

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبي بكر بلقايد تلمسان -  
Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## THESE

Présenté pour l'obtention du grade de DOCTEUR en SCIENCES

En : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication mécanique et productive

Présenté par : *BENCHADLI ISMAIL*

Intitulé du Sujet

**Etude et analyse des ruptures des soudures par points  
des peels joints**

M. AMIRAT Mohamed	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M. BENACHOUR Mustapha	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
M. SEBAA Féthi	Professeur	Université de Tlemcen	Co directeur de thèse
M. BOUCHOUICHA Benattou	Professeur	Université de Sidi Bel Abbas	Examineur
M. RAHOU Mohammed	Professeur	ESSA Tlemcen	Examineur

Année Universitaire : 2024-2025

# DEDICACES

A mes chers parents, mes frères et sœurs.

A mes Collègues et responsables de l'unité E.A.T.I.T.

A tous ceux qui me connaissent.

## REMERCIEMENTS

Je veux remercier Dieu pour l'opportunité d'étudier et d'apprendre.

Je remercie aussi mon Directeur de thèse, M. Benachour Mustapha, pour son aide précieuse pendant notre projet.

Je suis reconnaissant à M. Sebaa Fethi, Co-directeur de thèse, pour sa contribution importante.

Merci au Président du jury d'examiner mon projet de fin d'études.

Je remercie chaleureusement les examinateurs pour leur participation au jury.

Je suis reconnaissant à Monsieur Abderrahmane Hafs, directeur de l'unité E.A.T.I.T, pour son soutien dans les travaux expérimentaux.

Enfin, merci à ma famille et à mes amis pour leur soutien constant et leurs encouragements.

## RESUME

Cette recherche vise à analyser l'influence des paramètres de soudage par résistance par points (RSW) sur les propriétés mécaniques et structurelles des assemblages d'acier inoxydable austénitique AISI 316L d'épaisseur 1,5 mm. L'étude évalue spécifiquement la corrélation entre les variables du procédé - courant électrique, pression des électrodes et durée des cycles - et la résistance au cisaillement en traction des joints. Une attention particulière est portée à la caractérisation de la géométrie du noyau de soudure, notamment le diamètre d'indentation et la profondeur de pénétration, dans des configurations de joints à recouvrement et de type Peel. Cette analyse approfondie permettra d'établir les paramètres optimaux de soudage par points pour ce matériau et de déterminer le facteur d'intensité de contraintes critique (FICC), données essentielles pour garantir l'intégrité structurelle des assemblages dans des applications industrielles exigeantes.

**Mots-clés :** Soudage par résistance par points ; Paramètres de soudage ; Peel joints ; Facteur d'intensité de contraintes critique ; Acier inoxydable AISI 316 L.

## ABSTRACT

This research aims to analyze the influence of resistance spot welding (RSW) parameters on the mechanical and structural properties of 1.5 mm thick austenitic stainless steel AISI 316L joints. The study specifically evaluates the correlation between process variables — welding current, electrode pressure, and weld time — and the tensile shear strength of the joints. Particular attention is given to the characterization of the weld nugget geometry, notably the indentation diameter and penetration depth, in both lap joint and peel joint configurations. This in-depth analysis will help determine the optimal RSW parameters for this material and identify the critical stress intensity factor (CSIF), essential data for ensuring the structural integrity of joints used in demanding industrial applications.

**Keywords:** Resistance spot welding; Welding parameters; Coach peel joints; Fracture toughness; stainless steel.

## الملخص

تستهدف هذه الدراسة تحليل تأثير اعدادات اللحام بالمقاومة على الخصائص الميكانيكية والبنوية لوصلات من الفولاذ الأوستيني المقاوم للصدأ بسماكة 1.5 مم. تقيم الدراسة العلاقة بين هذه اعدادات اللحام النقطي (التيار الكهربائي، وقت اللحام وضغط الأقطاب) ومقاومة القص بالشد للوصلات. يتم التركيز بشكل خاص على شكل نقطة اللحام (قطر النواة وعمقها) بالنسبة

للوصلات المترابطة والمسحوبة. اذ ستمكّن هذه التحليلات المعمّقة من تحديد المعاملات المثلى للحام النقطي وكذلك تحديد عامل شدة الإجهاد الحرج. وهي بيانات ضرورية لضمان السلامة البنيوية للوصلات في التطبيقات الصناعية.

**الكلمات المفتاحية:** لحام المقاومة النقطي، إعدادات اللحام، الوصلات المسحوبة، عامل شدة الإجهاد الحرج، الفولاذ الأوستيني

المقاوم  
للصدأ.

# LISTES DES FIGURES

## CHAPITRE I : Généralités sur le processus de soudage par résistance par points

Figure. 1 Formation point de soudure .....	6
Figure. 2 Schéma de principe du soudage par points .....	6
Figure. 3 Machine à souder par points .....	7
Figure. 4 Comparaison de la forme et de la taille des noyaux simulés avec le résultat expérimental sous un courant continu .....	8
Figure. 5 Diagramme des propriétés mécaniques de différents aciers .....	9
Figure. 6 Microstructure austénitique.....	10
Figure. 7 Microstructure ferritiques.....	10
Figure. 8 Microstructure duplex .....	11
Figure. 9 Microstructure martensitique.....	12
Figure. 10 Courbe de la gamme d'intensité de courant .....	14
Figure. 11 Courbe de lobe .....	14
Figure. 12 Diagramme de Schaeffler.....	16
Figure. 13 Diagramme de WRC-1992.....	16
Figure. 14 Diagramme pseudo-binaire .....	17
Figure. 15 Zone appauvrie en chrome du a la formation des carbures de chrome aux joints des grains et site de la corrosion inter granulaire .....	18
Figure. 16 Échantillons de test pour (a) un test de pelage, (b) un cisaillement par recouvrement, et (c) des conditions de chargement en traction en U.....	19
Figure. 17 Principe d'inspection d'une fissure par ultrasonique méthode.....	20
Figure. 18 Détection de la longueur des fissures par la radiographie .....	20

Figure. 19 Thermographie pulsée par courants de Foucault (ECPT) .....	21
Figure. 20 Principe de l'inspection de la qualité des soudures par caméra IR .....	22

## **CHAPITRE II : Généralités sur la mécanique de la rupture**

Figure. 1 Définition des trois modes d'ouverture des fissures .....	28
Figure. 2 Fissure transversale dans une plaque avec largeur $\gg 2a$ .....	28
Figure. 3 Les chemins de propagation des fissures .....	30
Figure. 4 Joint par recouvrement sous la force de charge maximale F .....	31
Figure. 5 Les peels joints sous la force de charge P .....	32
Figure. 6 Schéma des différents modes de rupture dans les RSW .....	33
Figure. 7 Effet du courant de soudage et du temps de soudage sur la charge de traction-cisaillement des soudures par points .....	34
Figure. 8 a) Effet de temps de soudage sur le diamètre de noyau b) effet du temps de soudage sur l'épaisseur de noyau .....	34
Figure. 9 Effet du courant de soudage et de la force de l'électrode sur la charge en cisaillement	35
Figure. 10 Effet du courant de soudage et de la force de l'électrode sur la dureté .....	35
Figure. 11 Charge maximale de traction et de cisaillement en fonction du diamètre du noyau de la soudure pour les modes de rupture par arrachement et par cisaillement .....	36
Figure. 12 Effet de courant de soudage sur la charge maximale en cisaillement de l'acier 316L	37
Figure. 13 Microstructure du noyau de soudage pour AISI 316 L.....	38
Figure. 14 Courbe charge-déplacement.....	39

Figure. 15 Distribution de la microdureté des zones soudées .....	39
Figure. 16 Microstructure de la section soudée de l'acier inoxydable austénitique 316L .....	40
Figure. 17 Facteurs d'intensité de contrainte équivalente en fonction du nombre de cycles jusqu'à la rupture pour les joints par recouvrement, traction transversale et les peels joints .....	41
Figure. 18 Evolution de la ténacité en fonction de la dureté Hv .....	41
Figure. 19 Facteur d'intensité de contrainte critique en fonction du courant de soudage .....	42
Figure. 20 Facteur d'intensité de contrainte critique KIIC en fonction de la dureté Hv .....	42
Figure. 21 (a Évolution de la ténacité KC en fonction de la taille du noyau pour des soudures par points réalisées sur des aciers inoxydables martensitiques de 1,5 mm d'épaisseur (étude actuelle) et de 1,2 mm d'épaisseur (b Tracé du PIF en fonction de 1,44 Dt 0,5 pour des soudures par points sur des aciers inoxydables martensitiques de 1,5 mm d'épaisseur. La ligne linéaire à ordonnée à zéro montre que la charge maximale est contrôlée par ZF, la ténacité .....	43

### **CHAPITRE III : Etude expérimentale**

Figure. 1 Eprouvettes en acier 316L préparées pour les essais de caractérisations mécaniques ....	49
Figure. 2 Eprouvette d'essai de traction après la rupture .....	50
Figure. 3 Courbes charges-déplacements de l'acier 316L.....	50
Figure. 4 Courbes contraintes-déformations de l'acier 316L .....	51
Figure. 5 Eprouvettes de Peel joints .....	52
Figure. 6 Eprouvettes des joints par recouvrement.....	53
Figure. 7 a) Machine de soudage « TECNA », b) les outils de commande les paramètres de soudage .....	54
Figure. 8 Joints par recouvrement et Peel-joints après le soudage .....	54
Figure. 9 Machine d'Essai Controlab.....	56

Figure. 10 Éprouvettes fracturées après l'essai de cisaillement par traction .....57

Figure. 11 Méthode de mesure le noyau de soudure selon les normes AWS.....58

## **CHAPITRE IV : Résultats et discussion**

Figure. 1 Courbes Charge/Déplacement sous l'effet du courant de soudage pour les joints par recouvrement pour T= 11 cycles et F= 8 bars .....62

Figure.2 Courbes Charge/Déplacement sous l'effet du courant de soudage pour les peels joints pour T= 11 cycles et F= 8 bars .....63

Figure. 3 Courbes de charge/déplacement sous l'effet du temps de soudage pour les joints par recouvrement pour I= 16 kA et F= 8 bars .....64

Figure. 4 Courbes de charge/déplacement sous l'effet du temps de soudage pour les peels joints pour T= 11 cycles et F= 8 bars .....65

Figure. 5 Effet du courant de soudage sur le diamètre du noyau pour F=6 bars .....66

Figure. 6 Effet du courant de soudage sur le diamètre du noyau pour F = 8 bars .....67

Figure. 7 Effet du courant de soudage sur la pénétration pour F=6 bars .....68

Figure. 8 Effet du courant de soudage sur la pénétration pour F=8 bars .....68

Figure. 9 Effet du courant de soudage sur FICC d'un joint par recouvrement pour F=6 bars .....69

Figure. 10 Effet du courant de soudage sur FICC d'un joint par recouvrement pour F=8 bars .....70

Figure. 11 Effet du courant de soudage sur FICC pour peel joints pour F= 6 bars .....71

Figure. 12 Effet du courant de soudage sur FICC pour peel joints pour F= 8 bars .....71

Figure. 13 Effet du temps de soudage sur FIC pour joint par recouvrement pour F=6 bars .....72

Figure. 14 Effet du temps de soudage sur FICC pour joint par recouvrement pour F=8 bars.....73

Figure. 15 Effet du temps de soudage sur FICC pour les peel joint pour F=6 bars.....74

Figure. 16 Effet du temps de soudage sur FIC pour les peels joints pour F=8 bars .....74

Figure. 17 Déboutonnage de peel joint pour courant de soudage de 8 KA a 16 KA, temps de soudage 10 cycles et force de soudage 8 bars .....75

Figure. 18 Déboutonnage de peel joint pour courant de soudage de 8 KA a 16 KA, temps de soudage 11cycles et force de soudage 8 bars..... 76

Figure. 19 Déboutonnage de peel joint pour courant de soudage de 8 KA a 16 KA, temps de soudage 13 cycles et force de soudage 8 bars ..... 76

Figure. 20 Déboutonnage de joint par recouvrement pour courant de soudage de 8 KA a 16 KA, temps de soudage 10 cycles et force de soudage 8 bars ..... 76

Figure. 21 Déboutonnage de joint par recouvrement pour courant de soudage de 8 KA a 16 KA, temps de soudage 11 cycles et force de soudage 8 bars ..... 77

Figure. 22 Déboutonnage de joint par recouvrement pour courant de soudage de 8 KA a 16 KA, temps de soudage 13 cycles et force de soudage 8 bars ..... 77

## LISTES DES TABLEAUX

### CHAPITRE I : Généralités sur le processus de soudage par résistance par points

Tableau. 1 les domaines d'application des aciers inoxydables ..... 12

### CHAPITRE III : Etude expérimentale

Tableau. 1 Désignations de l'acier inoxydables Cr-Ni-Mo ..... 48

Tableau. 2 Composition chimique pour de l'acier AISI 316..... 49

Tableau. 3 Caractéristiques physiques de l'acier AISI 316..... 49

Tableau. 4 Comparaisons entre les résultats expérimentaux et les résultats de constructeur ..... 51

Tableau. 5 Paramètres de soudage sélectionnés ..... 55

## ABRÉVIATIONS ET NOMENCLATURE

**RSW**: Resistance spot welding.

**ZAT** : Zone affectée thermiquement.

**Q** : Apport de chaleur (J).

**T** : Temps de soudage (S).

**I** : Courant de soudage (KA).

**R** : Résistance électrique dynamique globale des pièces (Ohm).

**K** : Facteur d'intensité de contrainte ( $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ ).

**a** : Demi-longueur de la fissure.

**E** : Module d'élasticité (Gpa).

**$\sigma$**  : Contrainte appliquée (Mpa).

**F** : Force de charge maximale (KN).

**D** : Diamètre de noyau (mm).

**t** : Epaisseur de la tôle (mm).

**P** : Force de charge maximale (KN).

**e** : Excentricité de la de charge maximale (mm).

**FIC** : Facteur d'intensité des contraintes ( $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ ).

**PF**: Déboutonnage (pull out failure).

**IF**: Rupture interfacial (interfacial failure).

**PIF**: Rupture interfacial partielle (partial interfacial failure).

**L0** : Longueur original (mm).

**Lf**: Longueur final (mm).

**AWS**: American welding society.

**FICC** : Facteur d'intensité de contraintes critique ( $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ )

# Table des matières

RESUME .....	III
Abstract.....	III
الملخص.....	III
LISTES DES FIGURES .....	IV
LISTES DES TABLEAUX.....	IX
ABRÉVIATIONS ET NOMENCLATURE .....	X
Introduction générale .....	2
<b>CHAPITRE I : Généralités sur le processus de soudage par résistance par points .....</b>	<b>4</b>
<b>I. Soudage par résistance par points.....</b>	<b>5</b>
I.1 Introduction .....	5
I.2 Principe du procédé.....	5
I.3 Equipements et paramètres du soudage .....	6
I.3.1 Equipment .....	6
I.3.2 Paramètres du processus .....	7
I.4 Génération de chaleur.....	7
I.5 Matériaux préférés pour soudage par point .....	8
<b>II. Aciers inoxydables .....</b>	<b>9</b>
II.1 Introduction.....	9
II.2 Classification de les aciers inoxydable .....	9
II.3 Applications des Aciers Inoxydables .....	12
<b>III. Soudage des aciers inoxydable .....</b>	<b>12</b>
III.1 Courbe d'intensité du courant et Courbe de lobe .....	13
III.2 Métallurgie du soudage des aciers inoxydables austénitiques .....	14
III.3 Prédiction de la microstructure de l'acier inoxydable austénitique dans le soudage par points (RSW) .....	15
III.4 Précipitation de carbures.....	17
<b>IV. Méthodes de contrôle du RSW .....</b>	<b>18</b>
IV.1 Contrôle destructif .....	18
IV.2 Contrôle non destructif.....	19
IV.2.1 Essais par Ultrasons (UT) .....	19

IV.2.2 Radiographie (RT).....	20
IV.2.3 Thermographie pulsée par courants de Foucault (ECPT).....	21
IV.2.4 Thermographie Infrarouge (IR) .....	21
Conclusion .....	22
RÉFÉRENCES .....	22
<b>CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture .....</b>	<b>26</b>
I. Mécanique de la rupture.....	27
I.1 Historique de la mécanique de la rupture .....	27
I.2 Mode de rupture .....	27
I.3 Facteur d'intensité de contrainte.....	28
II. Mécanique de la Rupture dans le Soudage par Points Résistants (RSW).....	29
II.1 Introduction .....	29
II.2 Fissures de soudage par point et mécanismes de rupture.....	29
III. Contexte du calcul analytique de facteur d'intensité de contraintes critiques .....	30
III.1 Joints par recouvrement.....	31
III.2 Peel joints .....	31
IV. Modes de ruptures des soudures par points.....	32
IV.1 Déboutonnage.....	32
IV.2 Défaillance interfaciale partielle .....	33
IV.3 Défaillance interfaciale .....	33
V. Etat de l'art.....	33
V.1 Effets des paramètres de soudage .....	33
V.2 Analyse de la rupture des joints soudés par RSW.....	40
Conclusion .....	43
REFERENCES .....	44
<b>CHAPITRE III : Etude expérimentale.....</b>	<b>47</b>
I. Introduction.....	48
II. Matériaux d'étude (AISI 316L).....	48
II.1 Description .....	48
II.2 Propriétés chimiques et physiques.....	48
II.3 Caractérisation mécanique.....	49

III. Préparation les éprouvettes .....	52
III.1 Réalisation des peels joints.....	52
III.2 Réalisation des joints par recouvrement .....	52
IV. Procédure de soudage .....	53
IV.1 Machine de soudage.....	53
IV.2 Paramètres de soudage sélectionnés.....	54
V. Essai de traction.....	56
V.1 Définition .....	56
V.2 Machine d'essai Controlab .....	56
V.3 Méthodologie .....	56
VI. Mesure du noyau de soudure .....	57
Conclusion .....	58
RÉFÉRENCES .....	59
<b>CHAPITRE IV :<i>Résultats et Discussion</i> .....</b>	<b>60</b>
I. Introduction.....	61
II. Effet des paramètres de soudage sur les propriétés mécanique.....	61
II.1 Effet du courant de soudage sur les joints par recouvrement .....	61
II.2 Effet de courant de soudage pour les peels joints.....	62
II.3 Effet du temps de soudage pour les joints par recouvrement.....	63
II.4 Effet de temps de soudage pour les peels joints .....	64
III. Effet des paramètres de soudage sur le diamètre du noyau.....	65
IV. Effet des paramètres de soudage sur la pénétration au niveau du point de soudure .....	67
V. Effet des paramètres de soudage sur l'évolution du facteur d'intensité de contraintes critique (FICC).....	69
V.1 Effet du courant du soudage sur le FICC pour joint par recouvrement.....	69
V.2 Effet du courant du soudage sur FICC pour les joints par pelage.....	70
V.3 Effet du temps de soudage sur le FICC pour les joints par recouvrement.....	72
V.4 Effet du temps de soudage sur le FICC pour les peels joints .....	73
IV. Mode de rupture .....	75
Conclusion .....	77
REFERENCES .....	78

**Conclusion générale et perspectives ..... 81**

# **Introduction**

## **générale**

## Introduction générale

Le soudage par résistance par points (RSW) constitue une technique cruciale pour l'assemblage des matériaux métalliques, largement adoptée dans des secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale et l'électroménager. Sa capacité à générer rapidement des soudures robustes et fiables en fait un procédé indispensable dans la fabrication contemporaine. Cette thèse examine l'impact des paramètres de soudage sur les propriétés mécaniques (Les courbes de charge déplacements et le facteur d'intensité de contraintes critique) des joints soudés en acier inoxydable AISI 316L, en s'appuyant sur une approche intégrant des études théoriques, expérimentales et analytiques.

L'introduction offre un aperçu des chapitres suivants, qui posent les fondations de cette recherche. Le premier chapitre présente une vue d'ensemble du procédé RSW, en détaillant son principe de fonctionnement, les équipements employés et les paramètres critiques tels que le courant, la durée de soudage et la force d'électrode. Une attention particulière est portée à la génération de chaleur par effet Joule et à la formation des noyaux de soudure. Ce chapitre aborde également les matériaux fréquemment utilisés, notamment les aciers inoxydables austénitiques, en soulignant leurs remarquables propriétés de résistance à la corrosion et leur aptitude au soudage.

Dans le deuxième chapitre, les concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture sont introduits, y compris les modes de rupture (I, II, III) et le facteur d'intensité de contrainte (FIC). Une attention particulière est également accordée à la modélisation analytique gouvernant le comportement des fissures dans les joints soudés, avec des équations permettant d'évaluer le FICC sous diverses configurations de chargement.

. Les études présentées démontrent comment ces analyses peuvent prédire la performance et la durabilité des joints soudés.

Le troisième chapitre fournit une analyse détaillée des étapes expérimentales effectuées sur l'acier inoxydable AISI 316L. Il examine deux types de joints : les joints par pelage et les joints par recouvrement. Ce chapitre aborde la préparation des éprouvettes, les paramètres de soudage, notamment le courant, la durée et la force de l'électrode, ainsi que les essais mécaniques réalisés, en particulier les tests de cisaillement. Les diamètres des noyaux mesurés et les résultats des essais de chargement par cisaillement sont utilisés pour évaluer le FICC en fonction des paramètres de soudage.

Ce chapitre se concentre sur une double analyse : premièrement, l'étude approfondie des corrélations directes entre les paramètres de soudage et la performance mécanique des joints assemblés, et deuxièmement, la détermination précise des conditions opératoires optimales permettant d'obtenir des soudures de haute qualité et d'intégrité structurelle irréprochable.

Dans le quatrième chapitre, les résultats des essais sont examinés en profondeur afin de comprendre l'effet des paramètres de soudage sur :

- Les propriétés mécaniques des joints, illustrées par les courbes charge-déplacement.
- Le diamètre et la pénétration des noyaux de soudure, qui sont des indicateurs de la qualité des soudures.
- Le facteur d'intensité critique des contraintes (FICC), un indicateur essentiel de la robustesse des joints soudés.
- Les modes de rupture, notamment le déboutonnage, en fonction des paramètres de soudage.

Ce chapitre présente également un ensemble de préconisations techniques rigoureuses pour l'ajustement optimal des paramètres du procédé de soudage, avec pour objectif l'amélioration significative des propriétés mécaniques et de la longévité des assemblages soudés en acier inoxydable austénitique AISI 316L, garantissant ainsi leur fiabilité dans des conditions d'exploitation exigeantes.

# CHAPITRE I :

*Généralités sur le processus de soudage par résistance par points*

## I. Soudage par résistance par points

### I.1 Introduction

Le soudage par points (RSW) est un procédé essentiel de la fabrication moderne, car il offre une efficacité, une fiabilité et une solidité inégalées dans l'assemblage des composants métalliques. Ce procédé trouve une application omniprésente dans diverses industries, principalement l'automobile, électroménager, l'aérospatiale et autres. Ce procédé est caractérisé par sa rapidité, sa précision et sa polyvalence et facilitant l'assemblage des panneaux de carrosserie, des composants de châssis et des éléments structurels avec une efficacité inégalée. Les technologies de fabrication évoluent, tout comme le paysage du soudage par résistance par points, qui est sur le point de connaître de nouvelles avancées grâce à l'innovation en matière de technologie et de matériaux [1, 2].

### I.2 Principe du procédé

Des tôles de métal pressées en clin entre deux électrodes sont illustrées pour garder l'assemblage en contact. Un courant électrique fait traverser deux tôles en clin, ce qui génère un noyau givré au contact des deux tôles (Figure. 1). Lorsque le noyau refroidit, elle maintient les deux tôles en permanence [3].

Le cycle du procédé est divisé en trois grandes phases (Figure. 2) :

- \* *Phase accostage* : les électrodes entrent en contact avec les tôles à assembler avec une pression de quelques bars.
- \* *Phase soudage* : caractérisé par un passage de courant de plusieurs kA entre les électrodes et les tôles et a pour conséquence la formation d'un noyau.
- \* *Phase forgeage* : L'effort est toujours appliqué sans avoir besoin de courant pour garder le noyau au frais [4].

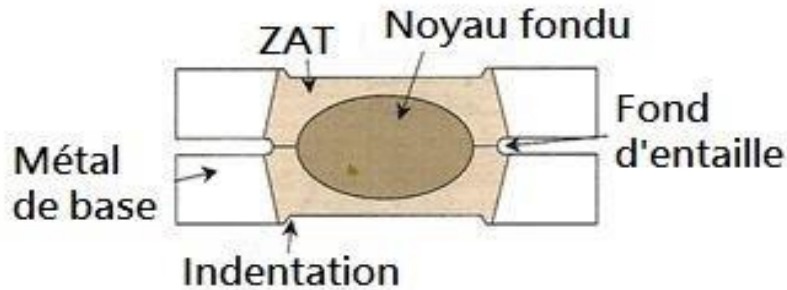


Figure. 1 Formation point de soudure [5].

