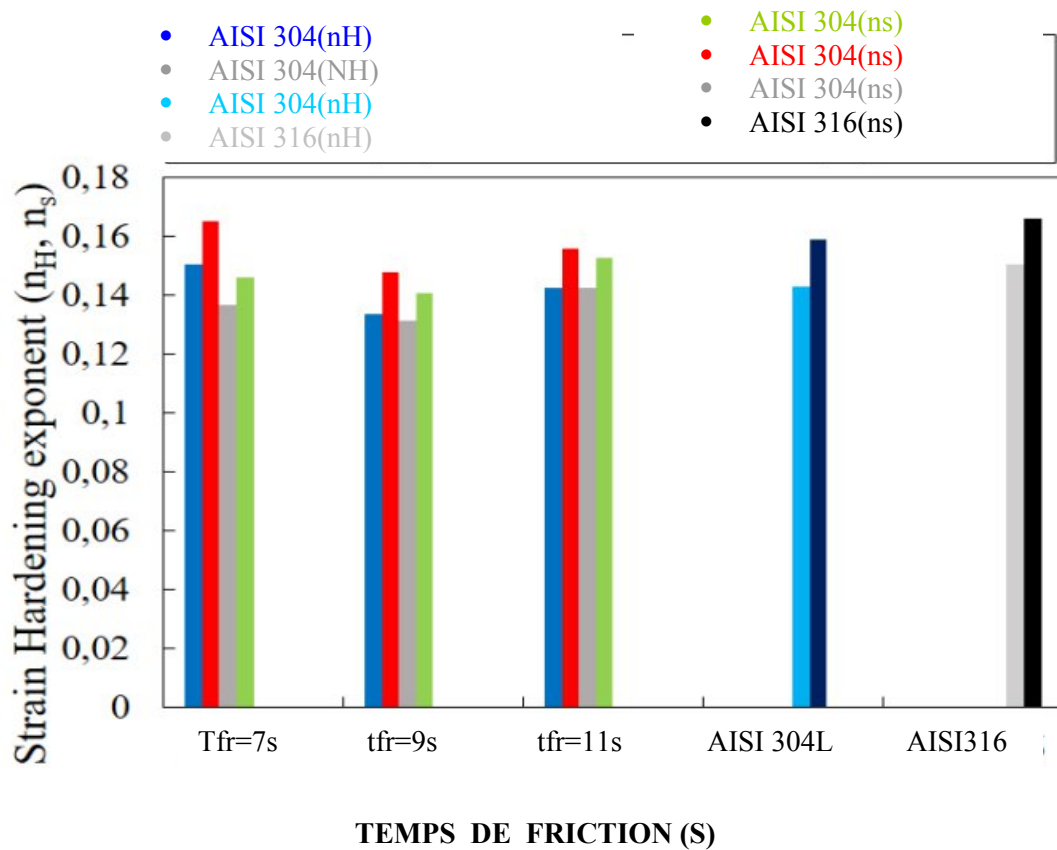


Figure 13 : Evolution de l'exposant d'érouissage en fonction du temps de frottement, AISI 304L et AISI 316L