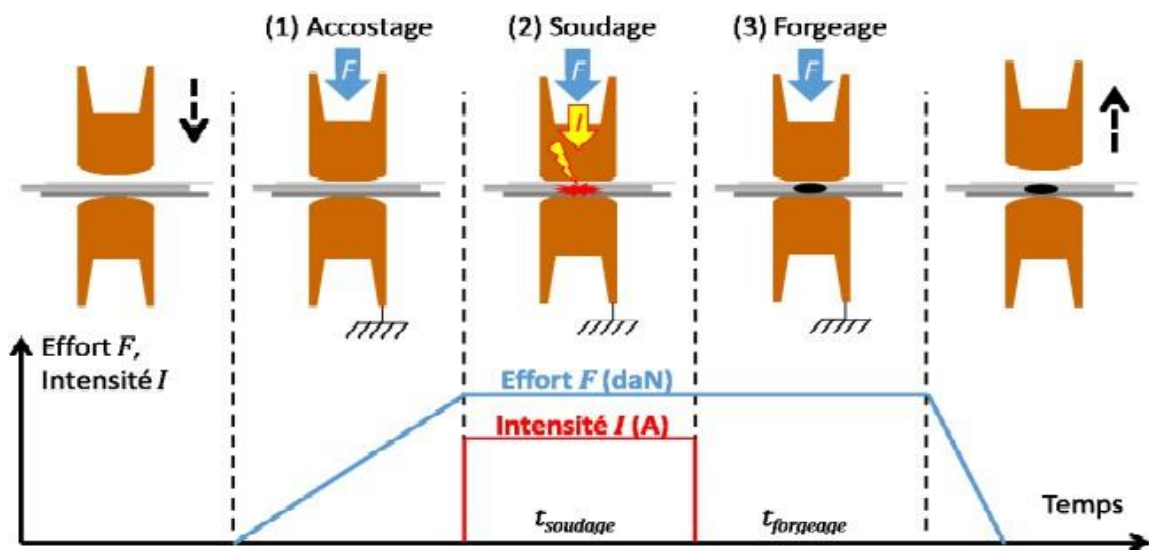


Figure. 2 Schéma de principe du soudage par points [4]

## I.3 Equipements et paramètres du soudage

### I.3.1 Equipement

\* *Alimentation électrique* : Il fournit l'énergie électrique nécessaire au soudage. Il comprend généralement des commandes permettant de régler des paramètres tels que le courant, la tension et le temps [6].

\* *Électrodes* : Les électrodes en alliage de cuivre sont couramment utilisées pour leur excellente conductivité thermique et leur résistance à l'usure [7].

\* *Machine à souder* : Comprend le mécanisme de serrage pour maintenir les pièces ensemble pendant le soudage et l'assemblage de l'électrode pour délivrer le courant à la zone de soudage [4].

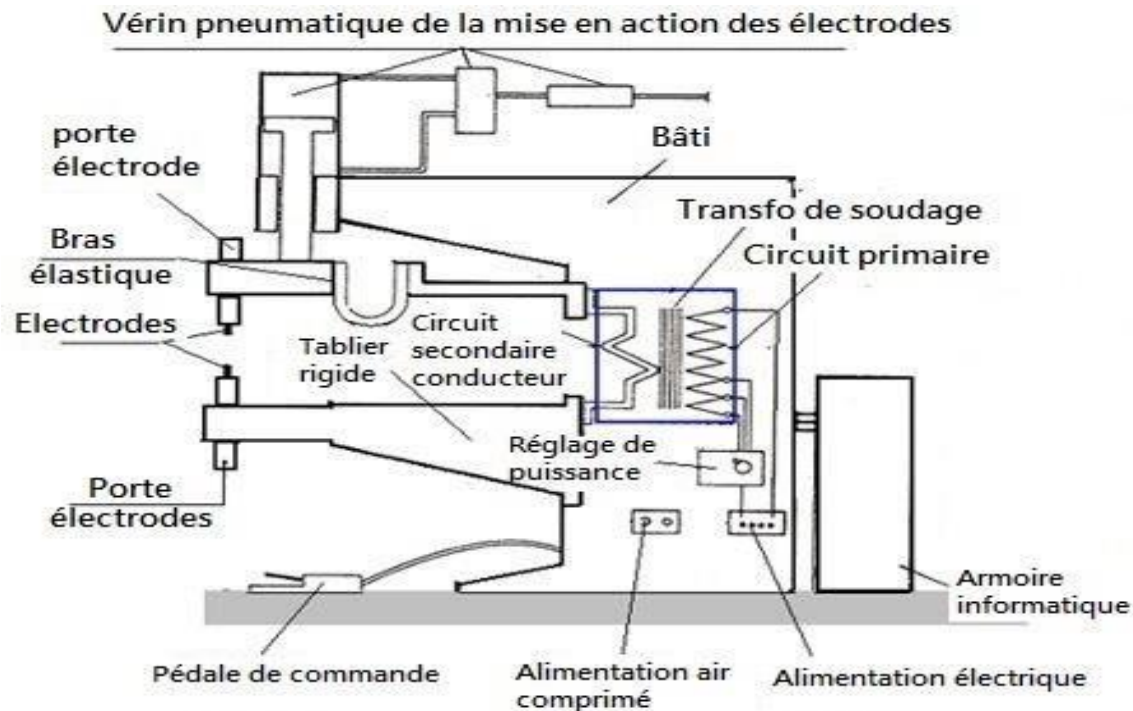


Figure. 3 Machine à souder par points [5].

### I.3.2 Paramètres du processus

Les principaux paramètres de soudage par points sont :

\* *Courant (I)* : Le principal paramètre de soudage, mesuré en ampères (A). Il influence la production de chaleur et donc la pénétration de la soudure et la taille des noyaux [8].

\* *Tension (V)* : Mesurée en volts (V), elle détermine l'apport d'énergie à la soudure. Le voltage affecte la formation de point de soudure et peut influencer la qualité de la soudure [9].

\* *Temps de soudage (t)* : La durée du passage du courant à travers les pièces, mesurée en secondes (s). Elle affecte la taille et la qualité du point de soudure [8].

\* *Force de l'électrode (F)* : La pression appliquée aux pièces par les électrodes pendant le soudage. Elle affecte la qualité de la soudure, la formation de noyau et le temps d'utilisation de l'électrode en question [10].

### I.4 Génération de chaleur

Dans le processus de soudage par points (RSW), la chaleur nécessaire au processus est générée par effet Joule, régie par l'équation suivante :

$$Q = I^2 * R * T \quad (1)$$

## CHAPITRE I : Généralités sur le processus de soudage par résistance par points

Dans le processus RSW, un noyau de soudure commence à se former lorsque suffisamment de chaleur a été appliquée à l'interface de contact pour initier la formation d'une piscine de soudure fondue (Figure.4). Après refroidissement, un noyau de forme elliptique est formé, maintenant les feuilles ensemble. Le processus RSW implique l'application simultanée d'une force suffisante et d'un courant électrique élevé pendant un court laps de temps pour maintenir le matériau fondu à l'intérieur du noyau de soudure. La force et le courant de soudage sont appliqués via des électrodes en alliage de cuivre refroidies par eau. Le courant de soudage, la force des électrodes, la durée (temps) de soudage et la résistance des pièces affectent l'apport thermique, qui à son tour détermine la taille du noyau formé. Un apport thermique excessif peut entraîner l'expulsion de métal liquide du noyau, tandis qu'un apport thermique insuffisant peut entraîner une fusion insuffisante [11].

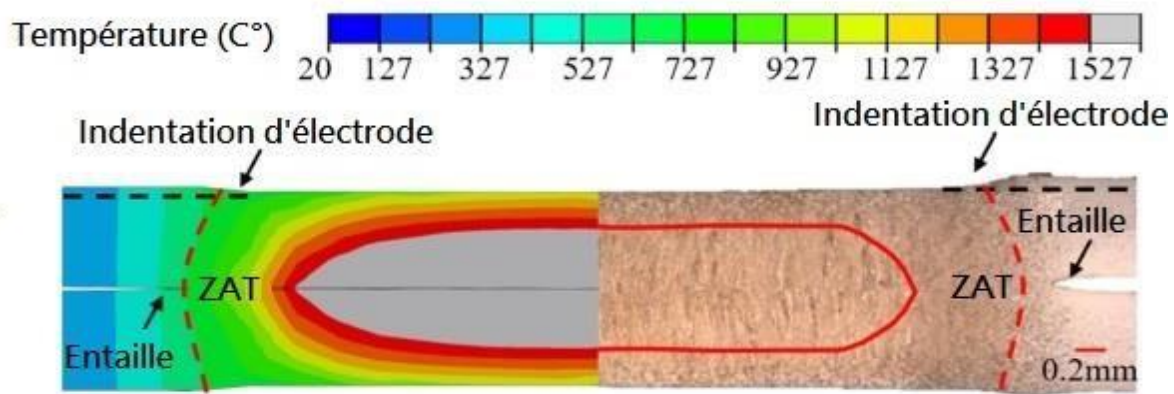


Figure. 4 Comparaison de la forme et de la taille des noyaux simulés avec le résultat expérimental sous un courant continu [12].

### I.5 Matériaux préférés pour soudage par point

Le soudage par points peut être utilisé pour souder des aciers à faible teneur en carbone et des alliages d'aluminium. Si des aciers à haut pourcentage de carbone et des aciers alliés sont soudés avec cette approche, la soudure peut devenir fragile. L'acier, en particulier l'acier de faible teneur en carbone, a une faible conductivité thermique et une résistance électrique élevée, ce qui le rend idéal pour le soudage par points. L'acier galvanisé revêtu de zinc a une demande de courant plus élevée que les aciers non revêtus. Lorsque l'on utilise une électrode en cuivre avec des alliages de zinc, la qualité de la surface de la soudure se dégrade. Les alliages de nickel et les alliages hyper austénitiques peuvent être employés dans des circonstances limitées en raison de l'absence de

ferrite dans ces alliages, ce qui les rend sujets à la fissuration. Il faut notamment tenir compte des angles de jointure plus importants [13].

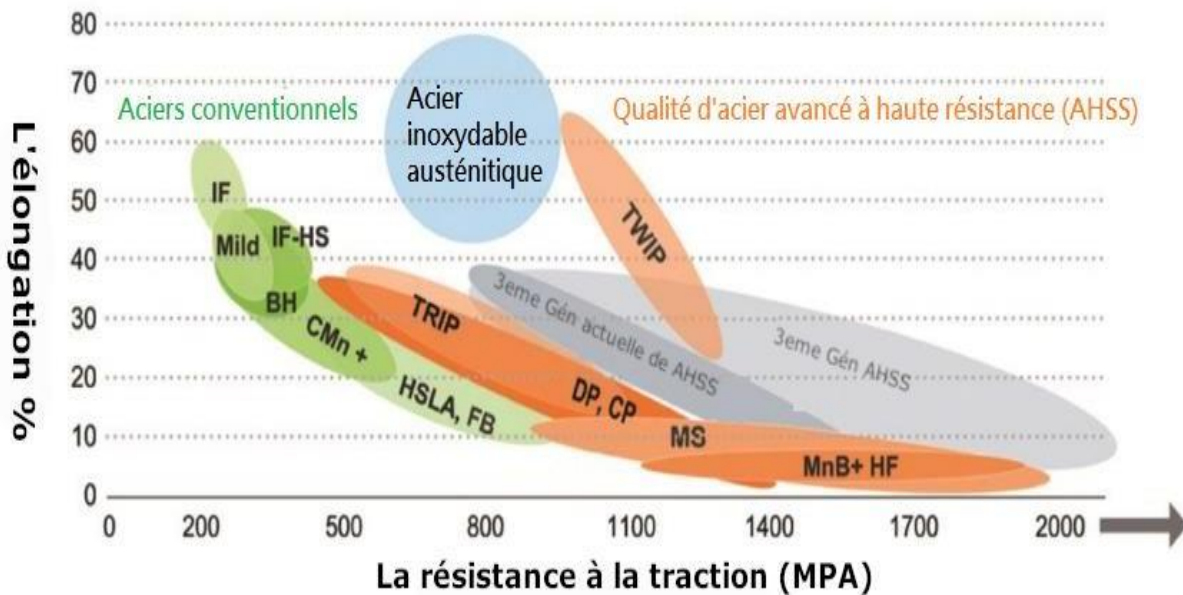


Figure. 5 Diagramme des propriétés mécaniques de différents aciers [14].

## II. Aciers inoxydables

### II.1 Introduction

L'acier inoxydable est un groupe d'alliages qui contient au moins 10,5 % de chrome, ainsi que des éléments d'alliage, comme le nickel, le manganèse, le molybdène, le soufre, le sélénium et le titane. Le chrome dans l'acier inoxydable est principalement responsable de la résistance à la corrosion et à la chaleur ; les éléments d'alliage sont utilisés afin d'améliorer la résistance à la corrosion et donner des propriétés mécaniques spécifiques et de soudabilité [15].

### II.2 Classification de les aciers inoxydable

Les alliages d'acier inoxydable employés à des fins structurelles se répartissent en quatre catégories principales : austénitiques, ferritiques, martensitiques et duplex. Ces catégories se distinguent principalement par des différences dans leur structure atomique. Bien que les aciers inoxydables austénitiques aient historiquement été les plus populaires, les aciers inoxydables duplex voient leur popularité croître de manière significative.

## CHAPITRE I : Généralités sur le processus de soudage par résistance par points

\* *Austénitique* : La structure atomique à faces centrées caractérise ces alliages. Le travail à froid peut les durcir, mais le traitement thermique n'est pas envisageable. Ils sont ductile, soudable et résistant à la corrosion.

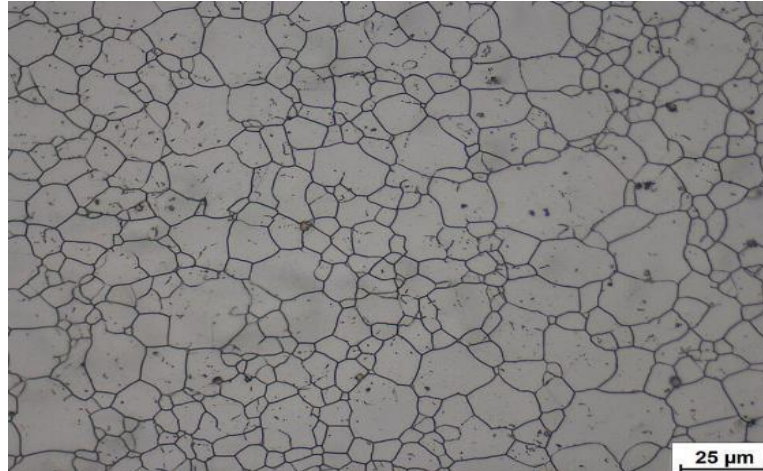


Figure. 6 Microstructure austénitique [16].

\* *Ferritiques* : La structure atomique centrée sur le corps caractérise ces alliages. Le traitement thermique ne les durcira pas, et le travail à froid ne les durcira que peu. Ils sont plus ductiles et plus résistants à la corrosion que les alliages austénitiques, leur soudabilité est supérieure et leur résistance est généralement plus élevée.



Figure. 7 Microstructure ferritiques [16].

\* *Duplex* : Ces alliages présentent un mélange de structures cristallines d'austénite et de ferrite. Ils présentent une ductilité élevée, une résistance à la corrosion excellente, et peuvent être durcis

par écrouissage. Ils sont faciles à souder et présentent une résistance élevée à la fatigue du métal [16].

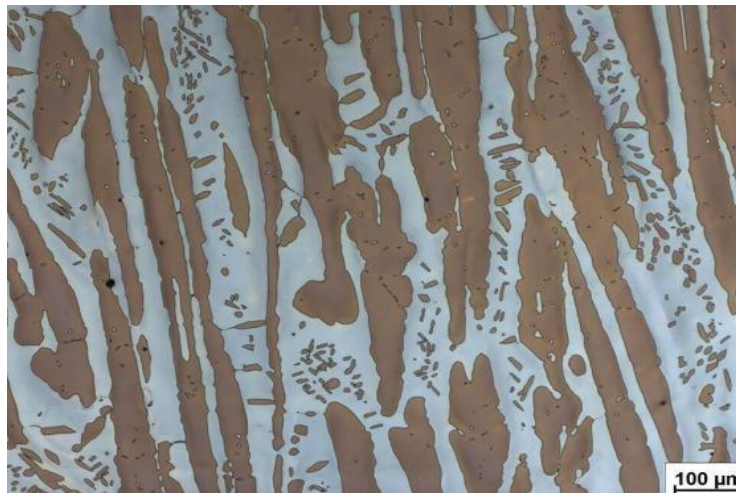


Figure. 8 Microstructure duplex [16].

\* *Martensite* : Les aciers inoxydables martensitiques constituent le plus petit groupe d'aciers inoxydables. Pour améliorer leur résistance et leur trempabilité, ils contiennent une teneur en carbone plus élevée que les autres grades, et parfois de l'azote est ajouté pour renforcer davantage la résistance. Ces aciers contiennent peu ou pas de nickel, et le molybdène y est rarement ajouté. L'ajout de nickel et la réduction de la teneur en carbone peuvent améliorer leur soudabilité, souvent médiocre. Parfois, du soufre est ajoutée pour améliorer l'usinabilité. Les aciers martensitiques sont magnétiques et durcissables. Les aciers de type durcissement par précipitation, également magnétiques, sont durcis par un mécanisme particulier impliquant la formation de précipités dans la microstructure [17].

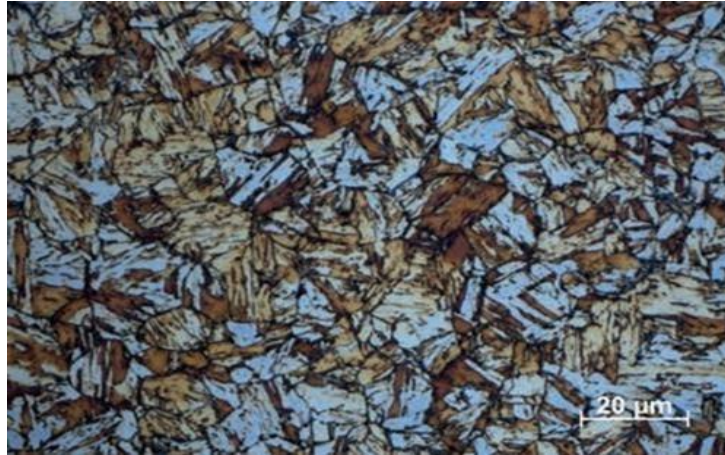


Figure. 9 Microstructure martensitique [17].

### II.3 Applications des Aciers Inoxydables

Les aciers inoxydables sont utilisés dans divers applications, principalement dans les industries chimiques et de l'ingénierie énergétique. Ces applications comprennent une gamme extrêmement diversifiée d'utilisations, telles que les réacteurs nucléaires, les échangeurs de chaleur, les tubes pour l'industrie pétrolière, les composants pour le traitement chimique et les industries du papier et de la pâte, les pièces de four, et les chaudières utilisées dans les centrales électriques à combustibles fossiles. L'importance relative des principaux domaines d'application des produits en acier inoxydable est dans le tableau [18] :

Tableau. 1 les domaines d'application des aciers inoxydable.

Application	Pourcentage %
Ingénierie chimique et énergétique.	34
Industrie agro-alimentaire	18
Transport	9
Architecture	5
Appareils ménagers, ustensiles de cuisine	28

### III. Soudage des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables austénitiques possèdent des propriétés uniques qui les distinguent clairement des autres types d'acier. Afin de bien d'assimiler les phénomènes qui se génèrent lors des opérations de soudage, il est essentiel d'explorer les concepts fondamentaux liés à leur composition, structure et utilisations. La structure austénitique en présence du nickel offre une

amélioration à la corrosion des aciers à alliage en chrome. De plus, les aciers inoxydables austénitiques sont reconnus pour leur grande ductilité et leur résilience aux chocs, leur capacité importante à l'écrouissage sans fragilisation (même à basse température), une meilleure résistance mécanique élevée à haute température, et une aptitude au soudage exceptionnelle [19,20].

### III.1 Courbe d'intensité du courant et Courbe de lobe

L'inspection visuelle de la qualité de la soudure en soudage par points (RSW) n'est pas possible en raison de l'emplacement caché de la soudure entre les tôles. Le contrôle de la qualité repose donc sur l'utilisation des courbes de la plage de courant et de la courbe des lobes.

\* *Courbe d'intensité du courant* : Elle montre la relation entre la taille du grain de soudure (diamètre) et le temps de soudage, les soudures acceptables étant produites dans des limites de courant spécifiques (Figure.10). Le courant maximal est limité par une expulsion excessive (gouttes de métal fondu causées par une surchauffe ou une force insuffisante de l'électrode).

\* *Courbe de lobe* : Générée à partir de plusieurs courbes de gamme de courant à différents temps de soudage, cette courbe définit une gamme de paramètres de courant et de temps de soudage qui produisent des soudures acceptables (Figure.11). La courbe se rétrécit lorsque les temps de soudage sont plus courts et les courants plus élevés, ce qui indique une marge d'erreur réduite.

La taille du point de soudure est cruciale pour déterminer la résistance de la soudure, le diamètre minimum étant généralement calculé comme suit :

$$D = 4\sqrt{t} \quad (2)$$

Les deux courbes permettent d'assurer une qualité de soudage constante en surveillant et en contrôlant les paramètres de soudage [21].

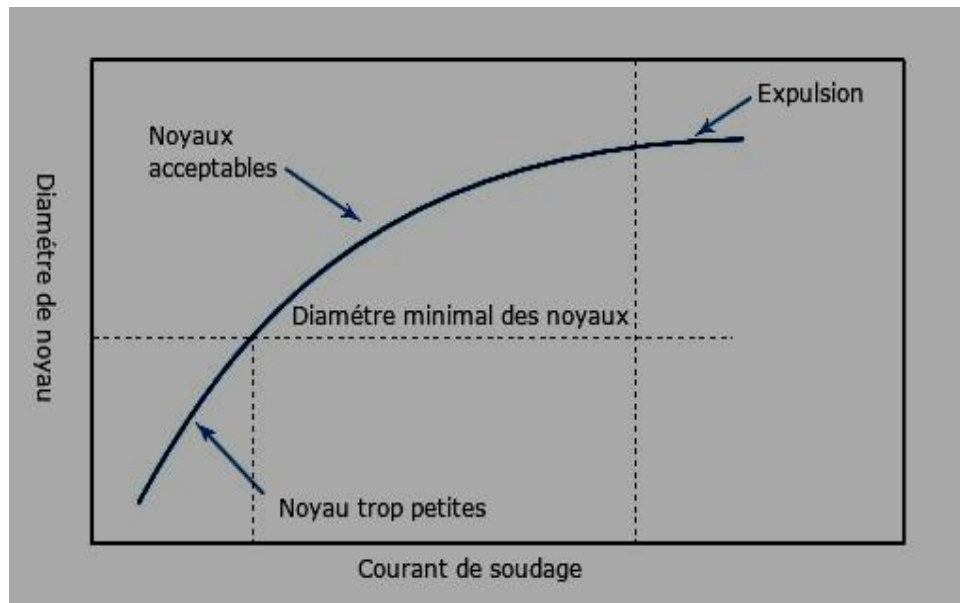


Figure. 10 Courbe de la gamme d'intensité de courant [21].

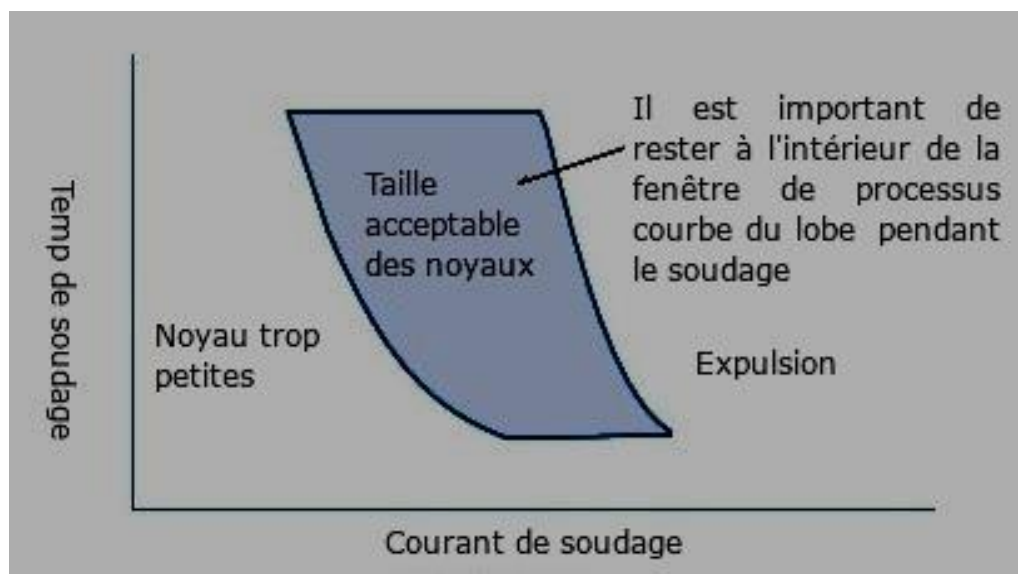


Figure. 11 Courbe de lobe [21].

### III.2 Métallurgie du soudage des aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques sont produits en plus grande quantité que tout autre grade. Leur microstructure est principalement composée d'austénite, mais peut contenir de petites quantités de ferrite. Avec meilleure résistance à la corrosion, ils présentent aussi des résistances équivalentes à celles des aciers doux. Les aciers inoxydables austénitiques offrent également un bon équilibre entre ténacité et ductilité, mais sont plus coûteux que les grades martensitiques et la

## *CHAPITRE I : Généralités sur le processus de soudage par résistance par points*

plupart des grades ferritiques en raison de leur teneur élevée en alliages. Étant donné qu'ils contiennent des éléments tels que le nickel qui stabilisent l'austénite jusqu'à température ambiante, ils ne sont pas durcissables par transformation. Grâce à leur structure cristalline cubique centrée sur les faces, leurs propriétés d'impact à basse température sont très bonnes, ce qui les rend applicables aux applications cryogéniques. De plus, ces aciers peuvent résister à des températures allant jusqu'à 760°C (1400°F). Malgré leur coût plus élevé, ils offrent de nombreux avantages distincts par rapport aux autres aciers inoxydables, notamment une excellente résistance à la corrosion, des performances à haute température, une bonne formabilité et une soudabilité optimale (lorsque les procédures appropriées sont respectées) [22].

Une petite quantité de ferrite résiduelle peut se former après solidification dans les aciers inoxydables AISI 316L, ce qui explique leur préférence par rapport à d'autres aciers inoxydables. Afin d'éviter la formation de micro ségrégations, ou ségrégations inter dendritiques, qui sont des composés à bas point de fusion concentrant des impuretés, la ferrite aide à dissoudre certaines impuretés, notamment le phosphore (P), le soufre (S), le sélénium (Se) et l'étain (Sn). Les contraintes thermiques et le retrait peuvent provoquer des fissurations à chaud, ces microségrégations pouvant servir de points de départ pour ces fissures. Ironiquement, la ferrite a tendance à fragiliser l'alliage lorsqu'il vieillit sous l'effet de la chaleur [23].

### **III.3 Prédiction de la microstructure de l'acier inoxydable austénitique dans le soudage par points (RSW)**

La microstructure du métal de soudure de l'acier inoxydable austénitique peut être prédite en utilisant les diagrammes de phases conventionnels tels que ceux de Schaeffler (Figure.12), WRC-1992 (Figure.13), ainsi que le diagramme pseudo-binaire (Figure.14). Ces outils permettent de prévoir les transformations métallurgiques en rapport avec la composition chimique de l'acier et du taux de refroidissement. Dans le processus de soudage RSW, le refroidissement rapide entraîne la formation de différentes morphologies de ferrite delta (telles que la ferrite delta squelettique, aciculaire, ou lathy) selon le rapport entre le chrome équivalent et le Nickel équivalent. Le diagramme pseudo-binaire tient compte des conditions de refroidissement non-équilibrées du processus de soudage par points, offrant ainsi une prédiction plus précise des phases formées dans le noyau de soudure [24].

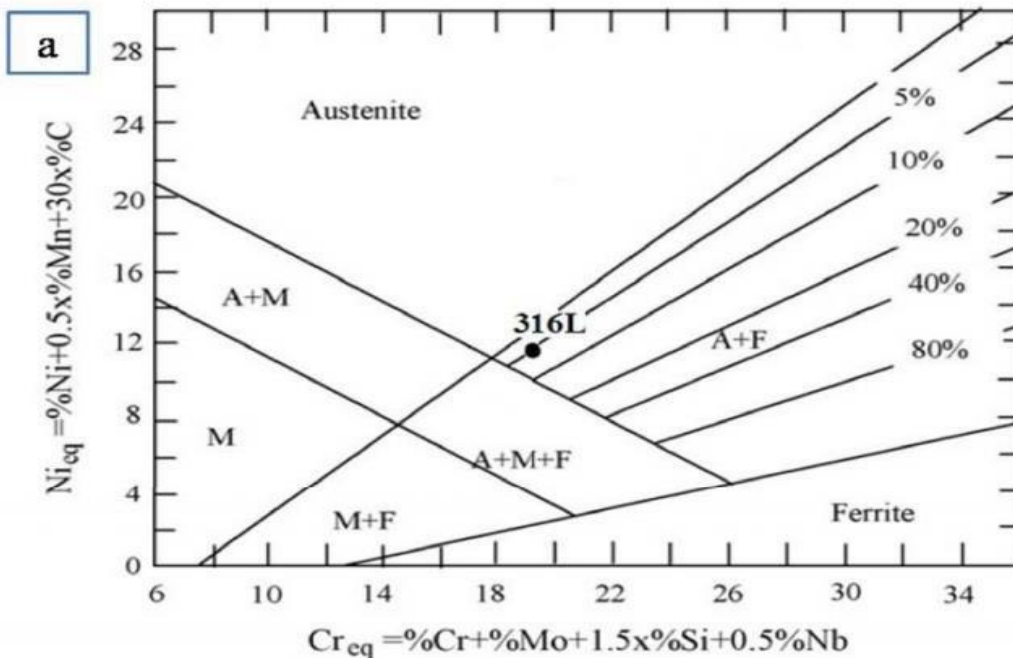


Figure. 12 Diagramme de Schaeffler [24].

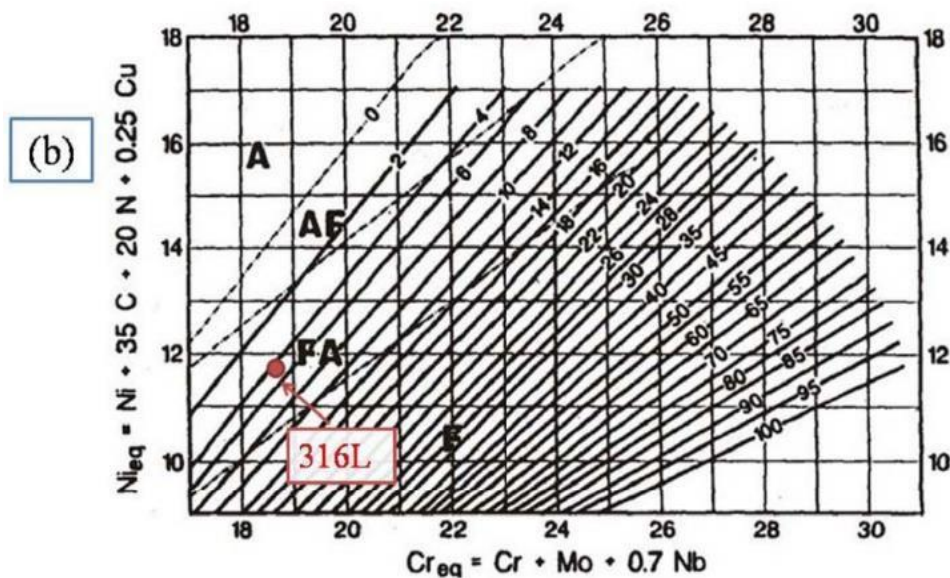


Figure. 13 Diagramme de WRC-1992 [24].

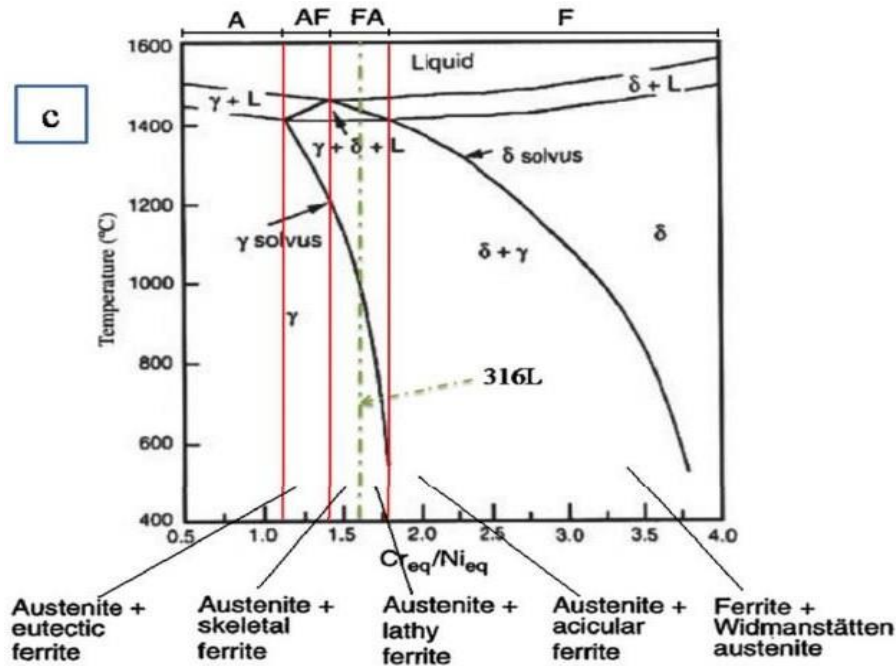


Figure. 14 Diagramme pseudo-binaire [24].

### III.4 Précipitation de carbures

La précipitation de carbures est un phénomène qui se produit dans les aciers inoxydables austénitiques recuits, tels que le 304, lorsqu'ils sont exposés à des températures comprises entre environ 800 et 1650 °F (425 à 900 °C). Cette exposition entraîne la formation de carbures de chrome (Figure.15), qui précipitent aux joints de grains, réduisant ainsi la quantité de chrome disponible pour la résistance à la corrosion.

Le taux de formation des carbures est influencé par :

- \* *Température* : Formation la plus rapide autour de 1200 °F (650 °C), diminuant aux limites de cette plage.

- \* *Teneur en carbone* : Des niveaux plus élevés de carbone augmentent la formation de carbures.

- \* *Durée à température* : Une exposition prolongée favorise plus de précipitation.

Pour minimiser la précipitation de carbures, on utilise des nuances à faible teneur en carbone (comme 304L, 316L et 317L avec un maximum de 0,03 % de carbone) dans des environnements corrosifs. Les types stabilisés, tels que le 321 (avec du titane) et le 347 (avec du columbium-

tantale), sont également efficaces car ces éléments se lient préférentiellement au carbone, empêchant ainsi la formation de carbures de chrome [20].

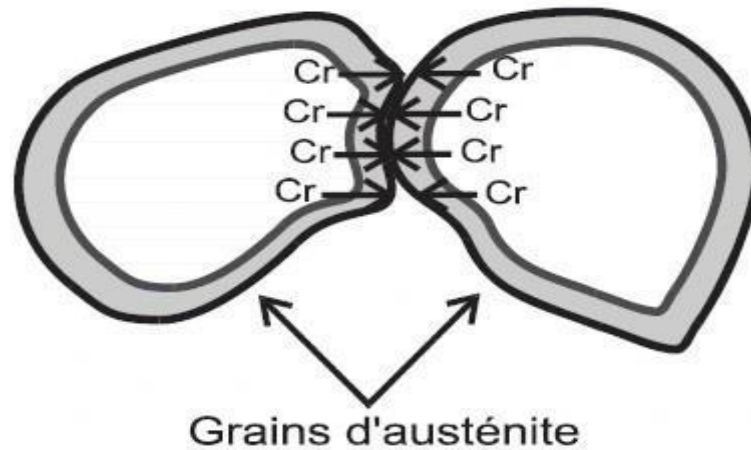


Figure. 15 Zone appauvrie en chrome due à la formation des carbures de chrome aux joints des grains et site de la corrosion intergranulaire [25].

## IV. Méthodes de contrôle du RSW

### IV.1 Contrôle destructif

Pour évaluer la résistance d'un point de soudure par résistance, plusieurs méthodes d'essais destructifs peuvent être utilisées, les plus courantes étant les tests de cisaillement par traction, de traction en U et de pelage (Figure.16). Ces tests impliquent l'utilisation d'une machine de traction pour mesurer la résistance de la liaison sous des conditions de chargement quasi-statique. Ils permettent également d'évaluer des paramètres critiques tels que le diamètre du bouton après rupture, ce qui aide à déterminer la qualité de la soudure et l'énergie absorbée avant la rupture. Chaque méthode de test est adaptée pour analyser des aspects spécifiques de la qualité de la soudure en liaison avec les mécanismes de rupture observés [26].

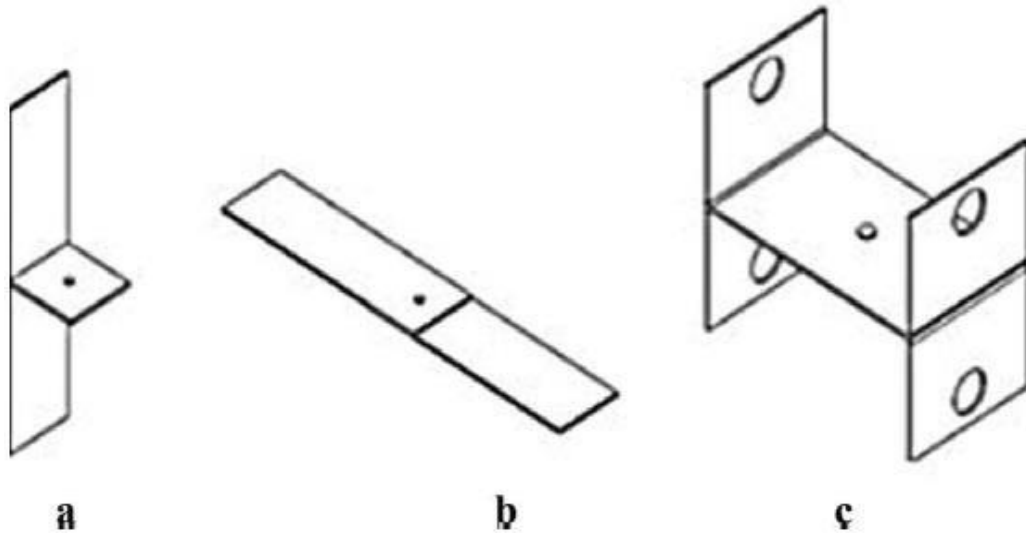


Figure. 16 Échantillons de test pour (a) un test de pelage, (b) un cisaillement par recouvrement, et (c) des conditions de chargement en traction en U [27].

## IV.2 Contrôle non destructif

Le contrôle non destructif appelé "CND" du soudage par points est essentiel pour garantir la qualité et l'intégrité des soudures sans endommager les pièces soudées. Plusieurs méthodes de CND sont utilisées pour évaluer la qualité des joints soudés par points :

### IV.2.1 Essais par Ultrasons (UT):

Cette méthode utilise des ondes ultrasonores (Figure.17) pour détecter les défauts à l'intérieur de la soudure, comme les fissures, les vides ou les inclusions. Les ultrasons peuvent également être utilisés pour mesurer la taille du noyau (zone fondue) afin de garantir les meilleures spécifications [28].

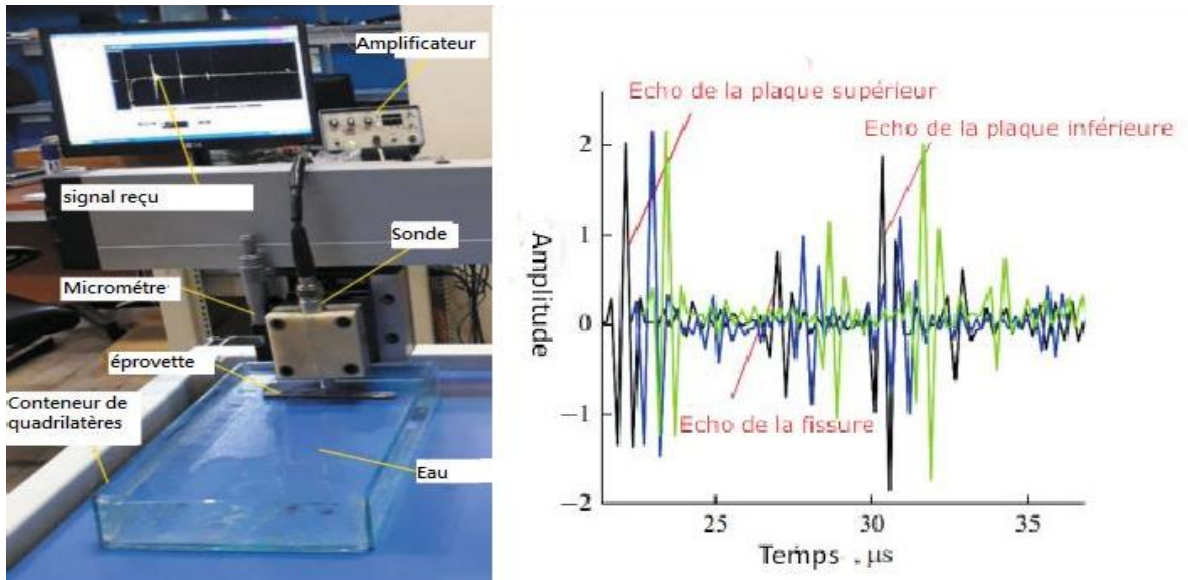


Figure. 17 Principe d'inspection d'une fissure par ultrasonique méthode [29].

## IV.2.2 Radiographie (RT)

Cette méthode utilise des rayons X ou gamma (Figure.18) pour obtenir des images des soudures. Elle permet de détecter des défauts internes tels que des porosités, des fissures ou des inclusions. Cependant, elle est moins courante pour le contrôle des soudures par points à cause de son coût et des difficultés de mesure sur de petits joints [30].

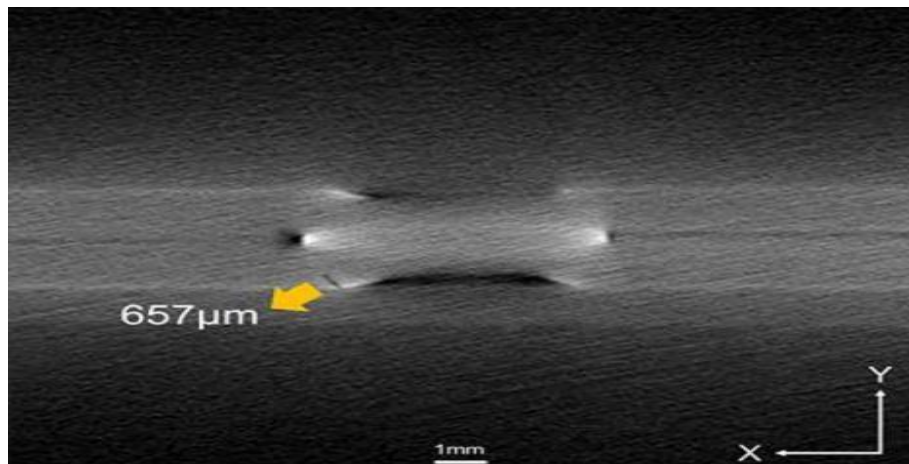


Figure. 18 Détection de la longueur des fissures par la radiographie [30].

### IV.2.3 Thermographie pulsée par courants de Foucault (ECPT)

La thermographie "ECPT" détecte les fissures dans les soudures par points en générant des perturbations thermiques visibles sur des images de phase, avec un contraste amélioré grâce à un filtre de Laplacien (Figure.19). Un modèle est développé pour prédire la profondeur des fissures, en utilisant une calibration avec des fissures de tailles connues et une analyse des données en domaine fréquentiel pour identifier la « fréquence aveugle ». La méthode estime la profondeur en établissant une relation linéaire entre la profondeur des fissures et l'inverse du carré de la fréquence aveugle. L'ECPT est efficace pour détecter et évaluer les fissures dues à la fragilisation par le métal liquide (LME), fournissant des informations qualitatives et quantitatives avec une bonne précision [31].

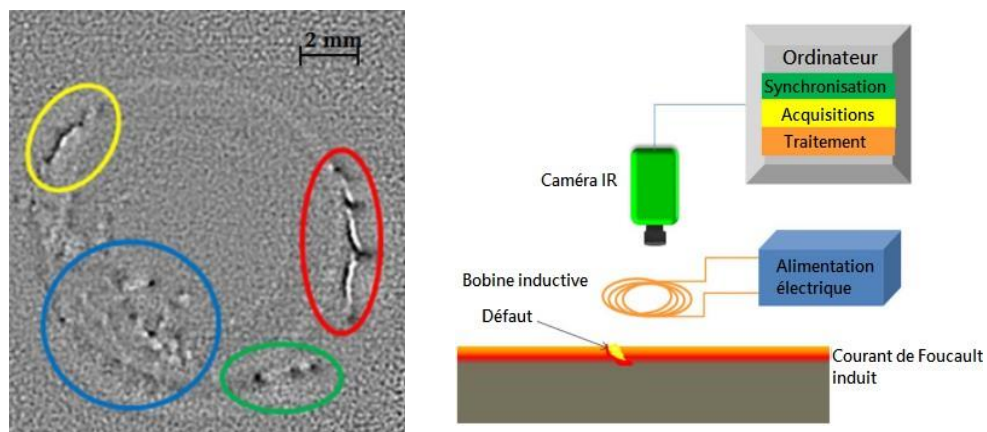


Figure. 19 Thermographie pulsée par courants de Foucault (ECPT) [32].

### IV.2.4 Thermographie Infrarouge (IR)

Cette méthode détecte les variations de température à la surface de la soudure pour identifier les défauts sous-jacents (Figure.20). Lors du soudage, les zones défectueuses montreront des profils thermiques différents, permettant ainsi d'identifier les imperfections [33].

Chaque méthode de CND a ses avantages et limites, et le choix du procédé de contrôle dépend de la nature de l'application, du type de défauts à détecter, et des exigences de production.

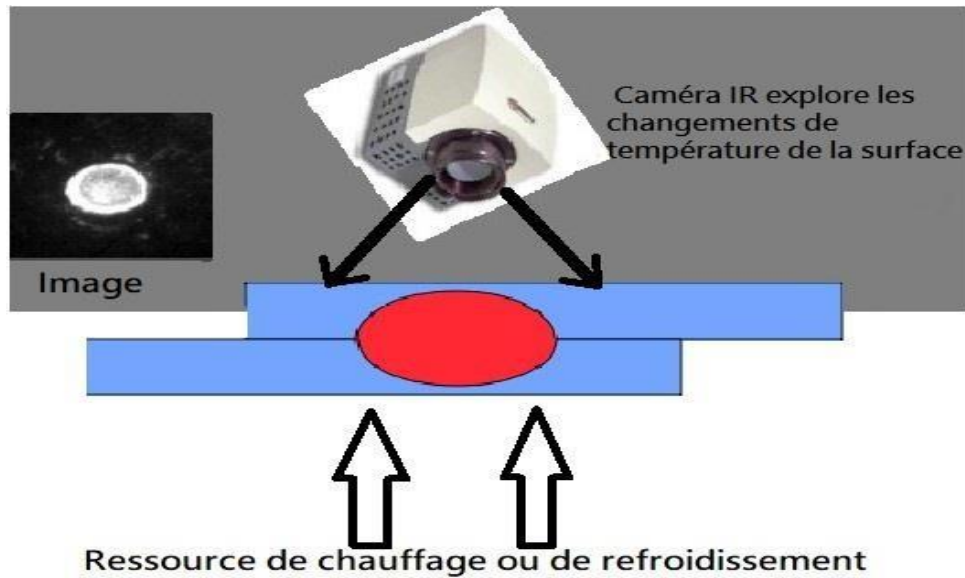


Figure. 20 Principe de l'inspection de la qualité des soudures par caméra IR [34].

### Conclusion

Le soudage par résistance par points (RSW) est un procédé crucial dans la fabrication moderne, offrant efficacité et fiabilité dans l'assemblage de composants métalliques. Ce chapitre a exploré les principes fondamentaux du RSW, y compris son fonctionnement, les équipements nécessaires, les paramètres de soudage, et les matériaux appropriés. Les aciers inoxydables, en particulier les alliages austénitiques, ont été identifiés comme des matériaux de choix en raison de leur résistance à la corrosion et de leur excellente soudabilité.

De plus, les méthodes de contrôle de la qualité, tant destructives que non destructives, sont essentielles pour garantir l'intégrité des soudures. Les techniques telles que les essais par ultrasons, la radiographie et la thermographie permettent de détecter les défauts internes et d'assurer la performance des soudures. En conclusion, le soudage par points est un domaine en constante évolution, intégrant des innovations technologiques pour améliorer la qualité et l'efficacité des assemblages métalliques dans diverses industries.

### RÉFÉRENCES

- [1] Weman, K., & Liber AB. (2012). "Welding processes handbook" (2nd ed.). Woodhead.
- [2] RWMA. (2003). "Resistance welding manual" (rev. 4th ed.). Philadelphia, PA.

## *CHAPITRE I : Généralités sur le processus de soudage par résistance par points*

- [3] Srikunwong, C. (2005). “Modélisation du procédé de soudage par points”. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [4] Geslain, E. (2018). “Soudage par résistance des tôles fines revêtues : formation du noyau dans un assemblage de trois tôles”. Université de Bretagne Sud.
- [5] ROCDACIER. (2017). “Le soudage par point”. Retrieved from Le soudage par point – Rocd@cier (rocdacier.com).
- [6] Klopčič, B., Dolinar, D., & Stumberger, G. (2008). “Advanced control of a resistance spot welding system”. IEEE Transactions on Power Electronics, 23, 144-152. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.911851>.
- [7] Williams, N. T., & Parker, J. D. (2004). “Review of resistance spot welding of steel sheets: Part 2 Factors influencing electrode life”. International Materials Reviews, 49(2), 77–108. <https://doi.org/10.1179/095066004225010541>.
- [8] Spitz, M. (2014). “Resistance spot welding process parameters and their influence on weld quality of galvanized steel sheets”. Vienna Universität de Technologie.
- [9] Nasir, Z., & Khan, M. I. (2016). ”Resistance spot welding and optimization techniques used to optimize its process parameters ”. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 3, 887-893.
- [10] Raut, M., & Achwal, V. (2014). ”Optimization of spot welding process parameters for maximum tensile strength”. ISSN 2278 – 0149 , 3(4).
- [11] Soomro, I. A., Pedapati, S. R., & Awang, M. (2022). “A review of advances in resistance spot welding of automotive sheet steels: emerging methods to improve joint mechanical performance”. Int J Adv Manuf Technol, 118, 1335–1366.
- [12] Wang, Y., Rao, Z., & Wang, F. (2020). “Heat evolution and nugget formation of resistance spot welding under multi-pulsed current waveforms”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 111, 3583–3595. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06337-z>.
- [13] Chaturvedi, S. M., & Vendan, A. (2021). “Advanced Welding Techniques Holistic View with Design Perspectives”. Springer Nature Pte Ltd.
- [14] Haldar, A., Suwas, S., & Bhattacharjee, D. (Eds.). (2009). “Microstructure and texture in steels and other materials”. Springer Science & Business Media.
- [15] Nickel Institute. (2020). “Stainless steel fasteners – a systematic approach to their selection: a designers’ handbook series n° 9003”.