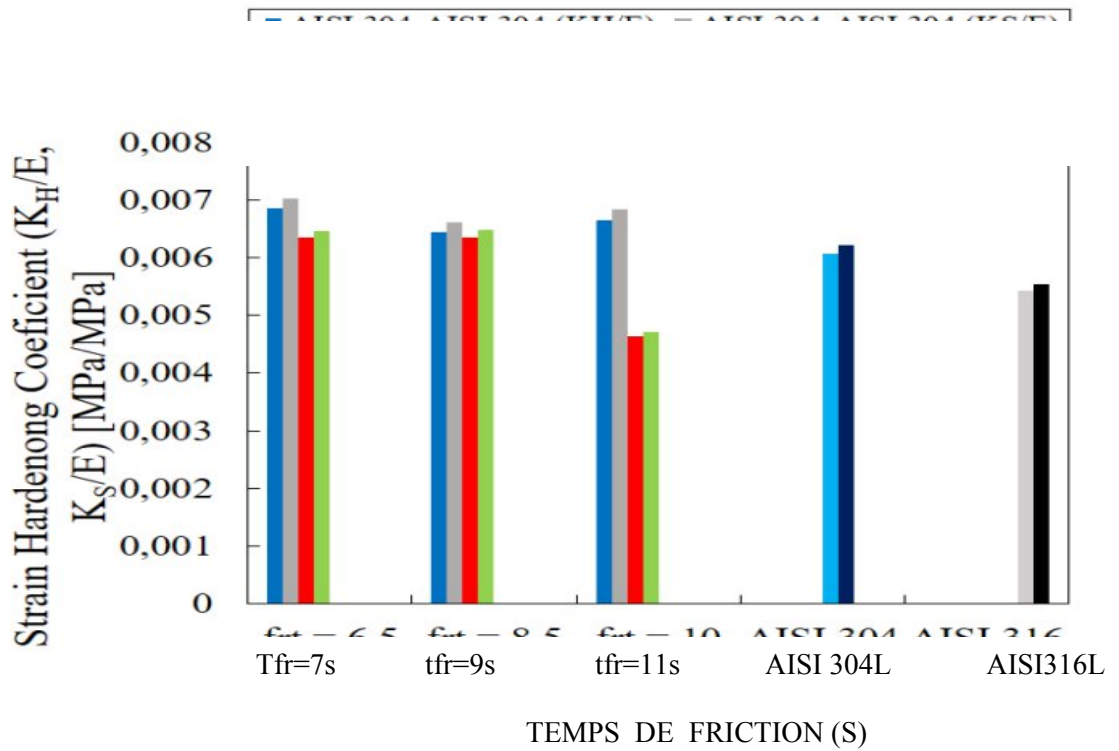
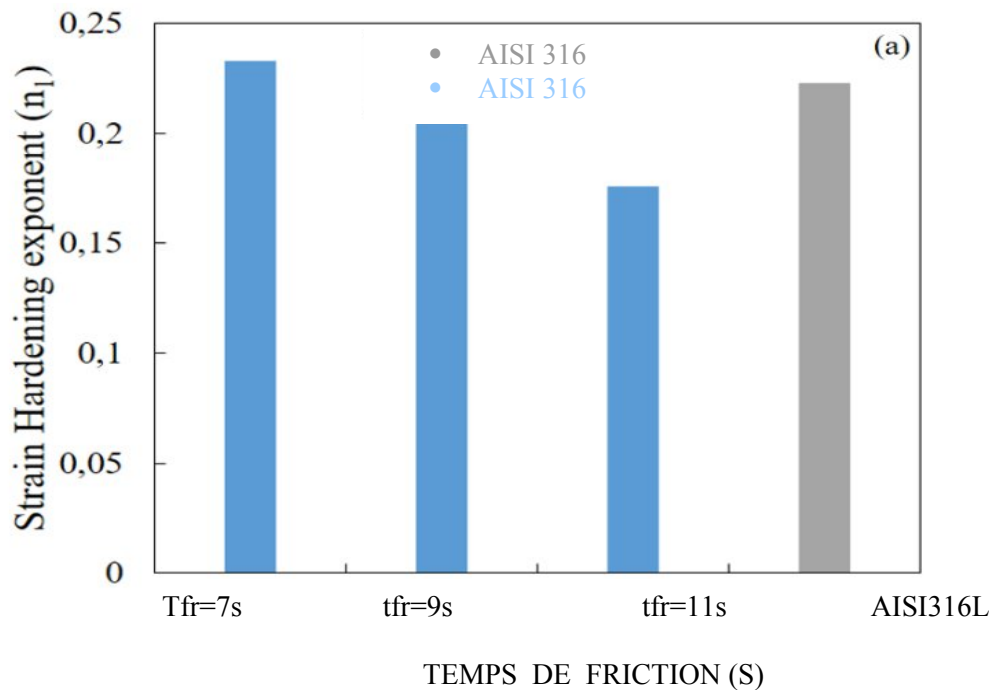


Figure 14 : Evolution du coefficient d'érouissage normalisé (K/E) en fonction du temps de frottement, AISI 304L