## *CHAPITRE I : Généralités sur le processus de soudage par résistance par points*

- [16] Amy, Z., & Azem, S. (2013). “Caractérisation de l’acier inoxydable x5crni18-10 et étude de son oxydation à température”. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté du Génie de la Construction, Département de Génie Mécanique, Mémoire de Magister.
- [17] Outokumpu Oyj. (2013). Handbook of Stainless Steel.
- [18] ASM International. (2000). “Alloy Digest Sourcebook: Stainless Steels”. Materials Park, Ohio, USA.
- [19] Blondeau, R. (2008). “Metallurgy and Mechanics of Welding Processes and Industrial Applications”. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- [20] American Iron and Steel Institute. (1988). “Welding of stainless steels and other joining methods: a designers’ handbook series n° 9002”.
- [21] Kimchi, M., & Phillips, D. H. (2023). “Resistance Spot Welding Fundamentals and Applications for the Automotive Industry” (2nd ed.)”. Welding Engineering Program, The Ohio State University. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-25783-4>.
- [22] Phillips, D. H. (2016). “Welding Engineering: An Introduction” (1st ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- [23] Chassignole, B. (2000). “Influence de la structure métallurgique des soudures en acier inoxydable austénitique sur le contrôle non destructif par ultrasons”. École Doctorale Matériaux de Lyon.
- [24] Kianersi, D., Mostafaei, A., & Amadeh, A. A. (2014). “Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations”. *Materials & Design*, 61, 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.075>.
- [25] Expertise Métallurgique. (n.d.). “Les aciers inoxydables et leur soudabilité”. Retrieved from [wordpress.com](http://wordpress.com).
- [26] Summerville, C., Compston, P., & Doolan, M. (2019). “A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques”. *Procedia Manufacturing*, 29, 305–312.
- [27] Arumugam, A., & Pramanik, A. (2020). “A study of spot weld pull-out failure (PF) mechanism under different loading conditions for stainless steel and mild steel joints”. ISSN: 1448-4846 (Print) 2204-2253.

## *CHAPITRE I : Généralités sur le processus de soudage par résistance par points*

- [28] Mirmahdi, E., Afshari, D., & Karimi Ivanaki, M. (2023). “A review of ultrasonic testing applications in spot welding: Defect evaluation in experimental and simulation results”. *Trans Indian Inst Met*, 76, 1381–1392. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02738-8>.
- [29] Mirmahdi, E. (2020). “Numerical and experimental modeling of spot welding defects by ultrasonic testing on similar sheets and dissimilar sheets”. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 56(8), 620–634.
- [30] Han, S. C., Park, H. M., Uhm, S. H., et al. (2021). “Evaluation of liquid metal embrittlement crack in resistance spot welds under intensive welding condition using industrial X-ray computed tomography and machine learning”. *Weld World*, 65, 1887–1897. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01109-z>.
- [31] Dahmene, F., Yaacoubi, S., Mountassir, M. E., et al. (2022). “On the nondestructive testing and monitoring of cracks in resistance spot welds: recent gained experience”. *Weld World*, 66, 629–641. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01249-w>.
- [32] Taram, A., et al. (2018). “Nondestructive testing of resistance spot welds using eddy current thermography”. *Applied Optics*, 57(18), 20. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000D63>.
- [33] Forejtová, L., Zavadil, T., Kolařík, L., Kolaříková, M., Sovad, J., & Vávrád, P. (2019). “Non-destructive inspection by infrared thermography of resistance spot welds used in automotive industry”. *Acta Polytechnica*, 59(3), 238–247. <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0238>.
- [34] Woo, W., Chin, C. W., Feng, Z., Wang, H., Zhang, W., Xu, H., & Sklad, P. S. (2009). “Application of infrared imaging for quality inspection in resistance spot welds”. *Proc. SPIE*, 7299. <https://doi.org/10.1117/12.818368>.

# CHAPITRE II :

## *Généralités sur mécanique de la rupture*

### I. Mécanique de la rupture

#### I.1 Historique de la mécanique de la rupture

La mécanique de la rupture a émergé au début du 20<sup>e</sup> siècle avec les travaux pionniers de Griffith, qui a introduit le concept de rupture fragile basée sur l'énergie, en postulant que la propagation des fissures se produit lorsque l'énergie libérée dépasse l'énergie de création de nouvelles surfaces [1]. Dans les années 1950, Irwin [2] a étendu cette théorie aux matériaux ductiles en introduisant le concept du FIC, qui caractérise l'état de contraintes autour de l'extrémité de la fissure, et le concept de ténacité à la rupture pour évaluer la capacité de résistance à la fissuration. Ces concepts ont conduit au développement de la mécanique de la rupture (LEFM), une approche fondamentale pour l'analyse des fissures dans les matériaux élastiques. Les avancées ultérieures, notamment le travail de Rice [3], ont permis de traiter les matériaux ductiles en introduisant le J-Intégral pour évaluer la rupture dans des conditions non linéaires. Au fil des décennies, la mécanique de la rupture a évolué pour inclure des concepts modernes tels que la tolérance aux dommages et l'analyse de la fatigue afin d'assurer la sécurité et la longévité des structures dans diverses applications industrielles [4].

#### I.2 Mode de rupture

Les chercheurs en mécanique des matériaux ont identifié différents modes de propagation des fissures.

\* *Le Mode I* : Ouverture (tension normale) correspond à une séparation des faces de la fissure perpendiculairement au plan de celle-ci. Ce mode est considéré comme le plus critique car il entraîne la concentration de contraintes la plus élevée au niveau du front de fissure, augmentant ainsi le risque de propagation rapide de la fissure.

\* *Le Mode II* : appelé cisaillement plan, se caractérise par un glissement relatif des faces de la fissure parallèlement à son plan, entraînant un cisaillement horizontal. Ce mode est moins courant que le Mode I, mais il peut être critique dans certaines applications, notamment celles impliquant des charges de cisaillement élevées.

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

\* *Le Mode III* : appelé cisaillement anti-plan, implique un mouvement relatif des surfaces de la fissure en direction perpendiculaire au plan de la fissure, créant un cisaillement transversal.

Ces modes de rupture peuvent parfois se combiner dans des situations réelles, formant des états de rupture mixtes selon les conditions de chargement et la géométrie de la fissure [5].

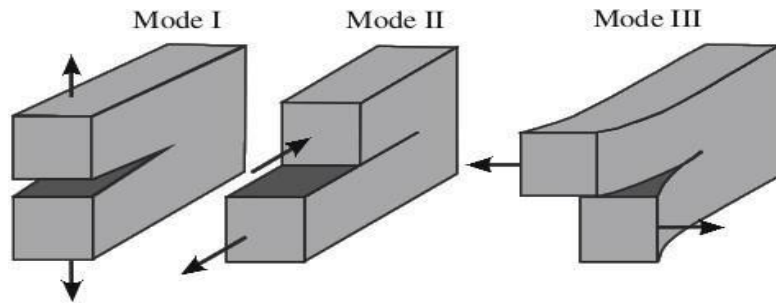


Figure. 1 Définition des trois modes d'ouverture des fissures [5].

### I.3 Facteur d'intensité de contrainte

Le FIC "K" décrit l'intensité des contraintes proches de l'extrémité d'une fissure. Si l'on suppose que la rupture se produise localement lorsque les contraintes et les déformations atteignent une certaine combinaison critique, il en découle que la rupture se produit lorsque "K" devient important et est proche de la ténacité du matériau " $K_{IC}$ ".

Pour une plaque illustrée dans la Figure. 2, soumise à une contrainte " $\sigma$ ", le FIC est donné par :

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

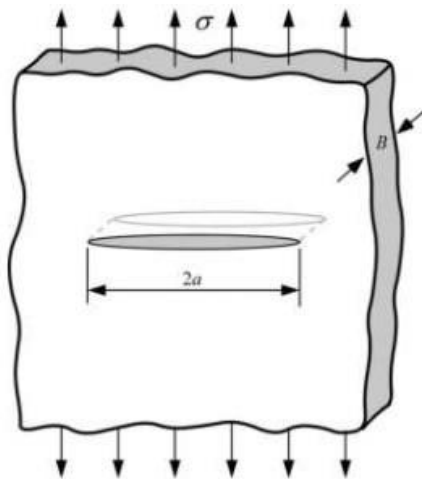


Figure. 2 Fissure transversale dans une plaque avec largeur  $\gg 2a$  [6].

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

Il y aura rupture lorsque  $K$  atteint la ténacité du matériau, c'est-à-dire :

$$K = K_{IC} \quad (2)$$

Dans ce cas,  $K$  représente la force motrice pour la rupture fracture, tandis que  $K_{IC}$  mesure la résistance des matériaux à la rupture [6].

## II. Mécanique de la Rupture dans le Soudage par Points Résistants (RSW)

### II.1 Introduction

Le soudage par points résistants (RSW) est une technique couramment utilisée pour assembler des tôles métalliques, surtout dans les industries automobile et aéronautique. Bien que cette méthode soit largement employée, les joints soudés par points peuvent présenter des fissures et des défauts qui compromettent leur intégrité. La mécanique de la rupture est essentielle pour évaluer la performance et la fiabilité de ces joints [7].

### II.2 Fissures de soudage par point et mécanismes de rupture

Les fissures de soudure sont des défauts qui peuvent s'initier à partir de petites imperfections et croître jusqu'à une rupture finale. Les soudures par points peuvent échouer de deux manières distinctes : l'échec par extraction du noyau de soudure (déboutonnage) et l'échec interfaciale. Le mécanisme de rupture décrit les modes de rupture. Les facteurs critiques pour la rupture incluent la caractérisation métallurgique du matériau, comme le rapport de dureté du noyau de soudure par rapport à celui du lieu de rupture, ainsi que l'épaisseur de la tôle.

Les fissures ont tendance à se former autour de la zone affectée par la chaleur (ZAT), avec une distribution typique des contraintes montrant des contraintes maximales à l'interface entre les deux feuilles. Les fissures commencent souvent au bord du noyau de soudure et peuvent se propager par le biais de l'épaisseur de la tôle (Figure. 3), influencées par l'orientation des fissures et la présence de porosité ou de fissures de solidification.

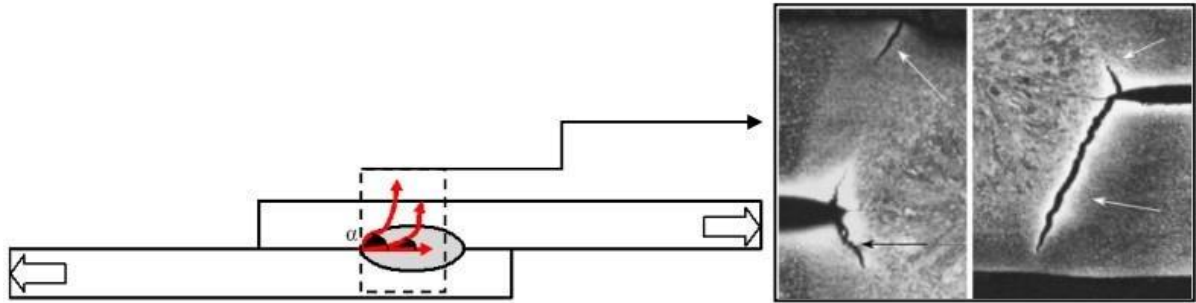


Figure. 3 Les chemins de propagation des fissures [8].

Les modèles prédictifs pour la propagation des fissures et la durée de vie en fatigue des soudures par points prennent en compte des facteurs tels que les contraintes résiduelles, le noyau du point de soudure. Les chemins de fissures de fatigue dans les soudures par points ont été étudiés à l'aide de diverses techniques, y compris les solutions des facteurs d'intensité des contraintes (FIC), et les prédictions de la durée de vie en fatigue appliquant la loi de Paris [8].

### III. Contexte du calcul analytique de facteur d'intensité de contraintes critiques

Dans leur article révolutionnaire de 1985 sur la mécanique de la rupture, Tada, Paris et Irwin [9] ont donné un aperçu clé de la manière de calculer les paramètres d'intensité des contraintes lorsqu'il y a une fissure entre deux tôles qui sont soumises à des charges de bord. Plus tard, Pook [10] a prouvé la solution, qui consiste à multiplier la contrainte structurelle au point de la fissure par une racine carrée de l'épaisseur de la tôle. Pook a montré aussi que la théorie simple des plaques pouvait être utilisée pour calculer directement les contraintes à la pointe de la fissure. En utilisant l'idée de contrainte structurelle, cette étude a introduit une approche innovante pour évaluer le FIC pour les soudures par points. Le concept de contrainte structurelle a été développé par plusieurs chercheurs à savoir Radaj [11], Zhang [12, 13,14], Lin, Pan, Wung, et al. [15, 16, 17, 18, 19,20] qui se sont tous appuyés sur ces fondements. Ils ont apporté des contributions significatives à un certain nombre de formulations qui utilisent la contrainte structurelle comme paramètre d'entrée pour déterminer les paramètres d'intensité de la contrainte dans les soudures par points. Leur objectif principal était d'étudier la résistance à la fatigue des soudures par points.

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

L'approche proposée par Zhang [12, 13,14] est adopté dans notre travail pour calculer les FIC dans différentes conditions de chargement pour deux types de joints distincts.

### III.1 Joints par recouvrement

Les variables les plus importantes induisant des contraintes au niveau du sommet orienté vers l'avant et parallèle à la direction de chargement (au point A dans la Figure.4),  $K_I$  et  $K_{II}$  se produisent simultanément et peuvent être déterminées via les équations [12, 13,14] :

$$K_I = \frac{F\sqrt{3}}{2\pi D\sqrt{t}} \quad (3)$$

$$K_{II} = \frac{2F}{\pi D\sqrt{t}} \quad (4)$$

L'équation ci-dessus peut être utilisée pour déterminer le  $K_{III}$  le plus élevé au sommet de l'arête du nugget (au point B de la Figure.4) pour les soudures par points en traction-cisaillement :

$$K_{III} = \frac{F\sqrt{2}}{\pi D\sqrt{t}} \quad (5)$$

En fait, le facteur d'intensité de contrainte  $K_{eq}$  est exprimé par :

$$K_{eq} = \frac{F\sqrt{19}}{2\pi D\sqrt{t}} \quad (6)$$

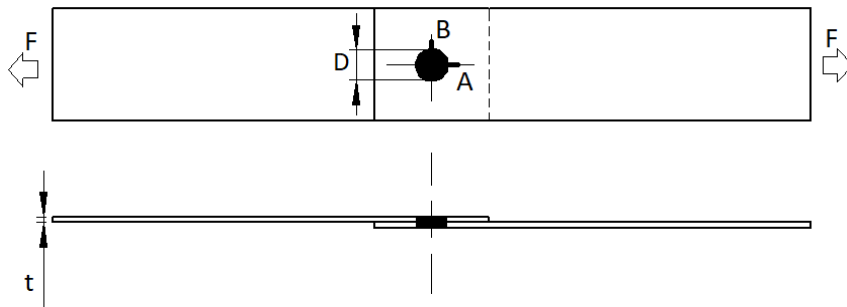


Figure. 4 Joint par recouvrement sous la force de charge maximale F [12].

### III.2 Peel joints

Sur la base des critères de symétrie, les FIC les plus élevés pour le soudage par points en carrosse coïncident (au point A représenté sur la Figure.5) et sont déterminés à l'aide de l'expression suivante [12, 13,14] :

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

$$K_I = \frac{2\sqrt{3} e P}{\pi D \sqrt{t}} \quad (K_{II} = 0, K_{III} = 0) \quad (7)$$

Le FIC équivalent du joint de pelage de carrosserie est en fait exprimé par :

$$K_{eq} = \frac{2\sqrt{3} e P}{\pi D \sqrt{t}} \quad (8)$$

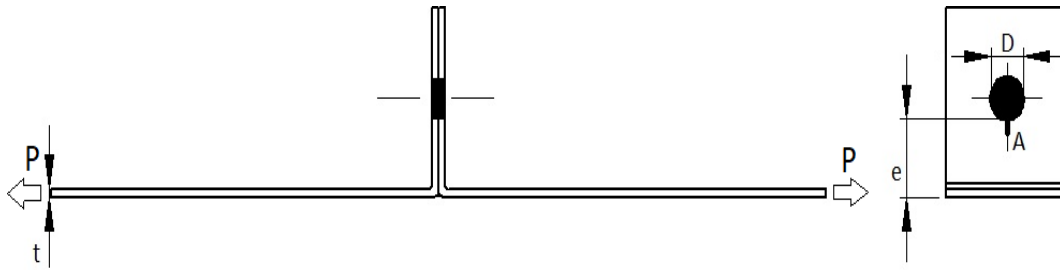


Figure. 5 Les peels joints sous la force de charge P [12].

### IV. Modes de ruptures des soudures par points

Les modes de ruptures des soudures par points (RSW) se classifient en trois types principaux : la défaillance par extraction (PF), la défaillance interfaciale (IF) et la défaillance interfaciale partielle (PIF). Ces modes sont illustrés dans la Figure.6, qui montre les chemins typiques des fissures pour chaque type de rupture.

#### IV.1 Déboutonnage

Se divise en deux sous-catégories : Le déboutonnage du noyau et la rupture par extraction de la tôle. Dans le cas de Le déboutonnage du noyau, les fissures commencent à l'intérieur de la zone affectée par la chaleur (ZAT) de la tôle métallique et se propagent dans la direction de l'épaisseur, comme l'indiquent la flèche verte dans la Figure.6. En revanche, dans la rupture par extraction de la tôle, la fissure débute dans le métal de base et se propage à travers l'épaisseur de la tôle, entraînant finalement l'extraction complète de la soudure de la tôle métallique, comme le montre la flèche blanche dans la Figure.6 [21].

### IV.2 Défaillance interfaciale partielle

Survient lorsque les fissures se forment à partir du bout de la liaison de fond entaille et se propagent le long de l'interface du noyau avant de changer de direction et de se propager à travers l'épaisseur de la tôle. Ce mode, mis en évidence par la ligne bleu dans la Figure.6 , implique un retrait partiel de matière à l'intérieur du noyau [21].

### IV.3 Défaillance interfaciale

Se caractérise par des fissures qui prennent naissance au bout de la liaison de fond entaille et se propagent le long de l'interface du noyau, séparant finalement les feuilles soudées en deux pièces distinctes. Ce type de rupture est illustré par la ligne jaune dans la Figure.6 [21].

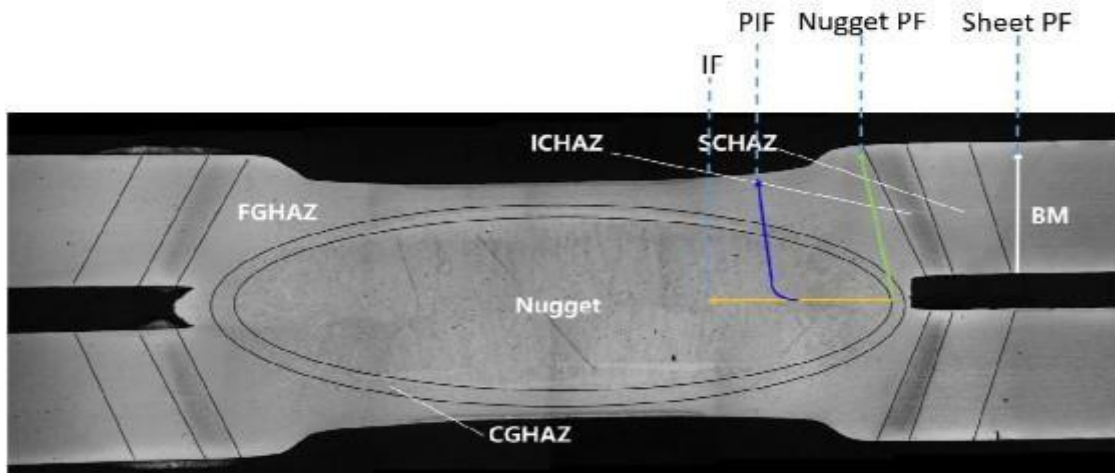


Figure. 6 Schéma des différents modes de rupture dans les RSW [21].

## V. Etat de l'art

L'importance des assemblages soudés par résistance par points dans divers industries a ouvert le champ sur l'analyse du comportement mécanique, la capacité de résistance et la qualité des joints sous l'influence des paramètres de soudage. De plus les recherches se sont orientées vers l'étude des mécanismes de rupture et la détermination des paramètres caractérisant la rupture et principalement le facteur d'intensité de contrainte (FIC).

### V.1 Effets des paramètres de soudage

Jagadeesha et Sarvoththama Jothi [22], ont examiné le soudage par points (RSW) de tôles en acier inoxydable AISI 316L de 2,0 mm d'épaisseur à l'aide d'essais expérimentaux et de simulations

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

par éléments finis (EF). Les effets du courant de soudage, du temps de soudage et du diamètre de l'électrode sur la qualité de la soudure ont été analysés, avec une charge maximale de cisaillement de 13,7 kN obtenue dans des conditions spécifiques (9 kA, 9 cycles, électrode de 7 mm).

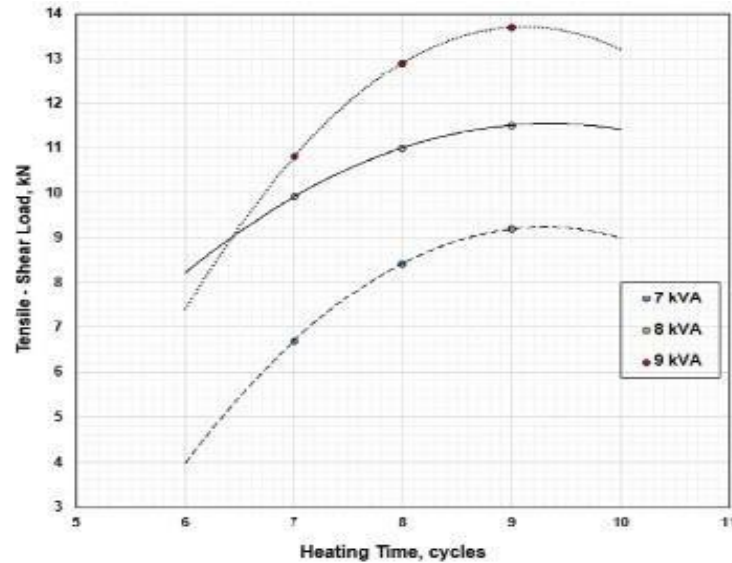


Figure. 7 Effet du courant de soudage et du temps de soudage sur la charge de traction-cisaillement des soudures par points [22].

Un courant plus élevé et un temps de soudage prolongé ont augmenté la taille du noyau de soudure, mais avec un risque de surchauffe et d'expulsion du métal fondu (Figure.8).

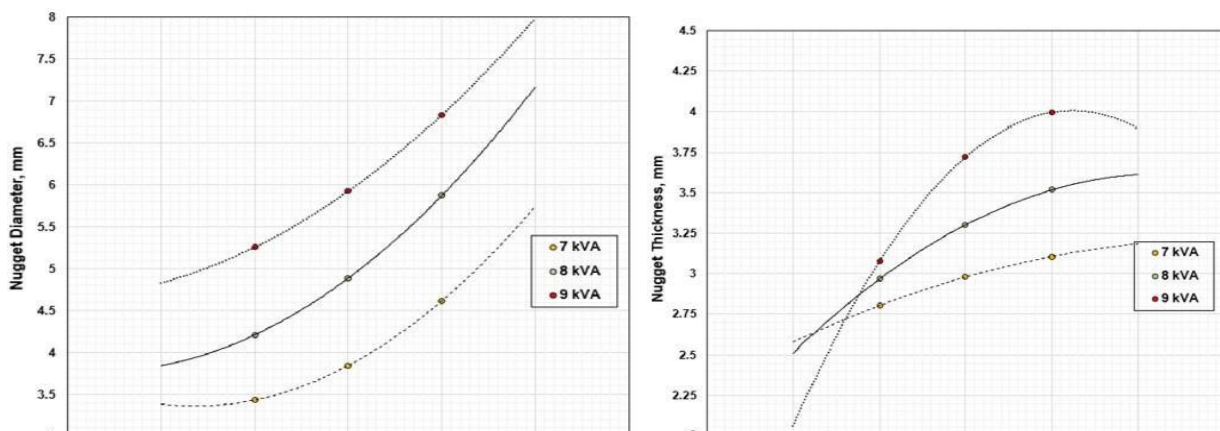


Figure. 8 a) Effet de temps de soudage sur le diamètre de noyau b) effet du temps de soudage sur l'épaisseur de noyau [22].

Singh et al. [23] ont optimisé les paramètres du soudage par points à savoir le courant électrique, force de l'électrode et cycle de soudage pour des tôles en acier inoxydable austénitique (AISI 316L)

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

de 1 mm d'épaisseur, en appliquant l'ANOVA pour analyser la dureté et la résistance à la traction. Les paramètres optimaux pour des performances maximales sont une force d'électrode de 3 kg/cm<sup>2</sup>, un courant électrique de 11 kA et un cycle de soudage de 10 cycles.

Les résultats de Figure.9 et .10 montrent qu'une augmentation du courant de soudage améliore la résistance au cisaillement, tandis que la dureté du noyau augmente avec une force d'électrode plus élevée.

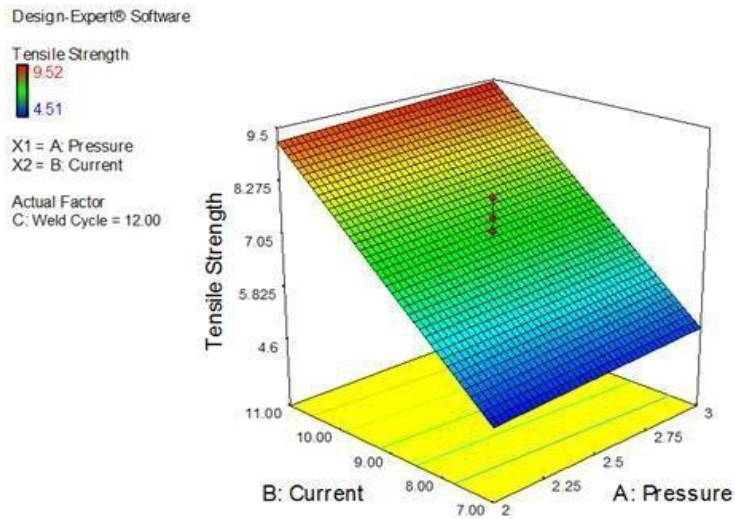


Figure. 9 Effet du courant de soudage et de la force de l'électrode sur la charge en cisaillement [23].