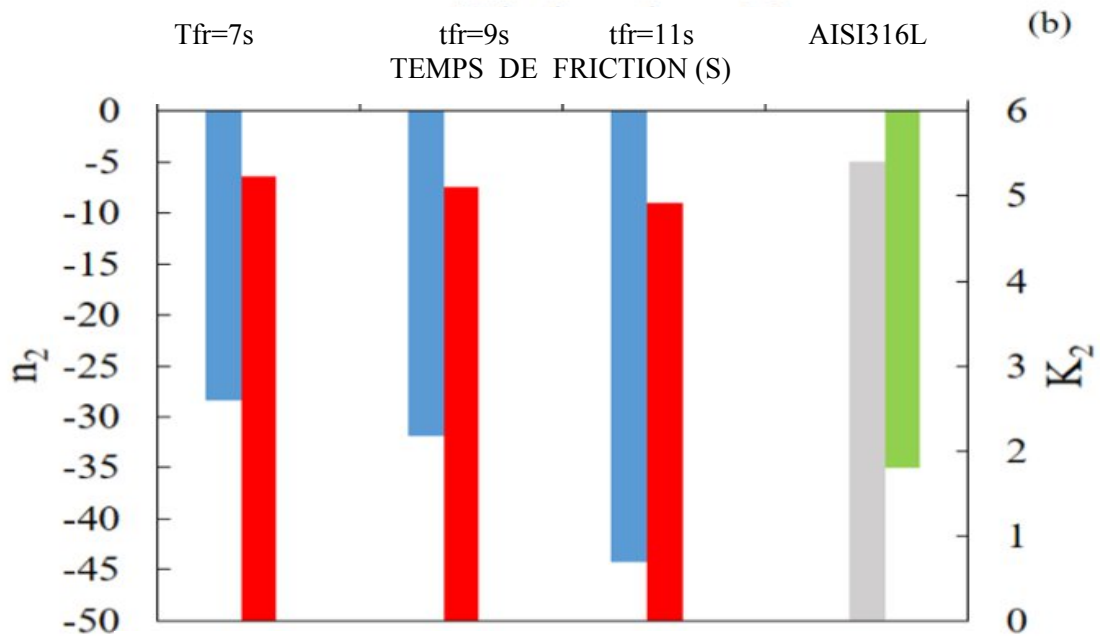


Figure 15 : Evolution des paramètres de durcissement en fonction du temps de frottement, **AISI 316L**

Analyse des surfaces de rupture

L'observation de la surface de fracture par SEM d'articulations similaires et dissemblables est illustrée à la **figure (16)**. Des fossettes sont observées dans la surface de rupture de tous les joints soudés, indiquant que le principal mécanisme de rupture est ductile [29]. Ces surfaces de rupture présentaient une combinaison de fossettes équiaxes et de fossettes allongées au niveau de tous les joints soudés, ce qui indique un mouvement de cisaillement du matériau dans cette région.

On observe que la rupture ductile dans tous les joints soudés se produit en trois étapes : la nucléation des vides, la croissance des vides et la coalescence des vides résultant en une surface de rupture alvéolée. Quelques alvéoles larges et profondes dans le joint soudé **AISI 316L** à un temps de frottement de **6,5s** et **8,5s** suggèrent un allongement important avant rupture, alors que des alvéoles fines et peu profondes dans le cas d'un joint soudé **AISI316L**

à un temps de frottement de 10s a indiqué un allongement limité et une résistance élevée avant la rupture (**figure16a**). De plus, on a observé que le joint **AISI304L** (**figure16b**) a une plus grande capacité à la déformation thermoplastique que les joints **AISI 316L** et **AISI304L**, démontrée par l'absence de forme en spirale sur la surface de rupture, résultant de écoulement de métal qui se produit près du plan de la soudure cause de la partie tournante contre la partie fixe [1].