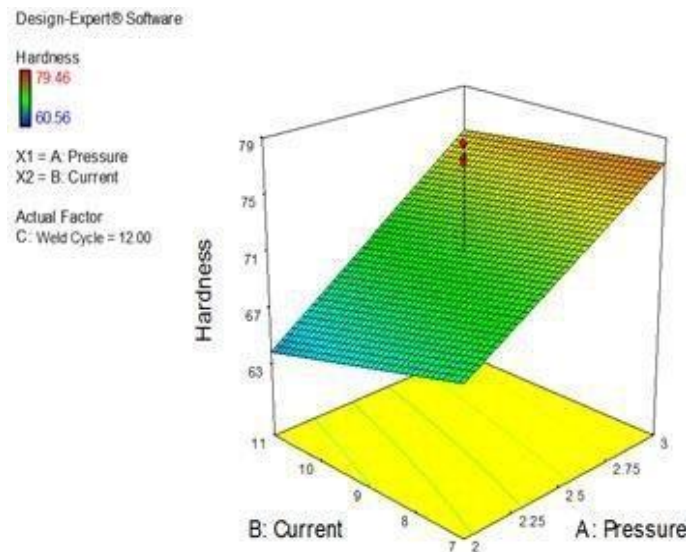


Figure. 10 Effet du courant de soudage et de la force de l'électrode sur la dureté [23].

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

L'étude conclut que le courant de soudage est le facteur le plus significatif pour la résistance à la traction dans AISI 316L et suggère d'explorer davantage les techniques de superposition pour améliorer les propriétés d'usure et de dureté.

Une autre étude menée par Jagadeesha [24] sur des joints soudés par points a été orienté vers l'effet du temps de chauffage et du courant de soudage sur la qualité des soudures, en particulier la résistance au cisaillement et le diamètre du noyau de soudure. Les résultats (Figure.11) montrent que l'augmentation du temps de soudage à 9 cycles et du courant de soudage à 9 kA améliore le diamètre du noyau de soudure (environ 7,55 mm) et la résistance au cisaillement (13,4 kN) et entraînant un mode de rupture par déchirure. À l'inverse, des paramètres plus bas conduisent à une résistance au cisaillement réduite (diamètre de noyau de 6,98 mm) et à un mode de rupture par cisaillement. Le diamètre critique du noyau de soudure est identifié comme étant de 7,37 mm, avec des ruptures par déchirure pour les diamètres plus grands et par cisaillement pour les plus petits.

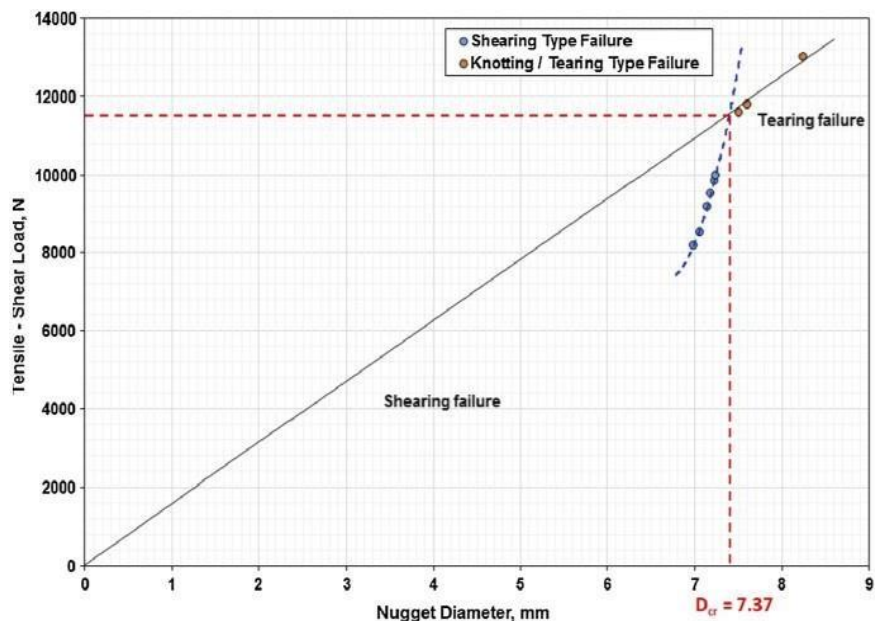


Figure. 11 Charge maximale de traction et de cisaillement en fonction du diamètre du noyau de la soudure pour les modes de rupture par arrachement et par cisaillement [24].

Kianersi et al. [25], ont étudié l'optimisation des paramètres de soudage par points, en particulier le courant de soudage et le temps de soudage des tôles en acier inoxydable austénitique AISI 316L. L'étude a montré qu'une augmentation du courant de soudage améliore la capacité de charge en

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

cisaillement, atteignant un maximum à 8 kA (8070 N) avant de diminuer à des courants plus élevés (Figure. 12).



Figure. 12 Effet de courant de soudage sur la charge maximale en cisaillement de l'acier 316L [25].

Divers modes de défaillance ont été observés, les meilleures soudures présentant des défaillances de type "Déboutonnage". L'analyse microstructurale dans la Figure.13 a identifié différentes morphologies de delta ferrite dans les noyaux de soudure.

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

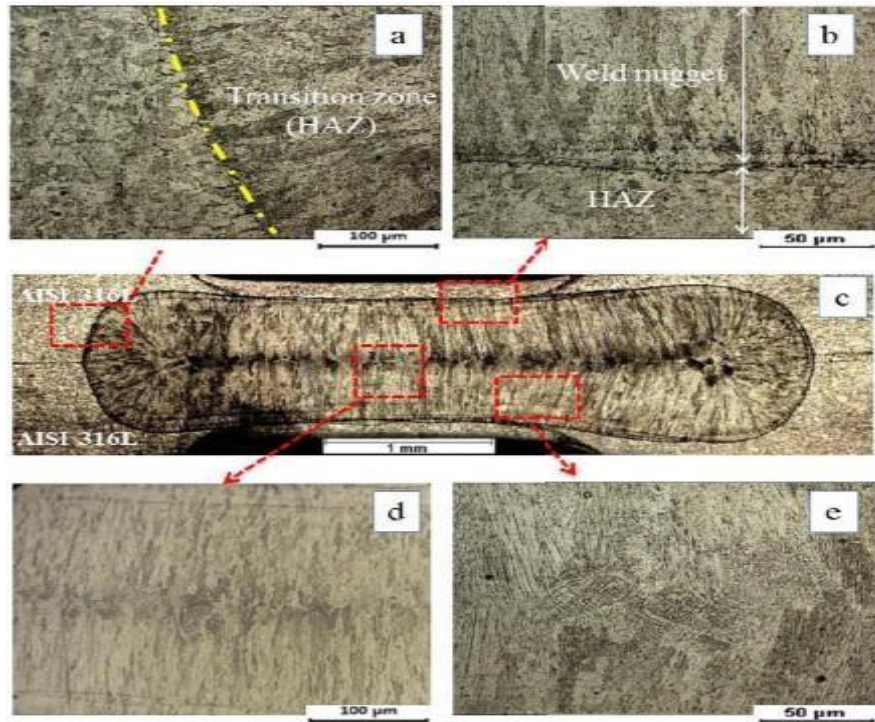


Figure. 13 Microstructure du noyau de soudage pour AISI 316 L [25].

Dans l'ensemble, la recherche met en évidence l'impact significatif des paramètres de soudage sur les propriétés mécaniques et la microstructure des joints RSW en acier inoxydable AISI 316L.

Haetham et al. [26] ont étudié les propriétés mécaniques et microstructurales, telles que la taille du noyau, la charge en cisaillement, la micro-dureté et la microstructure des joints soudés pour une tôle de 3 mm épaisseur de AISI 316 L pour des valeurs des paramètres de soudage fixées. Les résultats montrent une charge maximale en cisaillement de 21,549 kN (Figure. 14) et une microdureté de la zone de fusion (ZF) de 230 HV, supérieure à celle du métal de base (198,8 HV) et de la zone affectée par la chaleur 184 HV (Figure. 15).

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

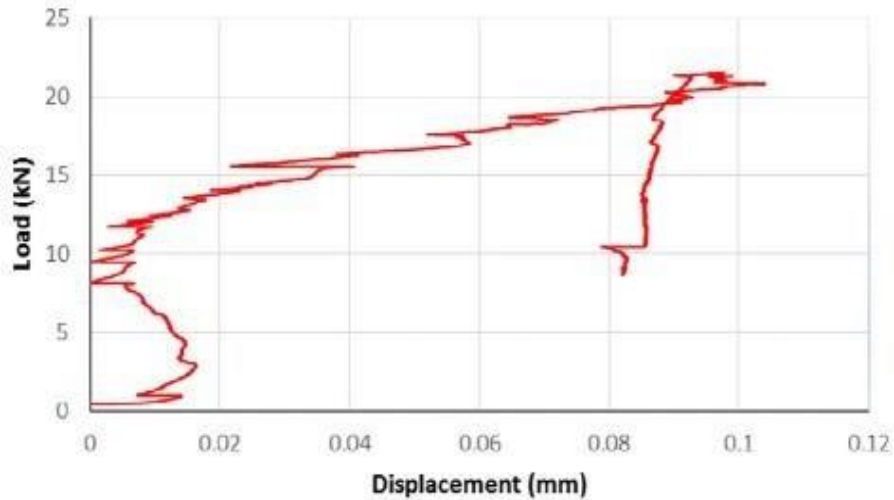


Figure. 14 Courbe charge-déplacement [26].

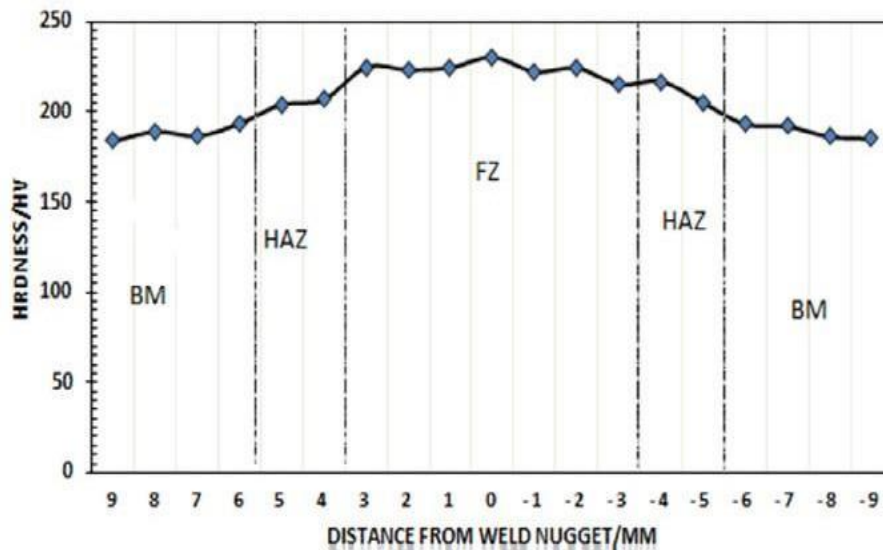


Figure. 15 Distribution de la microdureté des zones soudées [26].

Des transformations de phase ont été observées dans la FZ, avec des grains colonnaires et une phase martensitique, contribuant à l'augmentation de la dureté. Des cavités dues à la ségrégation de Cr, Ni et Mo ont été notées dans la zone affectée par la chaleur (ZAT), tandis qu'un vide au centre de la zone fondu a entraîné des ruptures interfaciales (Figure.16). Ces caractéristiques peuvent être optimisées par des ajustements des paramètres de soudage pour améliorer la qualité et la résistance des joints.

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

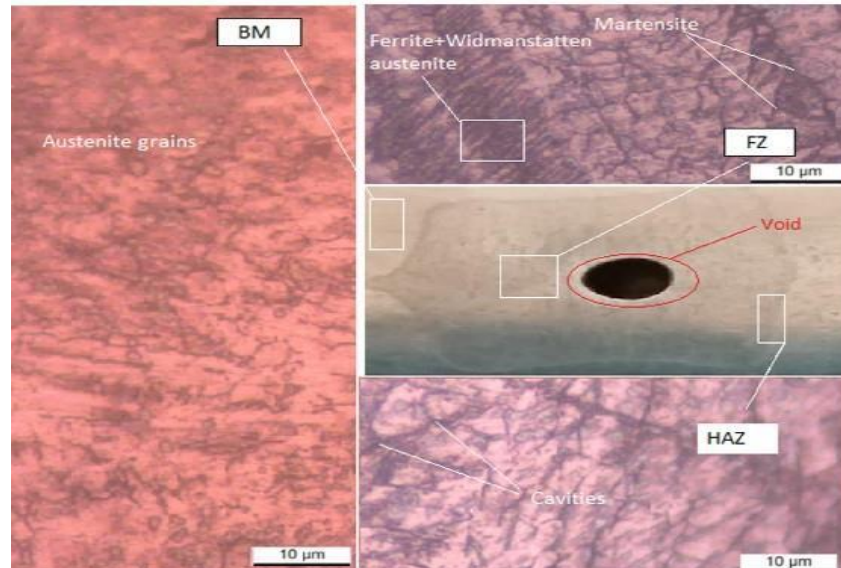


Figure. 16 Microstructure de la section soudée de l'acier inoxydable austénitique 316L [26].

### V.2 Analyse de la rupture des joints soudés par RSW

Zhang [12] a analysé la rupture des joints soudés par RSW et a développé des formules simples pour prédire les facteurs d'intensité de contrainte autour des points de soudure sous différentes charges et différentes géométries de joints. Ces formules tiennent compte du diamètre du noyau, de l'épaisseur de la tôle, de l'espacement de la charge et de l'excentricité de la charge. Ses formules ont été validées par une analyse par éléments finis et fournissent des prédictions précises. Elles peuvent être utilisées pour convertir les données d'essai de fatigue et faciliter l'optimisation de la conception (Figure.17). Cependant, les formules sont les plus précises dans des conditions géométriques spécifiques et peuvent ne pas être aussi précises pour les soudures de différentes épaisseurs ou de matériaux.

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

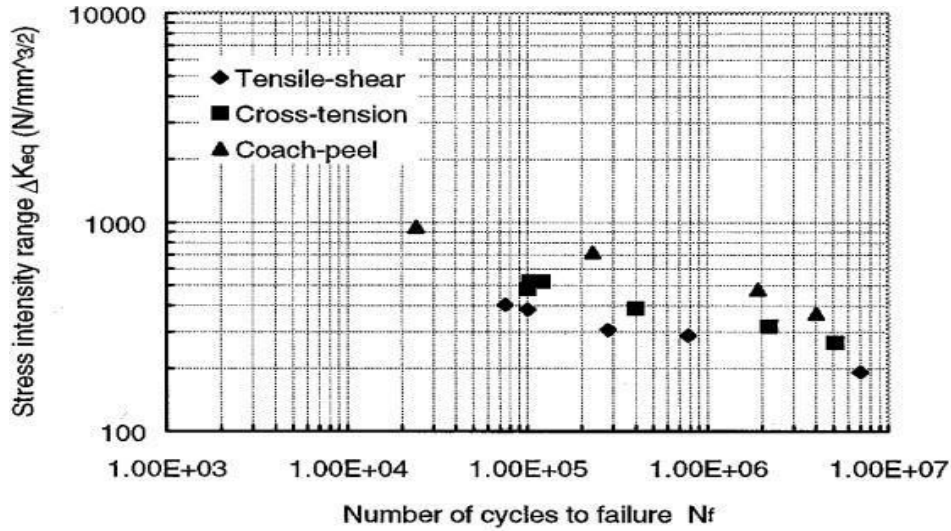


Figure. 17 Facteurs d'intensité de contrainte équivalente en fonction du nombre de cycles jusqu'à la rupture pour les joints par recouvrement, traction transversale et les peels joints [12].

Les recherches conduites par Sevim [27] ont montré le développement d'une nouvelle méthode permettant de calculer les facteurs d'intensité de traînée dans les points de soudure en fonction de la dureté du noyau. Sevim a comparé les résultats obtenus avec les méthodes existantes (Approche de Zhang) et a proposé des formules pour l'évaluation de la ténacité. L'étude a montré que la dureté affecte significativement la formation de fissures et la ténacité (Figure.18). Les méthodes proposées constituent des outils précieux pour évaluer le comportement en rupture des points de soudure.

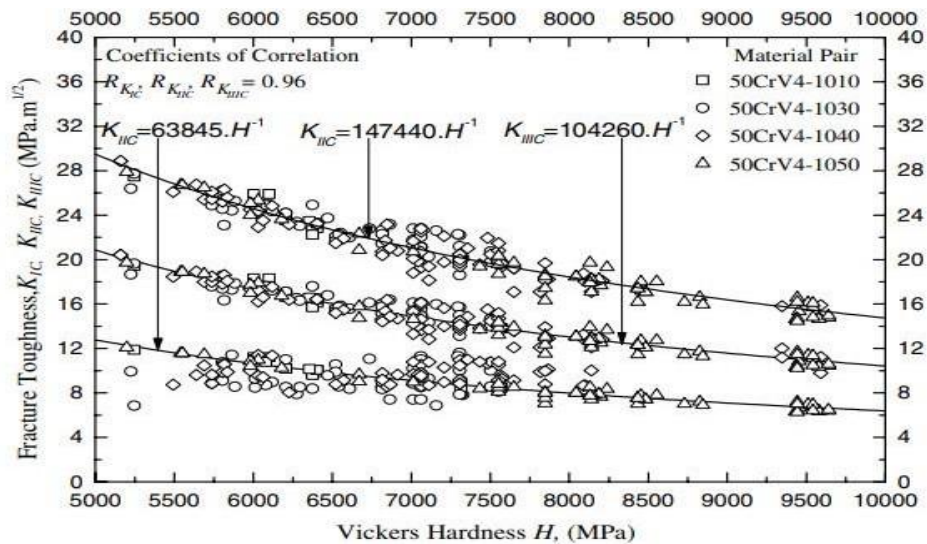


Figure. 18 Evolution de la ténacité en fonction de la dureté Hv [27].

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

Hayat [28] a examiné l'évolution du facteur d'intensité de contrainte critique des assemblages soudés par points de tôles en acier galvanisé DP600 pour les joints par recouvrement. Les résultats ont montré que le facteur d'intensité de contrainte critique varie en fonction du courant de soudage et de la durée au niveau du noyau, atteignant un maximum dans une zone spécifique (Figure 19). La dureté de la zone soudée influence également le facteur d'intensité de contrainte critique (Figure. 20). Ces résultats fournissent des informations précieuses pour optimiser les paramètres de soudage afin d'assurer des performances optimales des assemblages.

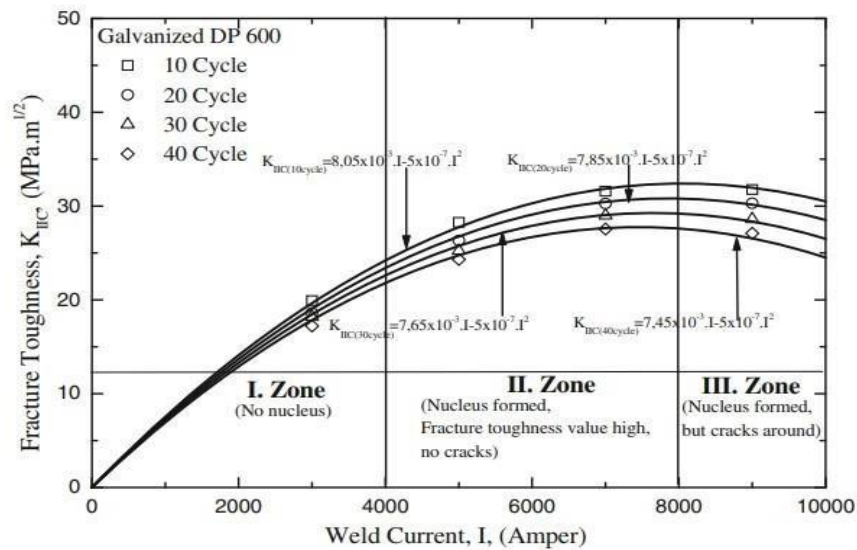


Figure. 19 Facteur d'intensité de contrainte critique en fonction du courant de soudage [28].

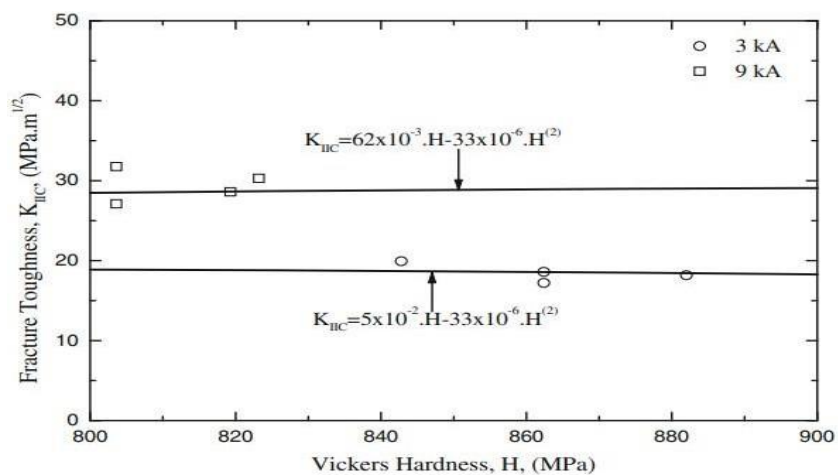


Figure. 20 Facteur d'intensité de contrainte critique KIIC en fonction de la dureté Hv [28].

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

Pouranvari [29] a étudié la résistance et la ténacité des assemblages soudés par points en acier inoxydable martensitique AISI 420. Les résultats ont révélé que la rupture interfaciale est fréquente en raison de la microstructure dure et d'une entaille naturelle. L'application de la mécanique de la rupture a permis de déterminer la ténacité à la rupture en fonction de la taille du noyau du soudage (Figure 21), une valeur critique a été identifiée au-delà de laquelle la rupture par arrachement devient dominante. Un traitement thermique post-soudage peut améliorer la ténacité à la rupture et favoriser la rupture par arrachement.

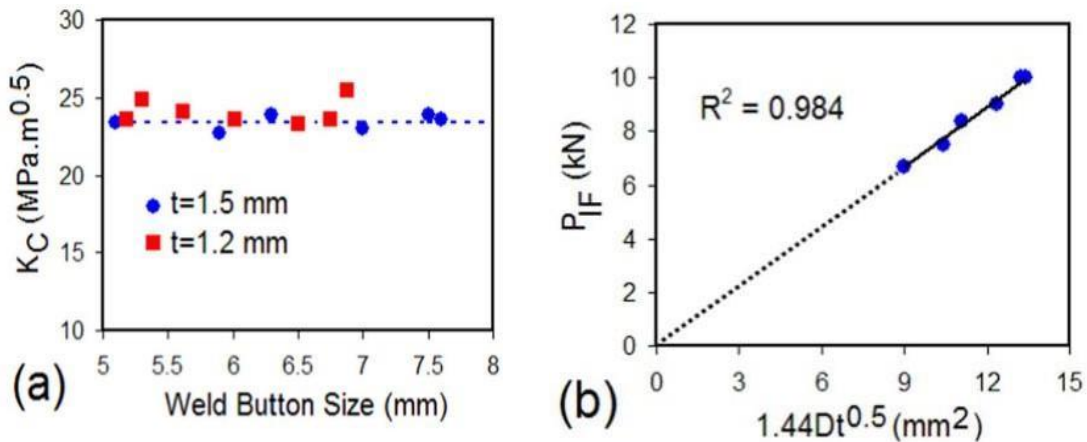


Figure. 21 (a) Évolution de la ténacité  $K_C$  en fonction de la taille du noyau pour des soudures par points réalisées sur des aciers inoxydables martensitiques de 1,5 mm d'épaisseur (étude actuelle) et de 1,2 mm d'épaisseur (b) Tracé du PIF en fonction de  $1,44 Dt^{0,5}$  pour des soudures par points sur des aciers inoxydables martensitiques de 1,5 mm d'épaisseur. La ligne linéaire à ordonnée zéro montre que la charge maximale est contrôlée par ZF, la ténacité [29].

### Conclusion

La mécanique de la rupture est un domaine essentiel pour comprendre et évaluer la performance des matériaux, en particulier dans le contexte des soudures par points résistants (RSW). Les travaux pionniers de Griffith et les développements ultérieurs, tels que le concept de facteur d'intensité de contrainte (FIC), ont permis d'établir des bases solides pour l'analyse des fissures et des modes de rupture. Les différents modes de rupture identifiés, notamment le déboutonnage, la défaillance interfaciale et la défaillance interfaciale partielle, soulignent la complexité des mécanismes de défaillance dans les joints soudés.

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

Les recherches récentes mettent en évidence l'importance des paramètres de soudage, tels que le courant, le temps de soudage et la géométrie des joints, sur la résistance et la ténacité des soudures. Les études expérimentales et les simulations par éléments finis ont permis d'optimiser ces paramètres pour améliorer la qualité des soudures et minimiser les risques de rupture. En outre, l'analyse microstructurale a révélé des transformations de phase et des morphologies spécifiques qui influencent les propriétés mécaniques des joints.

En somme, la compréhension approfondie des mécanismes de rupture et des facteurs influençant la performance des soudures par points est cruciale pour garantir la sécurité et la durabilité des structures dans diverses applications industrielles. Les avancées dans ce domaine continueront d'alimenter les recherches et les innovations pour améliorer les techniques de soudage et la fiabilité des assemblages.