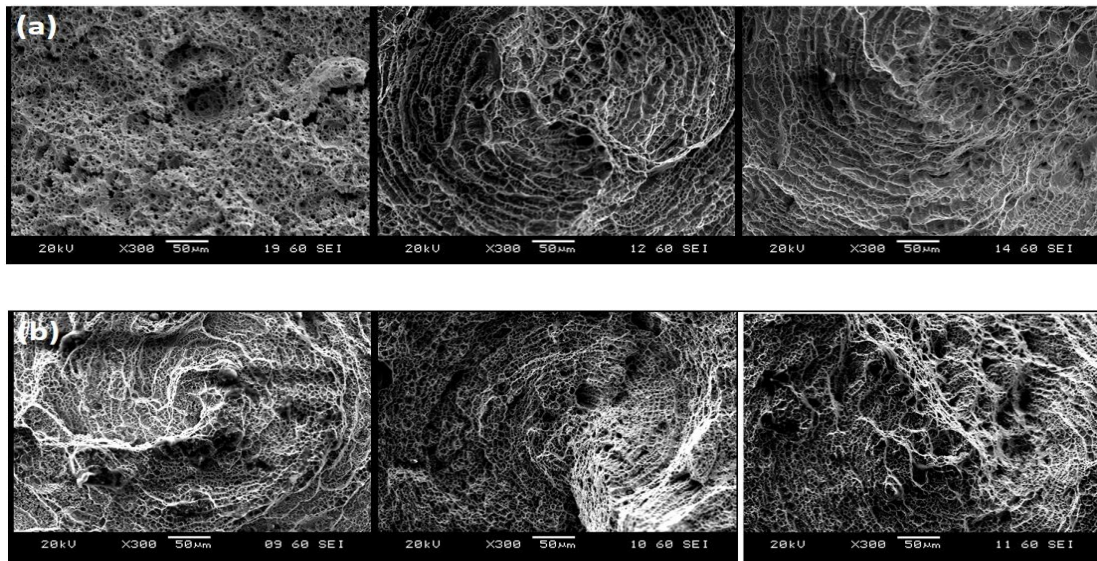


Figure 16: Observation par SEM, (a) AISI 316L, (b) AISI 304L et (c) pour trois temps de frictions [6.5, 8.5 et 10s]

4. Conclusion

Cette étude analyse le comportement à l'écrouissage de deux aciers austénitiques **AISI 304L** et **AISI 316L**, soudés par frottement direct, séparément. L'utilisation des lois de comportement permettent d'élucider le rôle d'écrouissage généré par friction post-soudage. Les deux lois de **Hollomon** et de **Swift**, montrent la présence d'une double zone de durcissement pour les deux joints **AISI 304L** et **AISI 316L**. En revanche, la loi de **Swift** donne de meilleurs résultats par rapport aux autres lois et décrit avec une grande précision le comportement à l'écrouissage de ces deux matériaux **AISI 304L** et **AISI 316L**. Enfin, celle de **Ludwigson** est la mieux adaptée, pour l'**AISI 316 L**.

En revanche, on note que les meilleures propriétés mécaniques post-soudage ont été obtenus pour le temps de **9s** par contre, l'exposant d'écrouissage le plus élevé est enregistré à un temps de frottement de **7s**, Pour les mêmes résultats expérimentaux les deux lois analytiques de **Ludwik** et **Ludwigson**, à notre sens décrivent mieux le comportement d'écrouissage, pour les deux métaux de base **AISI 304L** et **AISI 316L**.

En revanche, la loi de **Swift** donne de meilleurs résultats par rapport aux autres lois et décrit avec une grande précision le comportement à l'écrouissage de ces deux matériaux **AISI 304L** et **AISI 316L**. Enfin, celle de **Ludwigson** est la mieux adaptée, pour l'**AISI 316 L**.

résultats par rapport aux autres lois et décrit avec une grande précision le comportement à l'écrouissage de ces deux matériaux **AISI 304L** et **AISI 316L**. Enfin, celle de **Ludwigson** est la mieux adaptée, pour l'**AISI 316 L**.

L'exposant d'écrouissage le plus élevé est enregistré pour les:

1/ **AISI 304L** pour une pression de **280** et **300** MPa.

2/**AISI316L**pour un temps de frottement de**7, 9et 11s**.

En revanche, on note que les meilleures propriétés mécaniques post-soudage ont été obtenus pour le temps de **9s** par contre, l'exposant d'écrouissage le plus élevé est enregistré à un temps de frottement de **7s**, pour le joint **AISI 316L**.

Le soudage des matériaux de base **AISI 316L** et **AISI 304L**, permettent d'obtenir des joints de meilleures propriétés mécaniques pour un temps de frottement de **7s**; en revanche, le joint **AISI 304L**, pour un temps de frottement de **8s** donne de meilleures propriétés mécaniques.

Références

- [1] Hassan A.J., Boukharouba T., Miroud D., Ramtani S., (2019) Metallurgical and mechanical behavior of AISI 316- AISI 304 during friction welding process, Int J Eng Transactions B: Applications 32 (2): 284-291. DOI: 10.5829/ije.2019.32.02b.16.
- [2] VillV.I., Friction welding of metals. New York: American Welding Society, Inc.; 1962.
- [3] Kimura M., Kusaka M., Kaizu K., Nakata K., Nagatsuka K., Friction welding technique and joint properties of thin-walled pipe friction welded joint between type 6063 aluminium alloy and AISI 304 austenitic stainless steel, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2016), 82, 489-499.
- [4] T.J., Jessop and W.O., Dinsdale, Friction welding dissimilar metals, Proc. de Master-Maintenance industrielle et fiabilité-Université Badji Mokhtar Annaba-Annaba-Algérie.
- [5] Samene, A. et Harem, M., Optimisation des paramètres de procédé du soudage par friction rotative, 2017. Mémoire de Master – Génie mécanique, Université Mohamed El-Bachir El Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj-Algérie.
- [6] Khalfallah, F., Soudage par friction de l'acier avec de la céramique, 2020. Thèse de Doctorat en Sciences – Métallurgie, Université Mohamed Khider-Biskra-Algérie.
Image électronique, Available from: <https://i.ytimg.com/vi/jShvC-8Hy98/hqdefault.jpg>
- [7] Attallah, M.M. and Preuss, M., Inertia friction welding (IFW) for aerospace applications. Welding and Joining of Aerospace Materials, 2012: p. 25–74.
- [8] I. Estevez, « Développement d'une technique d'imagerie d'impédance électrique locale à partir d'un microscope à force atomique », Thèse Doctorat, 2010, université paris-sud 11.
- [9] Ramirez, A.J., Benati, D. M. and Fals, H. C., Effect of Tool Offset on Dissimilar Cu-AISI 316 Stainless Steel Friction Stir Welding. In Proceeding of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, USA, 2011. 8: p. 548–551.
- [10] Chiu, K.Y., Cheng, F.T. and Man, H.C., Laser Cladding of Austenitic Stainless Steel using NiTi Strips for Resisting Cavitation Erosion. Materials Science and Engineering: A, 2005. 402 (1-2): p. 126–134.
- [11] MURRY, G., Aciers. Généralités. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1993. (M300): p. 1-29.

- [12] NOUADRIA Fatima, (2016). Etude des effets de la réparation de la soudure sur les propriétés mécaniques des pipelines, Mémoire de Master-Maintenance industrielle et fiabilité- Université Badji Mokhtar Annaba-Annaba-Algérie.
- [13] DOCUMENT USINE n°2, Contrôle qualité – Matériaux métalliques, Essai de traction – NF10002-1 (1990).
- [14] BEN KECHROUD BASMA, (2014). Etude comparative de quatre aciers pour pipeline pour Sonatrach réalisés à la TSS Arcelor Mittal-Annaba selon les paramètres physico chimique et choix de l'acier X52, Mémoire de Master- Mécanique des matériaux- Université Badji Mokhtar Annaba-Annaba-Algérie.
- [15] DOCUMENT USINE n°3, Contrôle qualité – Matériaux métalliques, Essai de dureté – ISO 409/1(1982).
- [16] <https://conceptec.net/fr/techniques-de-base/materiaux/essais-et-contrôles/essai-de-durete>.
- [17] document internet Wikipédia, dureté des matériaux, <http://wikipedia.org/wiki/fichier>
- [18] Bilal Hannouf, Ammar Zeddou, « Utilisation des techniques du soft computing dans un procédé de contrôle non destructif », mémoire de mastère, Université de Jijel, Juin 2018.
- [19] Abdelhak Abdou, « Contrôle non destructif par courant de Foucault étude et réalisation d'un capteur inductif », Mémoire de magistère en électrotechniques, université el hadj lakhdar Batna, septembre 2006.
- [20] Citeenligne www.bodycote.com
- [21] KHEBBAB MOHAMED Etude et Modélisation de Capteur à Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND). Mémoire; l'obtention du diplôme de Magistère en Electrotechnique Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [22] Nathalie KOPP; Contribution à la caractérisation en Contrôle non destructif ultrasonore de défauts de soudures bout-à-bout en acier faiblement allié. Université de Metz; France; 4 mai 1999.
- [23] Kada Karim et gharabi tayab; Contrôle non destructif ; réseaux électrique; Université Ahmed doraya – Adrar Faculté des sciences et de la technologie Département de génie Electrique ; 04/06/2018