### REFERENCES

- [1] Griffith, A. A. (1921). "The phenomena of rupture and flow in solids". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.
- [2] Irwin, G. R. (1957). "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate". *Journal of Applied Mechanics*.
- [3] Rice, J. R. (1968). "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks". *Journal of Applied Mechanics*.
- [4] ASTM E399. (2012). "Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness of metallic materials".
- [5] Kuna, M. (2012). "Finite elements in fracture mechanics: Theory—Numerics—Applications". Springer Science Media Freiberg.
- [6] Anderson, T. L. (2005). "Fracture mechanics: Fundamentals and applications". Taylor & Francis Group.
- [7] Radaj, D., et al. (2003). "Welding residual stresses and distortion: Calculation and measurement". Springer-Verlag.
- [8] Al-Mukhtar, A. M. (2016). "Review of resistance spot welding sheets: Processes and failure mode". *Advanced Engineering Forum*, 17, 31–57. doi:10.4028/www.scientific.net/ae.
- [9] Tada, H., Paris, P., & Irwin, G. (1985). "The stress analysis of cracks handbook". Hellertown, A: Del Research Corporation. doi: 10.1115/1.801535.

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

- [10] Pook, L. P. (1979). “Approximate stress intensity factors obtained from simple plate bending theory”. *Engineering Fracture Mechanics*, 12, 505–522. doi: 10.1016/0013-7944(79)90093-6.
- [11] Radaj, D. (1989). “Stress singularity, notch stress and structural stress at spot welded joints”. *Engineering Fracture Mechanics*, 34, 495–506. doi: 10.1016/0013-7944(89)90161-6.
- [12] Zhang, D. (1997). “Stress intensities at spot welds”. *International Journal of Fracture*, 88, 167–185. doi: 10.1023/A:1007461430066.
- [13] Zhang, S. (1999). “Approximate stress intensity factors and notch stresses for common spot-welded specimens”. *Welding Research*. Available at: <http://files.aws.org/wj/supplement/may99/ZHANG.pdf>.
- [14] Zhang, S. (2001). “Fracture mechanics solutions to spot welds”. *International Journal of Fracture*, 112, 247–274. doi: 10.1023/A:1013588929709.
- [15] Lin, S.-H., Pan, J., Wu, S.-R., Tyan, T., & Wung, P. (2002). “Failure loads of spot welds under combined opening and shear static loading conditions”. *International Journal of Solids and Structures*, 39, 19–39. doi: 10.1016/S0020-7683(01)00187-1.
- [16] Wang, D.-A., Lin, P.-C., & Pan, J. (2005). “Geometric functions of stress intensity factor solutions for spot welds in lap-shear specimens”. *International Journal of Solids and Structures*, 42, 6299–6318. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.05.037.
- [17] Wang, D.-A., & Pan, J. (2005). “A computational study of local stress intensity factor solutions for kinked cracks near spot welds in lap-shear specimens”. *International Journal of Solids and Structures*, 42, 6277–6298. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.05.036.
- [18] Lin, P.-C., Wang, D.-A., & Pan, J. (2007). “Mode I stress intensity factor solutions for spot welds in lap-shear specimens”. *International Journal of Solids and Structures*, 44, 1013–1037. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2006.05.031.
- [19] Lin, P.-C., & Pan, J. (2008). “Closed-form structural stress and stress intensity factor solutions for spot welds under various types of loading conditions”. *International Journal of Solids and Structures*, 45, 3996–4020. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2008.02.006.
- [20] Lin, P.-C., & Pan, J. (2008). “Closed-form structural stress and stress intensity factor solutions for spot welds in commonly used specimens”. *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 5187–5206. doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.08.005.
- [21] Yu, F. (2020). “Investigation of failure mechanisms of resistance spot welds in automotive steels using various techniques”. Doctoral thesis, Faculty of Engineering, University of Sheffield.

## CHAPITRE II : Généralités sur mécanique de la rupture

- [22] Jagadeesha, T., & Jothi, T. J. S. (2015). “Studies on the influence of process parameters on the AISI 316L resistance spot-welded specimens”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [23] Singh, R., et al. (2020). “Study the effect of different parameters on resistance spot weld of ASS 316L material”. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 3(2).
- [24] Jagadeesha, T. (2017). “Experimental studies in weld nugget strength of resistance spot-welded 316L austenitic stainless steel sheet”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [25] Kianersi, D., Mostafaei, A., & Amadeh, A. A. (2014). “Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations”. *Materials and Design*.
- [26] Mohammed, H. G., Ginta, T. L., & Mustapha, M. (2020). “The investigation of microstructure and mechanical properties of resistance spot welded AISI 316L austenitic stainless steel”. *Materials Today: Proceedings*.
- [27] Sevim, I. (2006). “Effect of hardness to fracture toughness for spot welded steel sheets”. *Materials Design*, 27(1), 21–30. doi: 10.1016/j.matdes.2004.09.008.
- [28] Hayat, F., & Sevim, I. (2012). “The effect of welding parameters on fracture toughness of resistance spot-welded galvanized DP600 automotive steel sheets”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58, 1043–1050. doi: 10.1007/s00170-011-3428-x.
- [29] Pouranvari, M. (2017). “Fracture toughness of martensitic stainless steel resistance spot welds”. *Materials Science and Engineering: A*, 680, 97–107. doi: 10.1016/j.msea.2016.10.08

# CHAPITRE III :

*Etude expérimentale*

# CHAPITRE III : Etude expérimentale

## I. Introduction

Dans cette étude, l'acier inoxydable AISI 316L a été choisi pour ses excellentes propriétés de résistance à la corrosion et ses bonnes performances mécaniques. Des éprouvettes ont été préparées pour deux types de joints : les joints en pelage (peel joints) et les joints par recouvrement. Ces joints ont été assemblés par soudage par résistance avec des paramètres variables, notamment le courant de soudage, le temps et la force de l'électrode. Des essais mécaniques, en particulier des tests de cisaillement, ont été conduits pour analyser l'impact des paramètres cités ci-dessus sur la qualité des joints, la résistance à la rupture et comportements plastique.

## II. Matériaux d'étude (AISI 316L)

### II.1 Description

Les aciers inoxydables austénitiques AISI 316L on peut les nominé par quatre désignations mentionnées dans le Tableau. 1, incluent du molybdène (Mo) afin d'améliorer la résistance à la corrosion par piqûres. Les versions "L", sont caractérisées par une faible teneur en carbone et sont souvent choisies pour des usages dans des environnements où des températures de sensibilisation, comme le cas du soudage. Cette situation permet d'éviter la formation de carbures de chrome et améliore en même temps la résistance à la corrosion intergranulaire [1].

Tableau. 1 Désignations de l'acier inoxydables Cr-Ni-Mo [1].

Acier inoxydable austénitique Cr-Ni-Mo : ACX 240	
EN désignation (Norme Européenne)	ASTM désignation (Norme Etat unis)
1.4404	316L
X2CrNiMo17-12-2	S31603

### II.2 Propriétés chimiques et physiques

La composition chimique et les propriétés physiques du matériau étudié dans cette étude sont données respectivement par les tableaux 1 et 2 [1].

## CHAPITRE III : Etude expérimentale

Tableau. 2 Composition chimique pour de l'acier AISI 316L [1]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.01 2	0.403	1.351	0.028	0.001	16.605	10.115	2.08	0.043

Tableau. 3 Caractéristiques physiques de l'acier AISI 316L [1]

	20 C°	100 C°	200 C°	300 C°	400 C°	500 C°
Module d'élasticité (Gpa)	200	194	186	179	172	165
Coefficient moyen d'expansion linéaire entre 20 °C et	-	16	16.5	17	17.5	1
Conductivité thermique	15	16	17.5	19	21	22.5
Résistivité électrique	0.75	0.82	0.95	1.05	1.12	1.19

### II.3 Caractérisation mécanique

L'essai de traction consiste à appliquer une charge croissante sur trois éprouvettes en acier inoxydable 316L selon les dimensions mentionnées dans la Figure. 1 jusqu'à sa rupture (Figure.2).

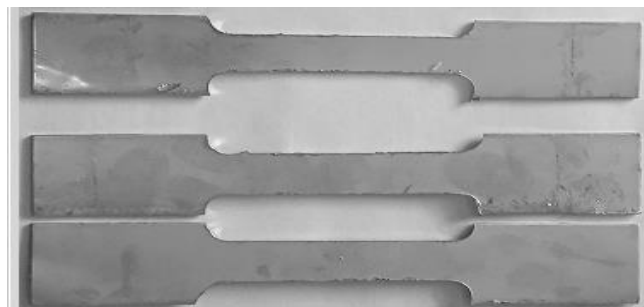
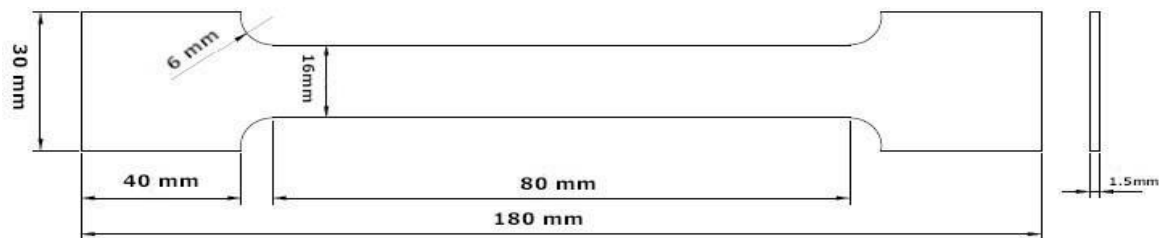


Figure. 1 Eprouvettes en acier 316L préparées pour les essais de caractérisations mécaniques.

## CHAPITRE III : Etude expérimentale



Figure. 2 Eprouvette d'essai de traction après la rupture.

Trois essais de traction ont été réalisés, produisant des courbes charges-déplacements illustrées par la Figure. 3. Les caractéristiques mécaniques sont dérivées et calculées analytiquement d'après les courbes contraintes-déformations présentées dans la Figure.4.

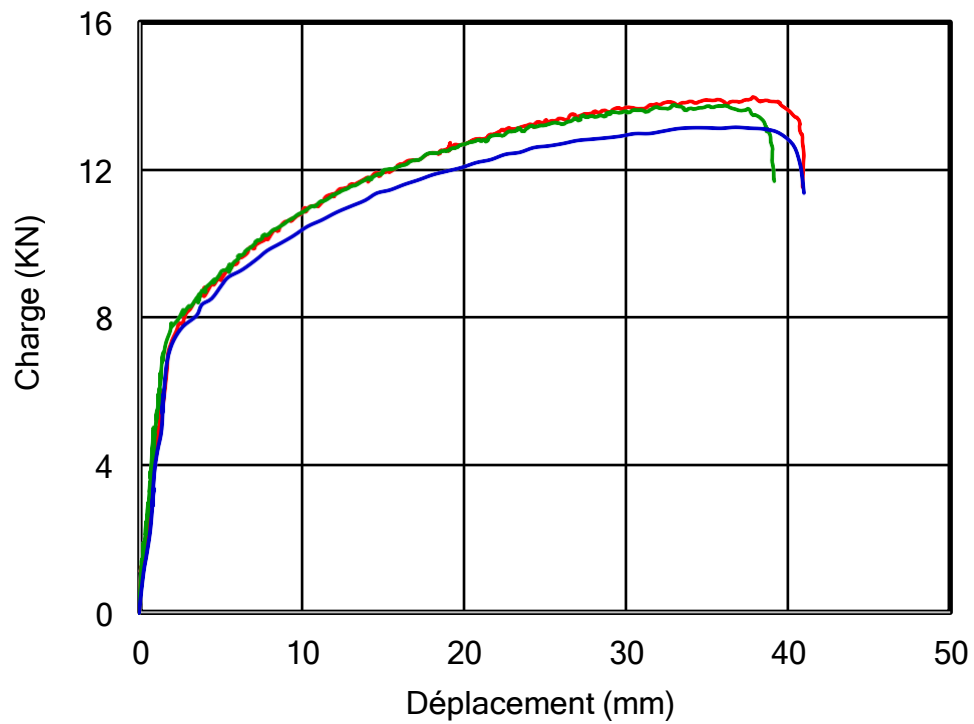


Figure. 3 Courbes charges-déplacements de l'acier 316L.

## CHAPITRE III : Etude expérimentale

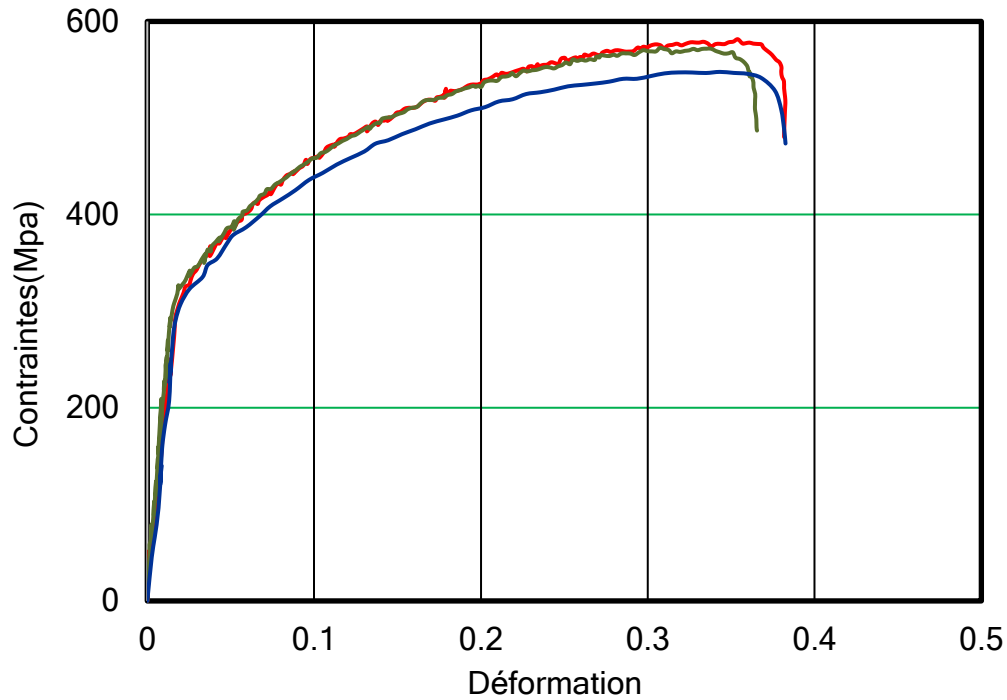


Figure. 4 Courbes contraintes-déformations de l'acier 316L.

Pour quantifier la rigidité du matériau, nous utilisons le module d'élasticité et la déformation dans la zone élastique linéaire du matériau donné par la formule suivante [2] :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

Enfin, la ductilité du matériau est mesurée par l'allongement en pourcentage (A%), qui représente l'augmentation de longueur par rapport à la longueur originale  $L_0$  après rupture [2].

$$A\% = \left( \frac{L_f - L_0}{L_0} \right) 100 \quad (2)$$

Les résultats des essais de traction pour les caractérisations mécanique de l'acier inoxydable 316 L sont exprimés dans le tableau suivant :

Tableau. 4 Comparaisons entre les résultats expérimentaux et les résultats de constructeur.

	E (GPa)	Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A%
Résultats expérimentaux	200	569.32	334,14	35.39
Résultats du fournisseur	200	530-680	240	40

## CHAPITRE III : Etude expérimentale

### III. Préparation des éprouvettes

Une tôle en acier inoxydable austénitique AISI 316L d'une épaisseur de 1,5 mm a été utilisée comme matériau de base pour deux types de joints de soudure : des joints à recouvrement et des peels-joints.

#### III.1 Réalisation des peels joints

Dans notre étude, nous avons préparé 60 éprouvettes en acier inoxydable 316L. Chaque éprouvette mesurait initialement 130 mm de longueur sur 30 mm de largeur. La préparation minutieuse des échantillons a consisté en une opération de pliage à angle droit ( $90^\circ$ ) des plaques, générant ainsi une zone de recouvrement précise de 35 mm, tandis que la partie non superposée conservait une dimension de 95 mm, comme illustré dans la Figure 5. Cette géométrie spécifique, obtenue grâce à un pliage contrôlé avec précision, constitue la configuration expérimentale optimale requise pour la réalisation des essais mécaniques normalisés.

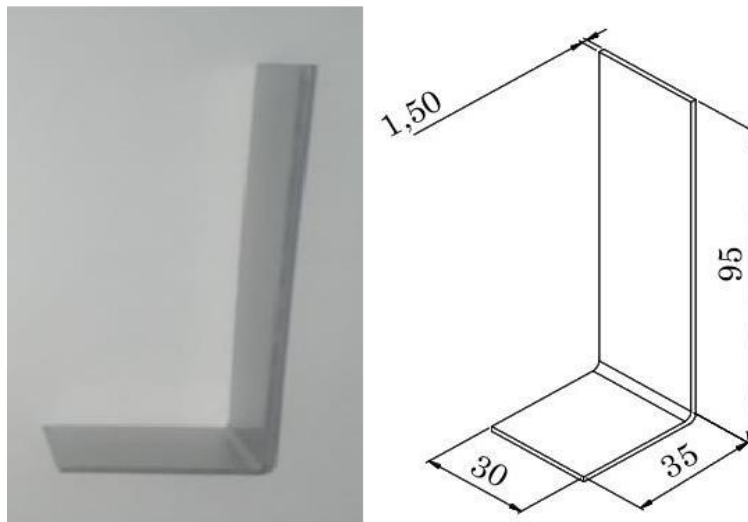


Figure. 5 Epreuves de Peel joints.

#### III.2 Réalisation des joints par recouvrement

Une série de 60 échantillons, chacun avec des dimensions de 115x30 mm. Les échantillons ont été découpés à l'aide d'une guillotine, garantissant des dimensions précises et cohérentes pour tous les échantillons. Ensuite, on a marqué et ajusté la zone de recouvrement à 30 mm afin d'assurer un alignement précis lors du soudage (Figure. 6). Après une

## CHAPITRE III : Etude expérimentale

inspection approfondie des surfaces et des bords, les éprouvettes étaient prêtes pour processus de soudage par résistance.

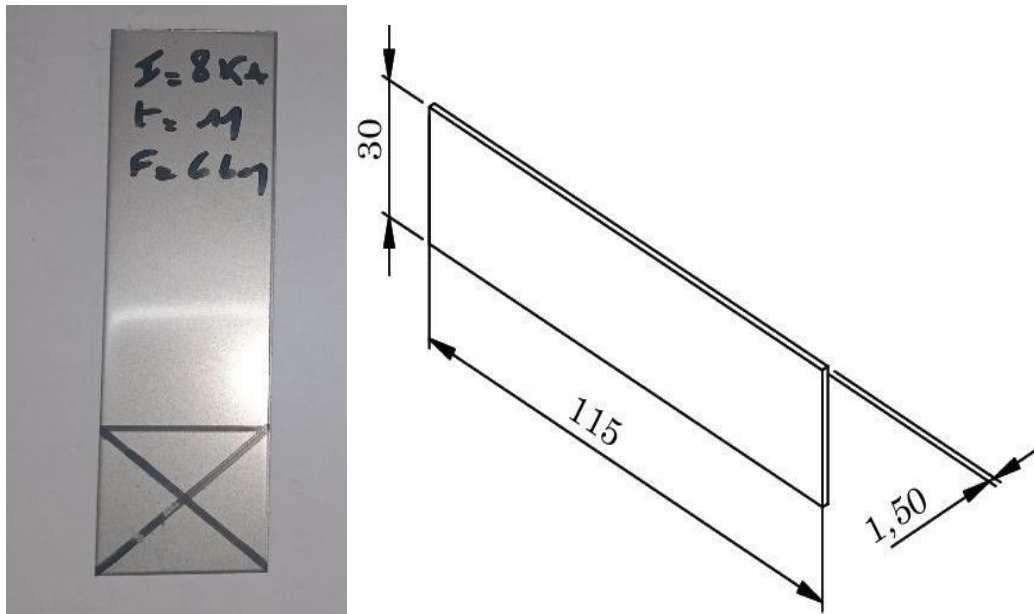


Figure. 6 Eprouvettes des joints par recouvrement.

### IV. Procédure de soudage

#### IV.1 Machine de soudage

L'assemblage des éprouvettes 'pour les joints par recouvrement et les joints en pelage a été réalisé à l'aide de la machine « TECNA » (Figure .7a). Cette machine est équipée d'une force d'électrode pneumatique réglable et d'un tableau de bord de contrôle et de définir les paramètres de soudage (courant de soudage et du temps de soudage, offrant ainsi une grande précision dans le processus de soudage (Figure .7b) [3].

## CHAPITRE III : Etude expérimentale



Figure. 7 a) Machine de soudage « TECNA », b) les outils de commande des paramètres de soudage.

### IV.2 Paramètres de soudage sélectionnés

Le diamètre de l'embout de l'électrode a été maintenu à  $\varnothing 7$  mm, en suivant la règle du  $5\sqrt{t}$ , qui stipule que le diamètre doit être environ cinq fois la racine carrée de l'épaisseur de la tôle [4]. Pour une épaisseur de tôle de 1,5 mm, cette règle a permis de déterminer une taille d'embout optimale pour un soudage par points efficace. Le courant de soudage, la durée et la force de l'électrode ont été considérés comme des paramètres variables, avec un courant de soudage variant de 8 à 16 kA, des temps de soudage de 10, 11 et 13 cycles, et des forces d'électrode de 6 bars et 8 bars. Ces valeurs sont présentées au Tableau .5 pour les deux types des joints (Figure.8).

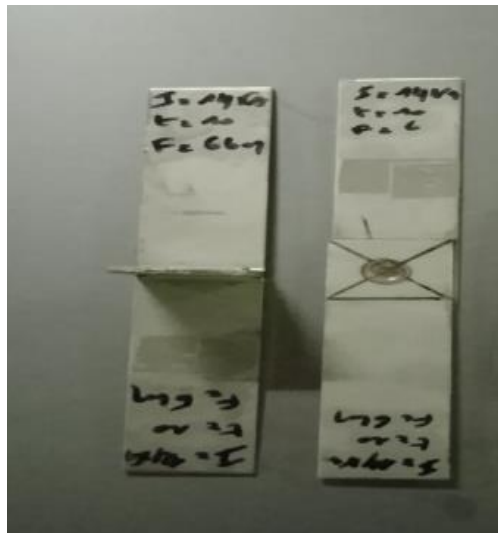


Figure. 8 Joints par recouvrement et Peel-joints après le soudage.

## CHAPITRE III : Etude expérimentale

Tableau. 5 Paramètres de soudage sélectionnés

N°	Courant de soudage (KA)	Temps de soudage (Cycles)	Force d'électrode (Bar)
1	8	10	6
2	10		
3	12		
4	14		
5	16		
6	8	11	
7	10		
8	12		
9	14		
10	16		
11	8	13	
12	10		
13	12		
14	14		
15	16		
16	8	10	8
17	10		
18	12		
19	14		
20	16		
21	8	11	
22	10		
23	12		
24	14		
25	16		
26	8	13	
27	10		
28	12		
29	14		
30	16		

### V. Essai de traction

#### V.1 Définition

L'essai de cisaillement par traction est une technique largement appliquée pour déterminer les propriétés mécaniques des assemblages soudés par points sous des charges croissantes. Ce test est particulièrement pertinent pour étudier la déformation plastique et pour ajuster les processus de fabrication, qu'ils impliquent ou non un enlèvement de matière [5].

#### V.2 Machine d'essai Controlab

La machine d'essai Controlab est un équipement conçu pour réaliser des essais mécaniques sur divers matériaux. Elle permet de mesurer des propriétés telles que la résistance à la traction, le cisaillement, et d'autres caractéristiques mécaniques essentielles. Grâce à sa capacité de chargement de 600 KN, précise et à son système d'acquisition de données avancé, cette machine offre des résultats fiables et reproductibles (Figure. 9).



Figure. 9 Machine d'Essai Controlab.

#### V.3 Méthodologie

Au cours de cette expérience, des éprouvettes (joints par recouvrement et pelage) en acier inoxydable AISI 316L sont insérés entre les mors de la machine. Les échantillons sont soumis à une charge progressive jusqu'à ce qu'ils se fracturent (Figure.10). Les résultats de ces essais fournissent des courbes de force/déplacement, ainsi que des données sur la limite élastique, la force

## CHAPITRE III : Etude expérimentale

de rupture maximale et l'allongement à la rupture. L'allongement est défini comme le rapport entre la section de l'échantillon au moment de la rupture et sa section initiale. Cette approche méthodologique aide à mieux comprendre le comportement des matériaux en conditions d'utilisation et contribue à optimiser les paramètres de fabrication pour garantir la robustesse et la durabilité des assemblages soudés.

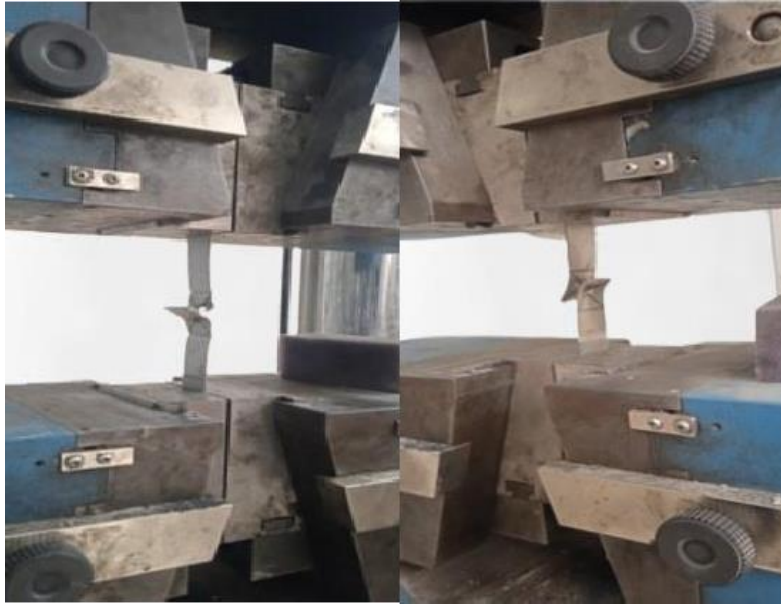


Figure. 10 Éprouvettes fracturées après l'essai de cisaillement par traction.