- [24] ADNENE TLILI; SOFIEN MARZOUKI; Contrôles non destructifs; Institut supérieur des études technologiques de Jendouba. Département Maintenance Industrielle; 2005/2006; Tunisie.
- [25] ALI RAID; Contrôle non destructif; Ressuage, Magnétoscopie, Radiographie, Courants de Foucault et Ultrasons. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf ; 2017-2018.
- [26] Benissaad, S., Le soudage TEC 340, 1991. Office des publications universitaire. Université de Constantine, Algérie. p. 1-2.
- [27] G. BERANGER, G. HENRY, G. SANZ : «Le livre de l'acier». Technique et Documentation, Lavoisier, 1994.
- [28] BAARI Aziz : ' Etude de soudage à l'état solide « soudage par friction », étude de cas : Soudage d'une tige de forage' ; mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, juin 2018.
- [29] Helal, Y., thèse « L'effet de soudage par friction malaxage sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier ». Université MOHAMMED KHAIDER Biskra (2017).
- [30] Gerard, M., thèse « Soudage-diffusion hétérogène assisté par friction malaxage cas du couple Al/Fe- ». Ecole Centrale de Nantes (18 novembre 2010).
Revue De Dr. Ir. Koen Faes, IBS (Traduction : M.C. Ritzen), Institut Belge De La Soudure.
- [31] Koen, F., Le soudage par friction, un procédé de soudage multiple et innovateur, 2011. Available from: <https://www.bil-ibs.be/fr/publicatie/le-soudage-par-friction-un-procede-de-soudage-multiple-et-innovateur>.
- [32] REVIEW Friction welding – critical assessment of literature. Maalekian, M. Graz University of Technology: sn, 09 10 2007, Institute of Materials, Minerals and Mining, pp. 738-759.
- [33] Larry Jeffus, “Welding: Principles and Applications”, DELMAR Cengage Learning, Seventh Edition, 2012, USA.

- [34] T. Maeder, Q. N’Guyen et L. Weber, « Techniques d’assemblage - le soudage en phase solide », cours, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Lausanne, 2006. Laboratoire LMM. – Cité pages 35, 36, 37, 38 et 39.
- [35] R. Cazès, « Soudage par friction », Techniques de l’Ingénieur, vol. B7745, 1996. – Cité page 37.
- [39] «Soudage-Coupage»(SYMOP).<http://www.irs.fr>.(24avril2018).
- [40]. Pichot, F. ; Corpace, F., Conception et fabrication des moteurs aéronautiques (27/03/2014). Groupe SAFRAN (SNECMA).
- [41] S.B.Jamaludin, Y. C. Keat and Z.A.Ahmad: ‘The effect of varying process parameters on the microhardness and microstructure of Cu–steel and Al–Al₂O₃ friction joints’, J. Teknol., 2004, 41, (A), 85–95.
- [42] Wenya Li, Achilles Vairis, Michael Preuss & Tiejun Ma, “Linear and rotary friction welding review”, International Materials Reviews, 2016.
- [43] P. Sathiya, S. Aravindan and A. N. Haq: ‘Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel’, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2007, 31, (11), 1076–1082.
- [44] M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati and A. B. Ismail, “Advances in friction welding process: a review”, Science and Technology of Welding and Joining 2010 VOL 15 N° 7, 534-558.
- [45] D.D. Kautz, “Fundamentals of Friction Welding”, ASM Handbook, Volume 6A, Welding Fundamentals and Processes, 2011.
- [46] (<https://bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction>).
- [47] Koen Faes, (IBS): soudage par friction (traduction: M.C. Ritzen-IBS.BIL), <http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction>. (12 avril 2018).
- [48] CASTRO, R. Historique des aciers inoxydables, les aciers inoxydables. 1990. Les éditions de physique.