### VI. Mesure du noyau de soudure

La mesure du noyau de soudure est essentielle pour évaluer la qualité et la résistance des joints soudés par points. Le diamètre du noyau, qui est la zone fusionnée formée lors du processus de soudage, a été mesuré après l'essai de pelage selon les normes AWS, comme indiqué dans la Figure.11. Un noyau suffisamment développé est crucial pour garantir une bonne adhésion entre les matériaux et permet de calculer la ténacité à la rupture pour les joints en cisaillement et en pelage [6].

## CHAPITRE III : Etude expérimentale

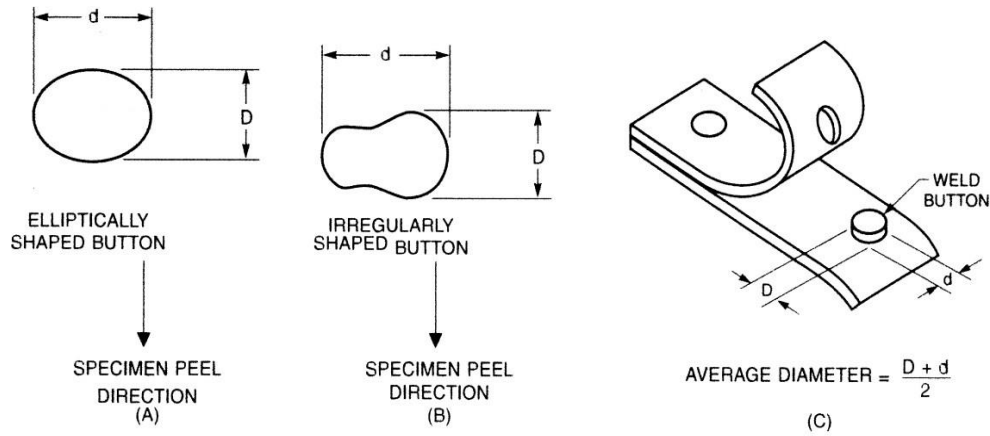


Figure. 11 Méthode de mesure le noyau de soudure selon les normes AWS [6].

### Conclusion

Notre investigation s'est portée sur l'acier inoxydable austénitique AISI 316L, sélectionné pour ses caractéristiques remarquables de résistance aux environnements corrosifs ainsi que pour ses propriétés mécaniques supérieures. Les configurations expérimentales ont intégré deux typologies d'assemblage – joints en pelage et joints par recouvrement – réalisées par le procédé de soudage par résistance. Une campagne exhaustive d'essais mécaniques a été conduite afin d'évaluer rigoureusement l'influence des paramètres opératoires du soudage sur l'intégrité structurelle des jonctions. L'analyse des données issues des essais de traction démontre une concordance parfaite entre les performances mécaniques observées de l'acier AISI 316L et les valeurs prescrites dans les spécifications techniques du fabricant, attestant ainsi de l'adéquation exceptionnelle de ce matériau pour des applications industrielles soumises à des contraintes sévères.

### RÉFÉRENCES

- [1] ACERINOX, S.A. (2023). "Cedinox0623". Madrid: Austenitic Stainless Steel 1.4404 AISI 316L ASTM S31603 ACX240. Available at: acerinox.com.
- [2] Guen, F. (2018). "Caractérisation mécanique d'un assemblage acier galvanisé soudé par point". Mémoire de master, Université de Tlemcen.
- [3] TECNA. (2023). "Resistance welding systems & balancers". Castel S. Pietro Terme, Bologna, Italy: DCI1500002 Rev.02 8201D-8216D 63-160kVA 01-2023r. Available at: tecna.net.
- [4] Kalyankar, V. D., & Chudasama, G. P. (2020). "Influence of electrode tip diameter on

### ***CHAPITRE III : Etude expérimentale***

metallurgical and mechanical aspects of spot welded duplex stainless steel”. *High Temperature Materials and Processes*, 39(1), 317-327. <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0055>.

[5] Ternane, F. (2023). “Caractérisation mécanique des assemblages soudés à matériaux hétérogènes”. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen.

[6] American Welding Society. (2019). “AWS Standard C1.1 Recommended Practices For Resistance Welding”. Available at: <https://nexnor.com/wp-content/uploads/2020/05/AWS-C1.1M-C1.1-2019.pdf>.

# CHAPITRE IV :

## *Résultats et Discussion*

### **I.Introduction**

Les éprouvettes testées pour les deux types de joints (Peel joint et recouvrement) sont assemblés par soudage par point sous la variation des trois paramètres de soudage (courant de soudage, temps de soudage, force d'électrode), Les effets de ces paramètres sur les propriétés mécanique, l'aspect géométrique de noyaux et la ténacité des joints soudée sont présentés ci-dessous.

### **II.Effet des paramètres de soudage sur les propriétés mécanique**

#### **II.1 Effet du courant de soudage sur les joints par recouvrement**

Les courbes charge-déplacement montrées par la Figure. 1 illustrent le comportement mécanique des joints par recouvrements soudée par RSW en acier inoxydable AISI 316L soumis à différentes intensités de courant 8 kA à 16 KA, un temps soudage de 11 cycles et une force d'électrode de 8 bars. Initialement, toutes les courbes présentent une région linéaire élastique où la charge et le déplacement sont directement proportionnels. Lorsque la charge augmente, les courbes s'écartent de la linéarité et atteignent un point de charge maximale, représentant la charge maximale que le joint peut supporter avant rupture. L'augmentation du courant de soudage entraîne une augmentation de la charge maximale supportée par le joint avant rupture. Cela indique que le joint devient plus résistant, les intensités de courant plus faibles (8 kA) présentent un déplacement plastique court par rapport aux autres courants de soudage où l'on constate des déformations plastiques plus importantes (10 à 16 kA).

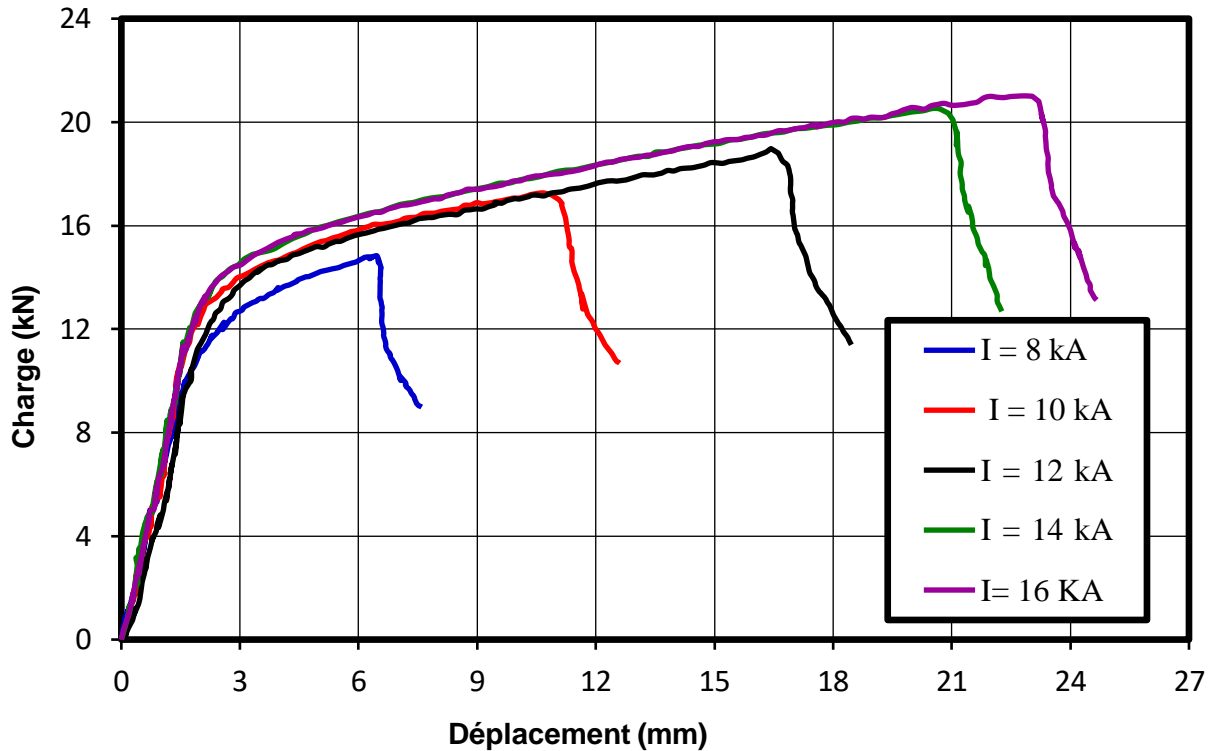


Figure. 1 Courbes Charge/Déplacement sous l'effet du courant de soudage pour les joints par recouvrement pour  $T= 11$  cycles et  $F= 8$  bars.

## II.2 Effet de courant de soudage pour les peels joints

Les courbes charge-déplacement (Figure. 2) des peels joints soudés avec RSW sur l'acier inoxydable AISI 316 L pour courant de soudage variant de 8 à 16 kA, temps de soudage 11 cycles et une force d'électrode de 8 bars présentent deux zones distinctes : une région élastique linéaire initiale très courte et une région de déformation plastique croissante atteignant un seuil maximum de rupture du joint de soudure. De delà de la charge maximale de rupture du joint, on constate la déchirure ductile dans le métal de base à une forme inférieure à la charge maximale de rupture du joint. Cette zone est caractérisée par une déformation plastique significative dans le métal de base. On note aussi que pour un courant de soudage de 16 kA l'absence de la déformation et la déchirure dans le métal de base.

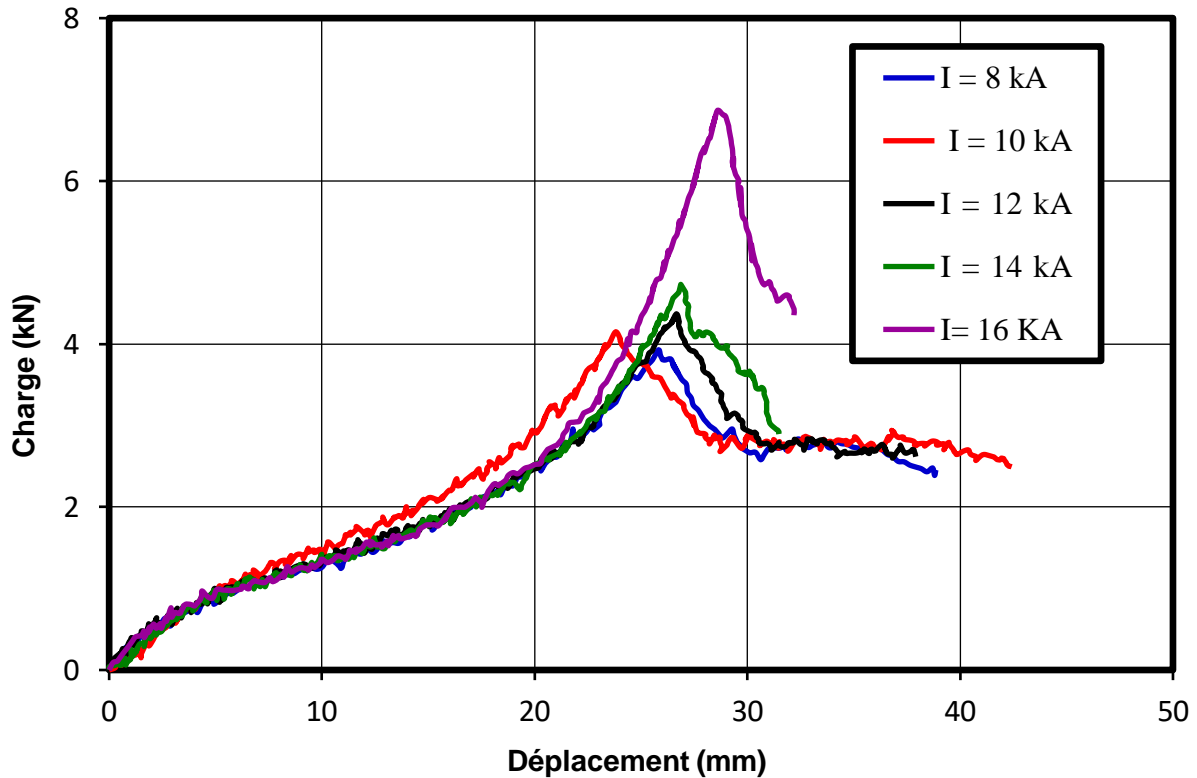


Figure.2 Courbes Charge/Déplacement sous l'effet du courant de soudage pour les peels joints pour  $T= 11$  cycles et  $F= 8$  bars.

### II.3 Effet du temps de soudage pour les joints par recouvrement

Les courbes charge-déplacement données par la Figure. 3 montrent l'effet d'augmentation du temps de soudage de 10 à 13 cycles par une amélioration considérablement de la résistance au cisaillement du joint par recouvrement soudée par RSW. Cela est dû à une augmentation de l'apport thermique, conduisant à un noyau de soudure plus grand et à une meilleure liaison métallurgique. Cependant, un temps de soudage excessif peut entraîner une surchauffe, une distorsion et une réduction de la qualité des joints. Par conséquent, l'optimisation du temps de soudage est cruciale pour trouver un équilibre entre la résistance du joint et d'autres facteurs tels que l'efficacité et la qualité.

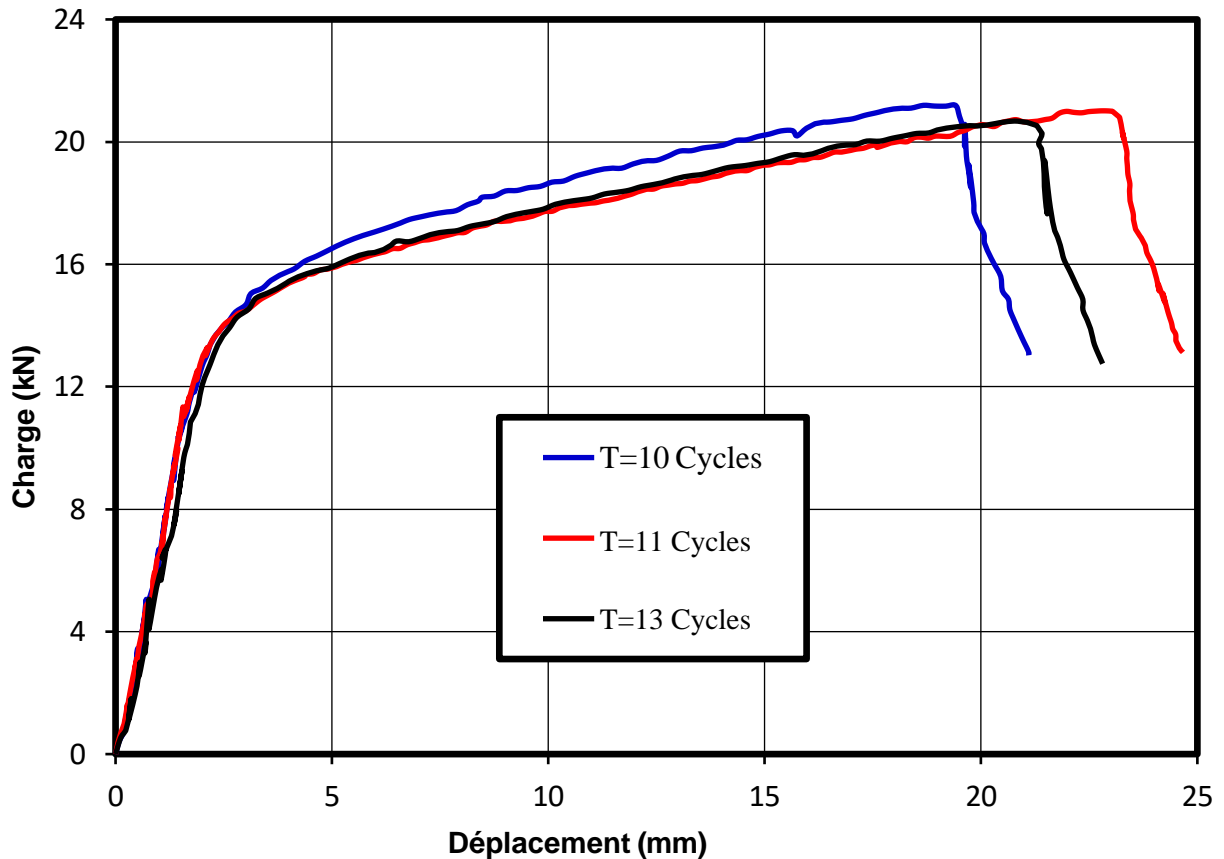


Figure. 3 Courbes de charge/déplacement sous l'effet du temps de soudage pour les joints par recouvrement pour  $I= 16$  kA et  $F= 8$  bars.

#### II.4 Effet de temps de soudage pour les peels joints

Les courbes charge-déplacement de la Figure. 4 révèlent un comportement non linéaire accompagné d'érouissage dans les peels joints soudés par RSW en acier inoxydable AISI 316L soumis à une traction en cisaillement quasi-statique. Une augmentation du nombre de cycles de soudage (10, 11 et 13), maintenus à un courant constant de 16 kA et force d'électrode constante de 8 bars, entraîne une réduction de la charge maximale et favorise l'apparition anticipée d'un déplacement dans le métal de base très faible pour  $I= 16$  kA.

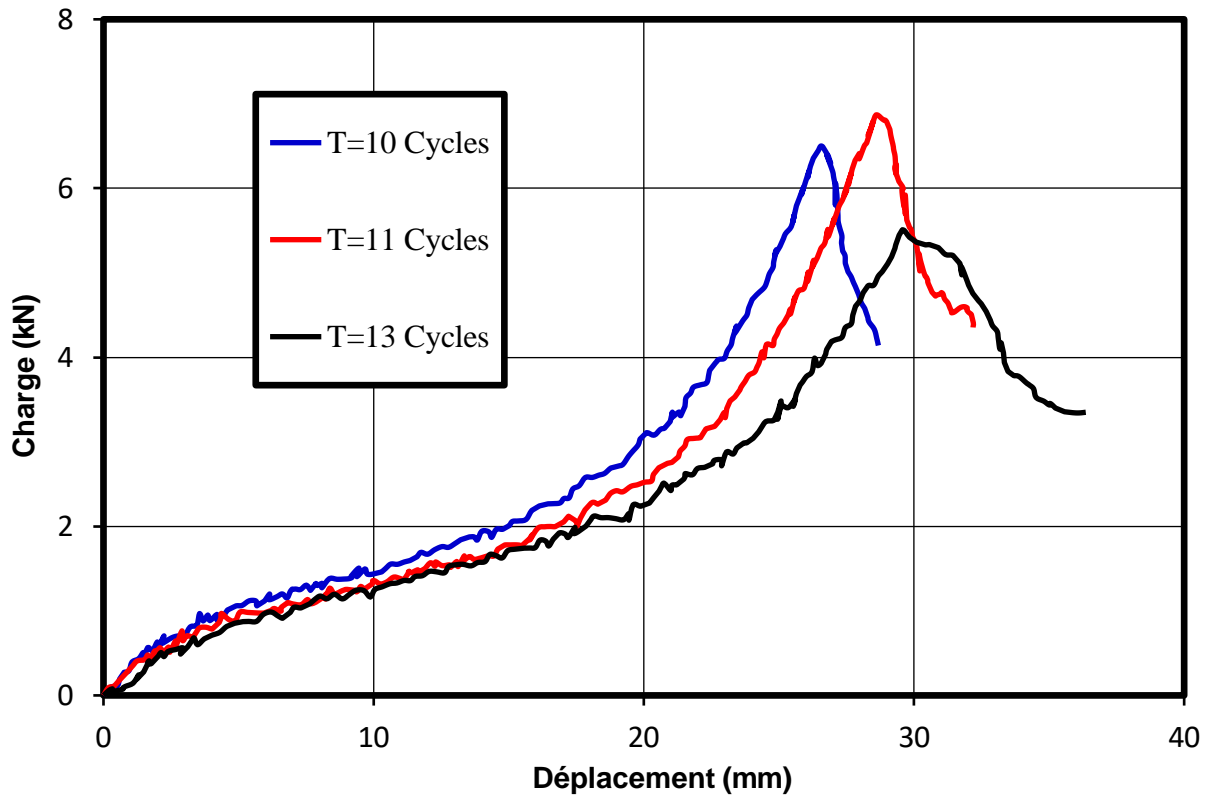


Figure. 4 Courbes de charge/déplacement sous l'effet du temps de soudage pour les peels joints pour T= 11 cycles et F= 8 bars.

### III. Effet des paramètres de soudage sur le diamètre du noyau

Il est reconnu que le courant de soudage a un effet important sur la formation du noyau et sa taille [1]. Les résultats de l'effet du courant de soudage sur le diamètre du noyau sont montrés par les figures 5 et 6 respectivement pour une force de soudage F de 6 et 8 Bars. En effet l'augmentation du courant de soudage entraîne une augmentation du diamètre du noyau. Pour F= 6 Bars, la taille minimale du diamètre est obtenue pour un courant de 8 kA et la taille maximale est obtenue pour un courant de 16 kA, cet effet est dû à l'augmentation de l'énergie développée en conséquence la zone fondue pour chaque courant de soudage. Les diamètres sont respectivement de 6.5 mm et 10.77 mm. De même, on note un effet très négligeable du temps de soudage sur le diamètre du noyau à la force de soudage de 6 bars. La moyenne de l'évolution du diamètre du noyau en fonction du courant de soudage pour une force de 6 bars est exprimée par une équation linéaire sous la forme suivante :

## CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

$$D_{\text{noyau}} = 0.5 \times I + 2.69 \quad (1)$$

Pour une force de soudage de 8 bars, on remarque toujours une augmentation du diamètre du noyau en fonction de l'augmentation du courant de soudage. De plus une légère augmentation du diamètre du noyau est constatée avec la diminution du temps de soudage. La valeur minimale du noyau pour une force de 8 bars à  $I = 8$  kA est de 6.33 mm et atteint une valeur maximale de 11.03 mm pour  $I = 16$  kA. L'évolution de la courbe de tendance moyenne pour différents temps de soudage en fonction du courant de soudage est exprimée par l'équation suivante :

$$D_{\text{noyau}} = 0.5 \times I + 2.66 \quad (2)$$

L'influence de la force de soudage sur le diamètre du noyau en comparant les Figures. 5 et 6 montre que l'augmentation de cette dernière fait augmenter le diamètre du noyau d'une valeur moyenne de 0.25 mm pour les forts courants (16 kA) et les faibles courants (8 kA). Ce résultat montre que même l'augmentation de la force de soudage de 30% n'affecte pas significativement la taille du noyau pour un même courant de soudage.

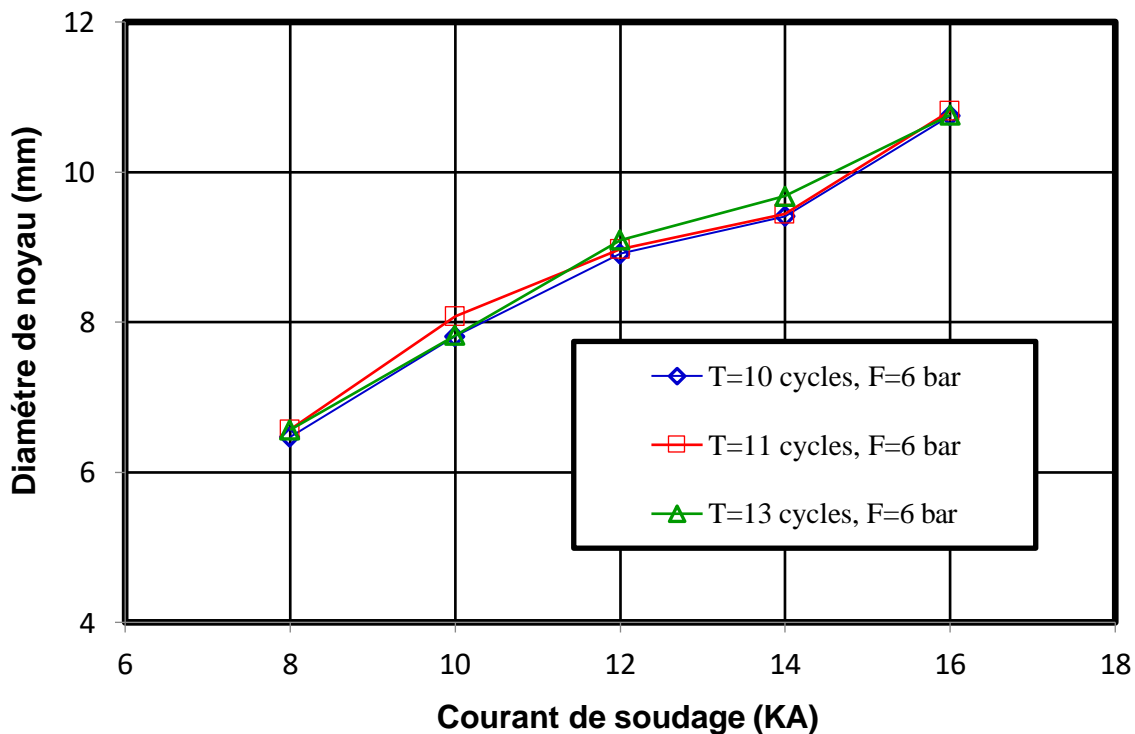


Figure. 5 Effet du courant de soudage sur le diamètre du noyau pour  $F=6$  bars.