- [49]. A. Belattar : ‘Analyses multi-echelles du comportement et la durée de vie d’aciers inoxydables 304L sous sollicitations cycliques avec pré-écrouissage’, Thèse de doctorat, l’Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Rouen, Février 2013.
- [50] D. Gentet : ‘Compréhension et modélisation du comportement mécanique cyclique anisotherme de l’acier austénitique AISI 316L(N)’, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, Novembre 2009.
- [51] B. Belkessa : 'influence des traitements de hautes températures sur le comportement structural et mécanique des soudures en acier inoxydable duplex 2205'. Mémoire de Magister, Université Saad Dahleb de Blida, 2005.
- [52] S. Mahmoudi : 'Etude comparative entre deux métaux passifs en milieux neutre, alcalinet acide: un acier inoxydable 304L et un alliage de titane Ti6Al4V', mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, Mars 2008.
- [53] S. Bradai : 'Etude de l'effet de l'équibiaxialité sur la durée de vie en fatigue de l'acier inoxydable austénitique', Thèse de doctorat, L’Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et D’Aérotechnique, Décembre 2014
- [54] B.Van Hecke:‘Le potentiel de l’acier inoxydable au formage’ Article,EuroInox, Première édition 2008
- [55] <https://expertisemetallurgique.wordpress.com/2020/01/24/acier-inoxydable/>.
- [56] J.Andre, Thèse ,INP Grenoble,2007.
- [57]. Bencharef, M.K., Les défauts de soudage. Octobre 2011 « YAMANI INSTITUTE OF TECHNOLOGY » COSIDER Canalisation Biskra.
- [58] Contrôle non destructif : définition de Contrôle non destructif et synonymes de Contrôle non destructif (français) (le parisien.fr)
- [59] « Les A. Lambert, J.Rivinez et G. Waché contrôles non destructifs ». 3ème édition du Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM). 1994.
- [60] Institut soudure formation: tout le type de contrôle non destructif

- [61] Support de cours CND–chapitre–5-la-radiographie.pdf (technologuepro.com)
- [62] P.Ludwik, Elément de Technologischen Mechanik, Verl. Julius Springer, 1909, 32.
- [63] J.H.Hollomon, Tensile de formation, Trans. AIME 162(1945)268–290.
- [64] H.W.Swift, Plastic instability under planar stress, J. Mech. Phys. Solids 1(1952) 1–18.
- [65] D.C.Ludwigson, Modified stress–strain relation for FCC metals and alloys, Metall. Trans 2 (1971) 2825–2828.

Liste des tableaux

Tableau I.1 -Propriétés mécaniques du AISI 304L et AISI316L [12].....	10
Tableau I.2 -Limite De Composition Chimique de l'AISI304L et AISI 316 L [33].....	10
Tableau I.3 -Etapas de ressuage [16].....	15
Tableau I.4 -Avantages et Inconvénients des méthodes de CND [21].....	18
Tableau III.1 -Conditions d'opérations de soudage.....	27
Tableau IV.1 :Caractéristiques mécaniques post-soudage des deux métaux AISI304L-AISI 316L	
Tableau IV.3 : Paramètres d'écrouissage monotone de la loi de Hollomon	
Tableau IV. 4 : Paramètres d'écrouissage monotone de la loi de Swift	
Tableau IV.5 :Paramètres d'écrouissage monotone de la loi de Ludwigson	

Liste des figures

Figure I.1. Principe général de soudage par friction rotative.....	05
Figure I.2. Variations du couple de frottement durant la phase de friction [5].....	
Figure I.3. Interaction des surfaces pendant la phase de friction [6].....	06
Figure I.4. Processus du soudage par friction rotative à entraînement direct [7].....	07
Figure I.5. Variations des paramètres du soudage par friction rotative Direct [6].....	07
Figure I.6. Exemples de pièces soudées par friction rotative [8].....	08
Figure I.7. Diagramme d'extraction [15].....	
Figure I.8. Principe de la dureté Brinell [15].....	13
Figure I.9. Principe de la dureté Rockwell [15].....	
Figure I.10. Principe de la dureté Vickers [15].....	13
Figure I.11. Principe du contrôle non destructif [22].....	
Figure I.12. Schéma représente les différentes bandes de son [22].....	
Figure I.13. Principe des ultrasons [22].....	
Figure I.14. Longueurs d'ondes des RX et γ [28].....	17
Figure I.15. Impression de l'image du défaut sur le film radiographique [28].....	17
Figure II.1. Accostage des deux pièces à soudées.....	20
Figure II.2. Résultat de la friction entre la pièce mise en rotation à gauche et la pièce mise en translation axiale F_1 , pour faire l'augmentation de la température autour de l'interface des deux parties.....	21
Figure II.3. Diffusion de la chaleur accumulée en rotation pour laisser place au forgeage freinée par l'application d'une force axiale F_2	21
Figure II.5. À gauche échantillons: avant soudage (métal de base) et à droite : après soudage	
Figure II.4. Profil d'un joint de soudure par friction.....	21
Figure II.6. Photo du Pénétrant et le Révélateur	23
Figure II.7. Pépète de commande COMET	24
Figure II.8. Générateur COMET	24
Figure II.9. Négatoscope qui interprète les clichés	24
Figure II.10. Poste ultrasons type impulsion	25
Figure III.8A: Contrôle par ressuage des joints soudés, conditions (A,B,C,DetE)	

Figure III.1B: Contrôle par rayons X des joints soudés, conditions (1, 2, 3,4 et 5)	29
Figure III.2. Contrôle par rayons X de la pièce(1) Face A, Face B	30
Figure III.3. Contrôle par rayons X de la deuxième pièce Face A, Face B	30
Figure III.4. Contrôle par rayons X de la troisième pièce Face A, Face B	.31
Figure III.5. Contrôle par rayons X de la quatrième pièce Face A, Face B...	.31
Figure III.6. Contrôle par rayons X de la cinquième pièce Face A, Face B	.31
Figure III.7: Contrôle par radiographie des joints (A, B,C, soudés, conditions D et E)	
Figure III.8. Condition(1), (a)avec bourrelet et(b) sans bourrelet 33
Figure III.9. Condition(2),(a)avec bourrelet et(b)sans bourrelet.....	33
Figure III.10. Condition(3),(a)avec bourrelet et(b)sans bourrelet.....	33
Figure III.11: Condition(4),(a)avec bourrelet et(b)sans bourrelet.....	34
Figure III.12: Condition(5),(a)avec bourrelet et(b)sans bourrelet	
Figure III.13 : Contrôle par ultrason de la condition (A), (a) avec bourrelet et (b) sans bourrelet.....	35
Figure III.14 : Contrôle par ultrason de la condition (B), (a) avec bourrelet et (b) sans bourrelet.....	35
Figure III.15 : Contrôle par ultrason de la condition (C), (a) avec bourrelet et (b) sans bourrelet.....	35
Figure III.16 : Contrôle par ultrason de la condition (D), (a) avec bourrelet et (b) sans bourrelet.....	36
Figure III.17 : Contrôle par ultrason de la condition (E), (a) avec bourrelet et (b) sans bourrelet.....	36
Figure IV.1: Essais de traction nominale post-soudage des métaux de bases42
Figure IV.2: Courbe d'écrouissage selon Ludwik	43
Figure IV.3: Courbe d'écrouissage selon Hollomon	44
Figure IV.4: Courbe d'écrouissage selon Swift46
Figure IV.5: Courbe d'écrouissage selon Ludwigson	47
FigureIV.6: Comparaison des quatre modèles avec les résultats expérimentaux obtenus sur les deux matériaux de base, le AISI 304L et AISI 316L.....	48
FiguresIV.7: Courbes de traction comparatives post-soudage avec les trois modèles et avec les résultats expérimentaux, cas de l'AISI 304 L	49
FiguresIV.8: Courbes de traction comparatives post-soudage avec les trois modèles et avec les résultats expérimentaux, cas de l'AISI 316 L	50