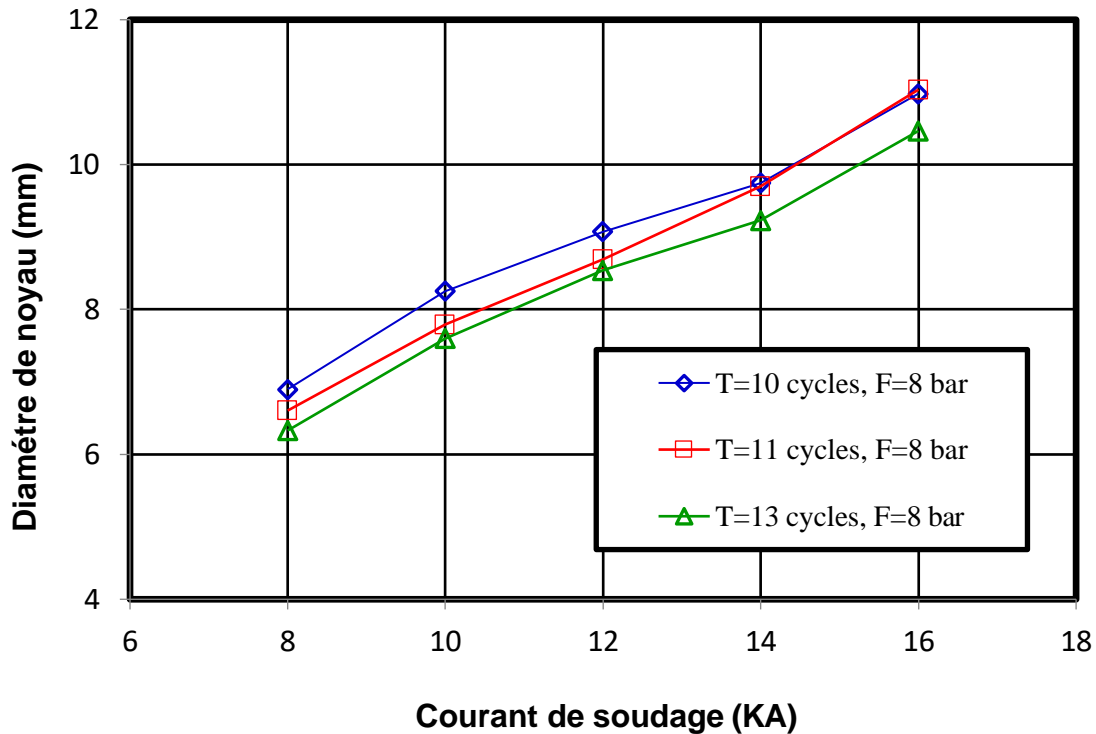


Figure. 6 Effet du courant de soudage sur le diamètre du noyau pour F = 8 bars.

#### IV. Effet des paramètres de soudage sur la pénétration au niveau du point de soudure

Les paramètres de soudage et principalement le courant de soudage affectent la variation de la pénétration au niveau du point de soudure. En effet, l'augmentation du courant de soudage se traduit par une augmentation de la pénétration au niveau du point de soudure pour de niveau de force de soudage (Figures. 7 et 8). On note aussi un très faible effet du temps de soudage et de la force de soudage sur la pénétration. L'évolution moyenne de la pénétration en fonction du courant de soudage pour F=6 bars et F=8 bars sont exprimés respectivement par les équations suivantes :

$$P = 0.074 \times I - 0.185 \quad (3)$$

$$P = 0.087 \times I - 0.262 \quad (4)$$

## CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

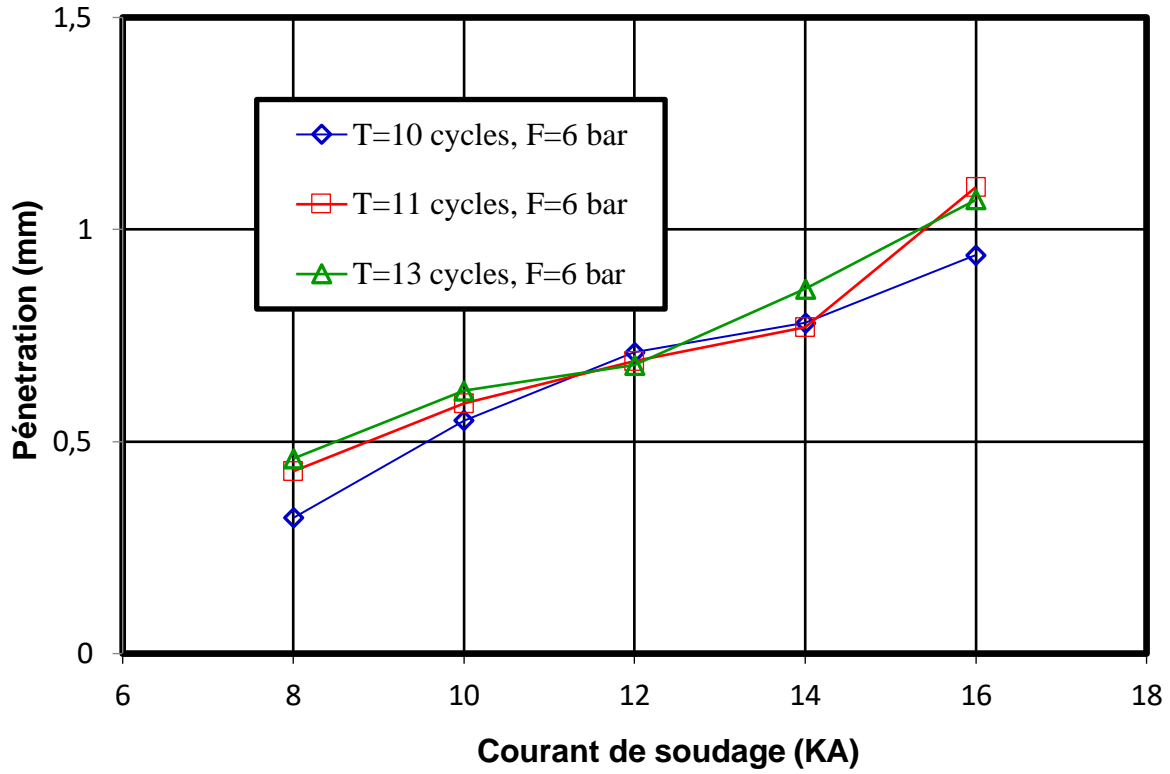


Figure. 7 Effet du courant de soudage sur la pénétration pour F=6 bars.

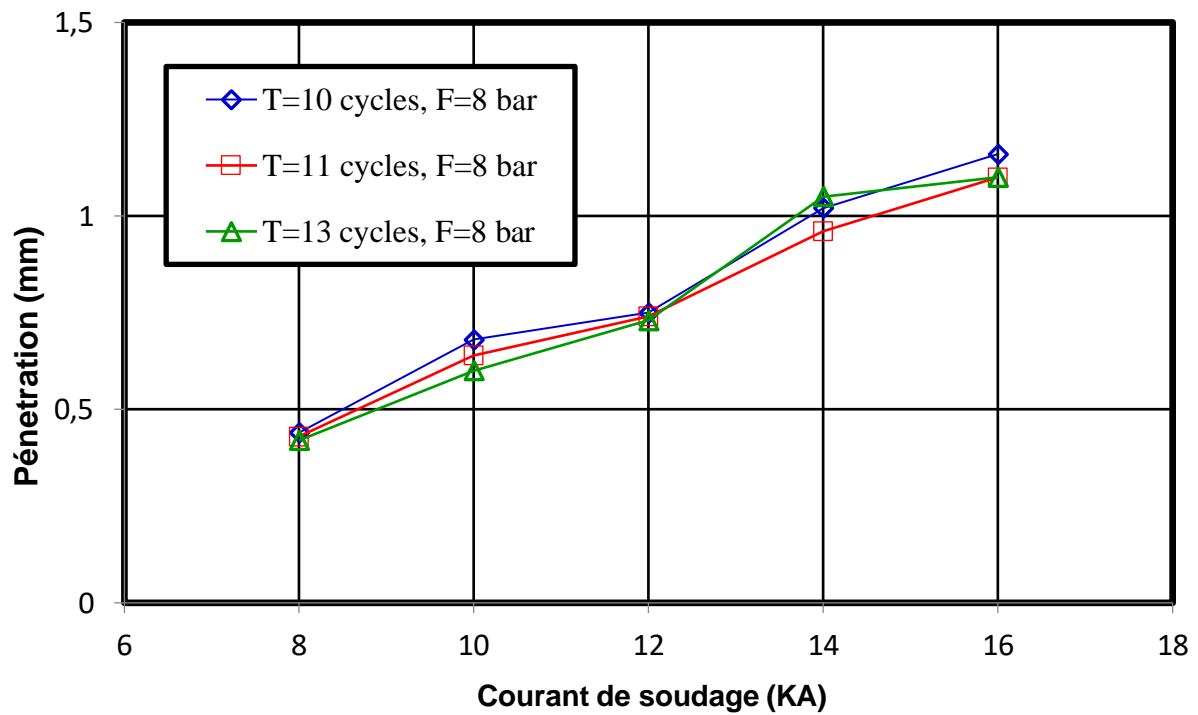


Figure. 8 Effet du courant de soudage sur la pénétration pour F=8 bars.

## V. Effet des paramètres de soudage sur l'évolution du facteur d'intensité de contraintes critique (FICC)

### V.1 Effet du courant de soudage sur le FICC pour joint par recouvrement

La rupture d'un joint de soudure est caractérisée par l'évaluation du facteur d'intensité de contraintes critique (FICC). L'évolution du FICC pour une force de soudage de 6 bars sous la variation du courant de soudage de 8 à 16 kA est montrée par la Figure. 9. On remarque que l'augmentation du courant de soudage permet de diminuer le FICC. Dans la plage des courants étudiés, le FICC ou ténacité diminue en raison de la fusion excessive et des éclaboussures [2].

Une légère diminution du FICC est constatée sous l'augmentation du temps de soudage, principalement pour  $T = 13$  cycles.

Pour une force de soudage de 8 bars on note toujours une diminution du FICC avec l'augmentation du courant de soudage mais l'effet du temps de soudage est réduit (Figure. 10).

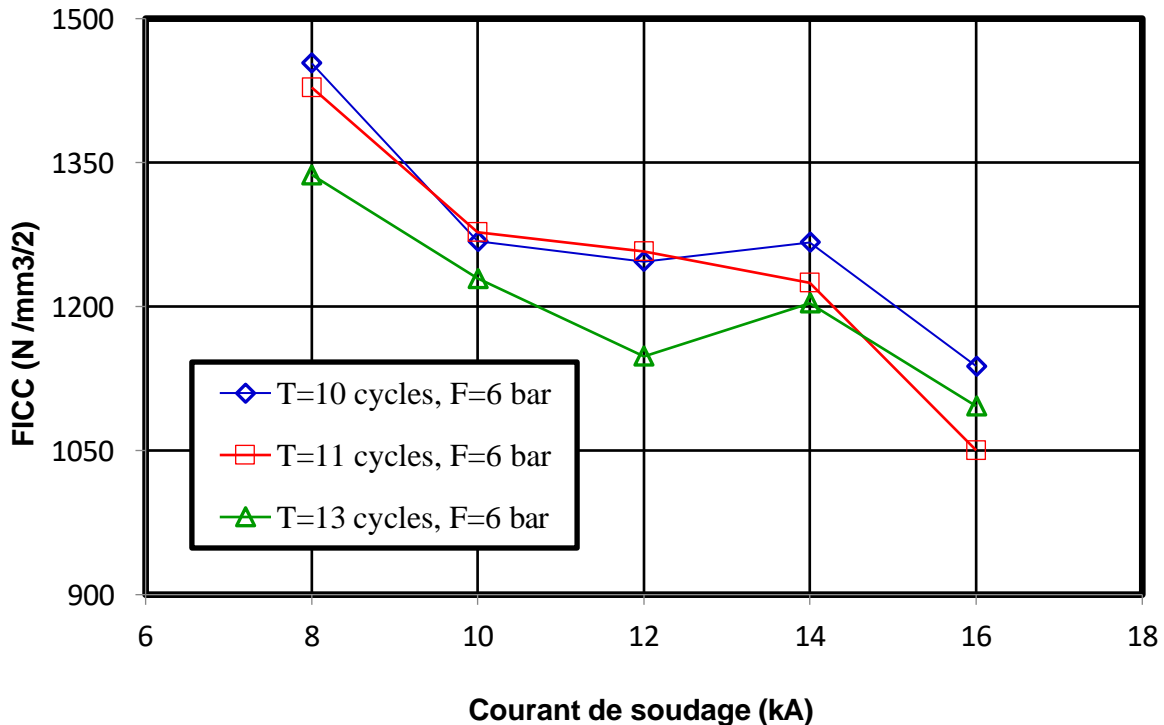


Figure. 9 Effet du courant de soudage sur FICC d'un joint par recouvrement pour F=6 bars.

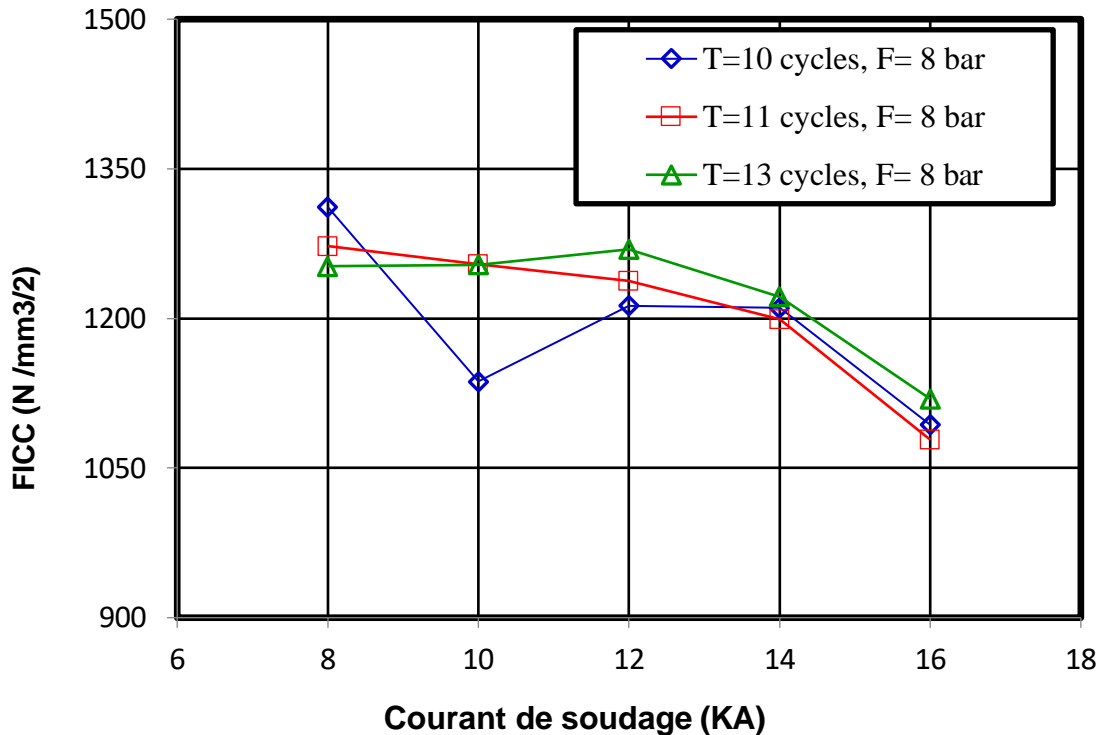


Figure. 10 Effet du courant de soudage sur FICC d'un joint par recouvrement pour F=8 bars.

## V.2 Effet du courant du soudage sur FICC pour les joints par pelage

Pour une force d'électrode constante de 6 bars (Figure. 11), le FICC diminue de manière significative lorsque le courant de soudage augmente de 8 kA à 12 kA. Cette baisse peut être attribuée à une surchauffe excessive dans la zone de soudure, qui affaiblit la liaison métallurgique et augmente la susceptibilité aux défauts internes, tels que des porosités ou des fissures. Cependant, une légère augmentation du FICC est observée entre 14 et 16 kA, indiquant que des courants plus élevés pourraient redistribuer les contraintes dans le noyau et améliorer la résistance locale.

Pour une force d'électrode de 8 bars (Figure. 12), le comportement diffère. Le FICC présente une baisse progressive jusqu'à 12 kA, suivie d'une augmentation notable à 14 kA, puis d'une nouvelle réduction à 16 kA. Cette variation complexe peut être due à des changements dans la microstructure du noyau et la zone affectée thermiquement (ZAT), où des cycles thermiques intenses influencent la taille des grains et la composition chimique locale [3].

## CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

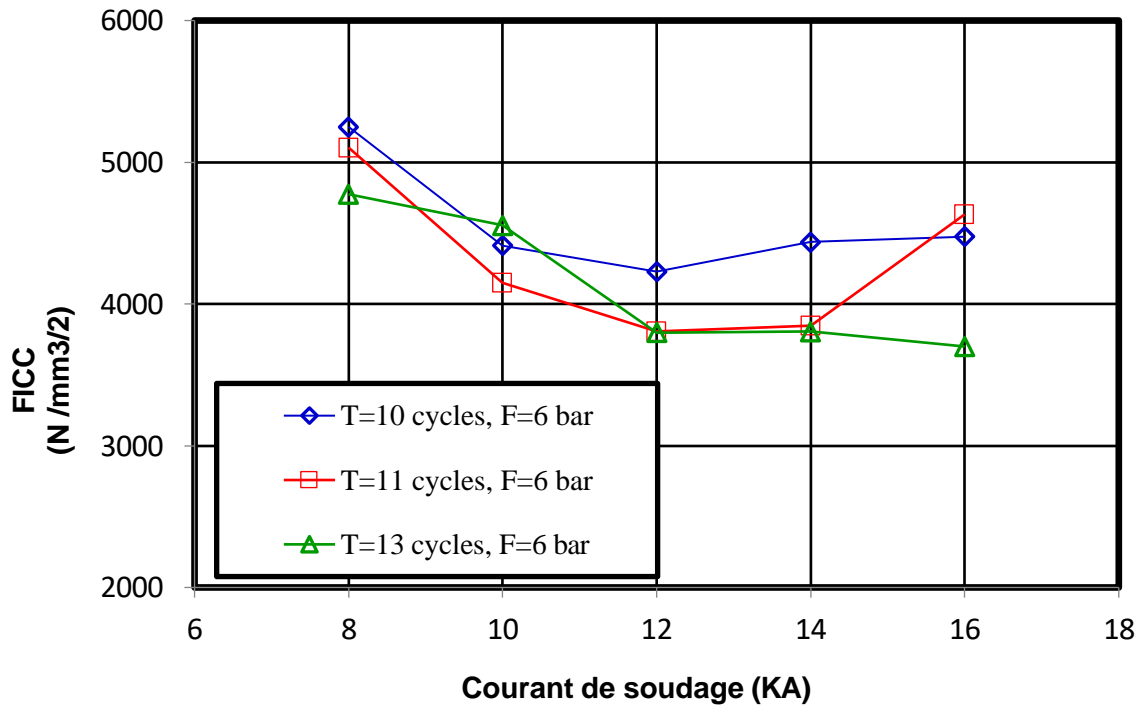


Figure. 11 Effet du courant de soudage sur FICC pour peel joints pour F= 6 bars.

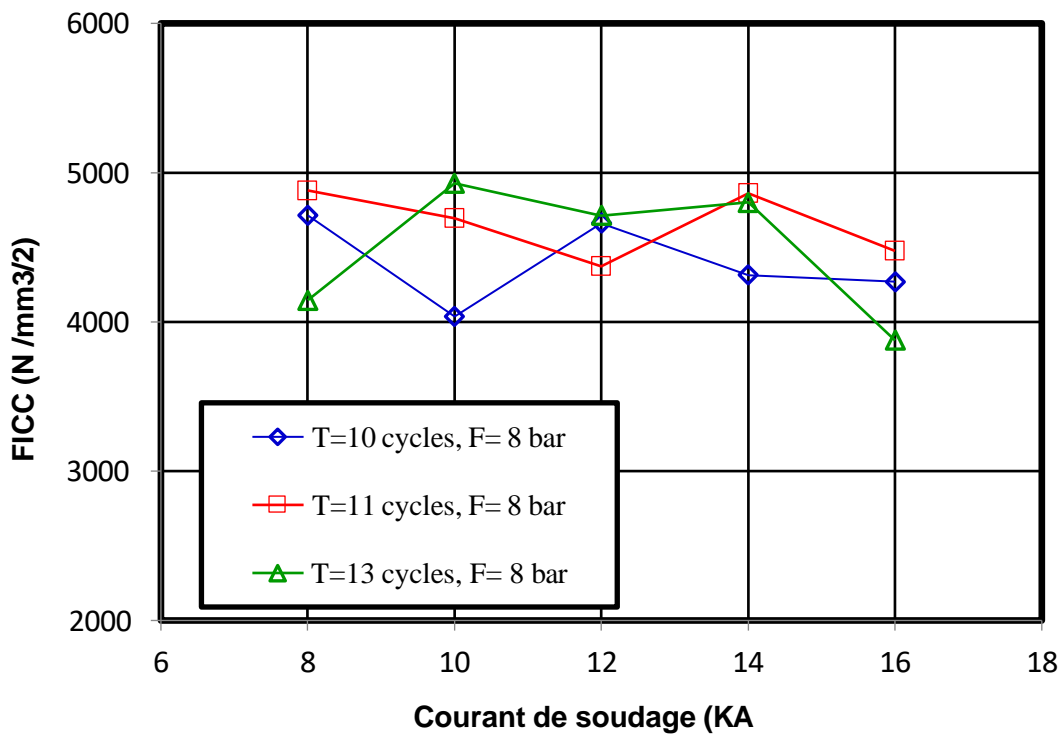


Figure. 12 Effet du courant de soudage sur FICC pour peel joints pour F= 8 bars.

### V.3 Effet du temps de soudage sur le FICC pour les joints par recouvrement

Les Figures. 13 et .14 montrent une relation significative entre le temps de soudage et le facteur d'intensité critique (FICC) pour les joints par recouvrement. Pour une force constante de 6 bars (Figure. 13), le FICC diminue progressivement avec l'augmentation du temps de soudage. Cela peut être expliqué par une surchauffe locale qui affaiblit la zone de soudure et crée des microfissures ou des porosités dans la structure interne. Ce phénomène réduit l'efficacité de la transmission des contraintes et mène à une baisse globale du FICC.

En revanche, pour une force constante de 8 bars (Figure. 14), une augmentation du temps de soudage entraîne une augmentation du FICC. Cette tendance s'explique par un apport thermique mieux distribué, améliorant la fusion métallurgique et la résistance globale du noyau. Cependant, des temps de soudage excessifs pourraient entraîner une réduction de la qualité du joint par la formation de structures fragiles dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Une optimisation précise du temps de soudage est donc cruciale pour maximiser les performances des joints [4].

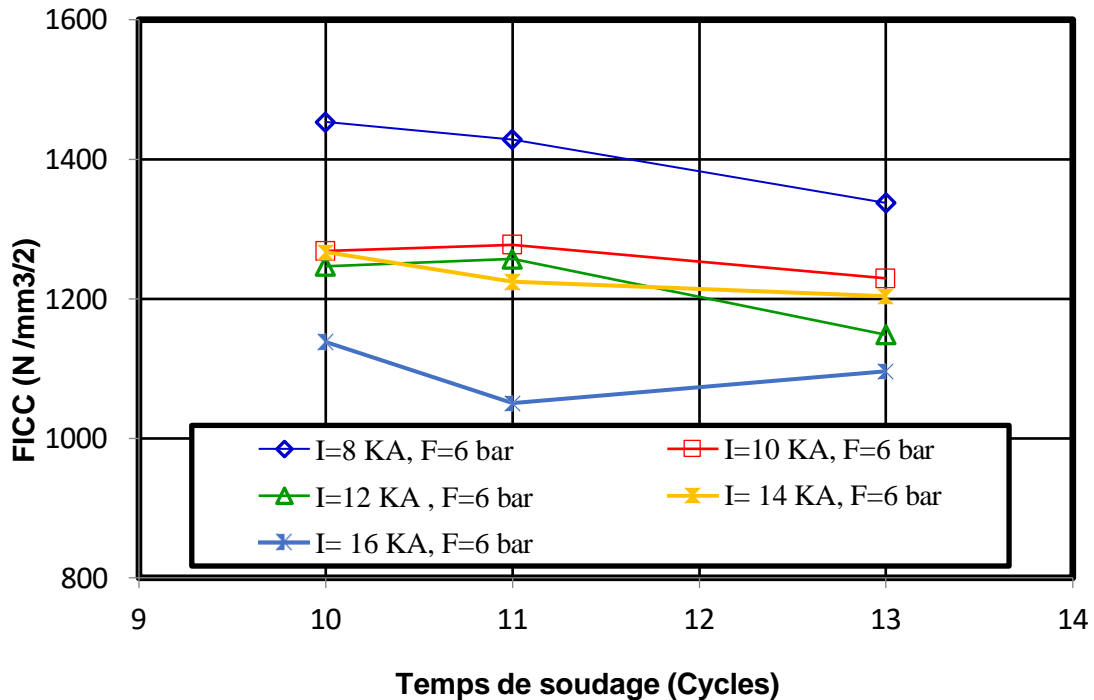


Figure. 13 Effet du temps de soudage sur FIC pour joint par recouvrement pour F=6 bars.

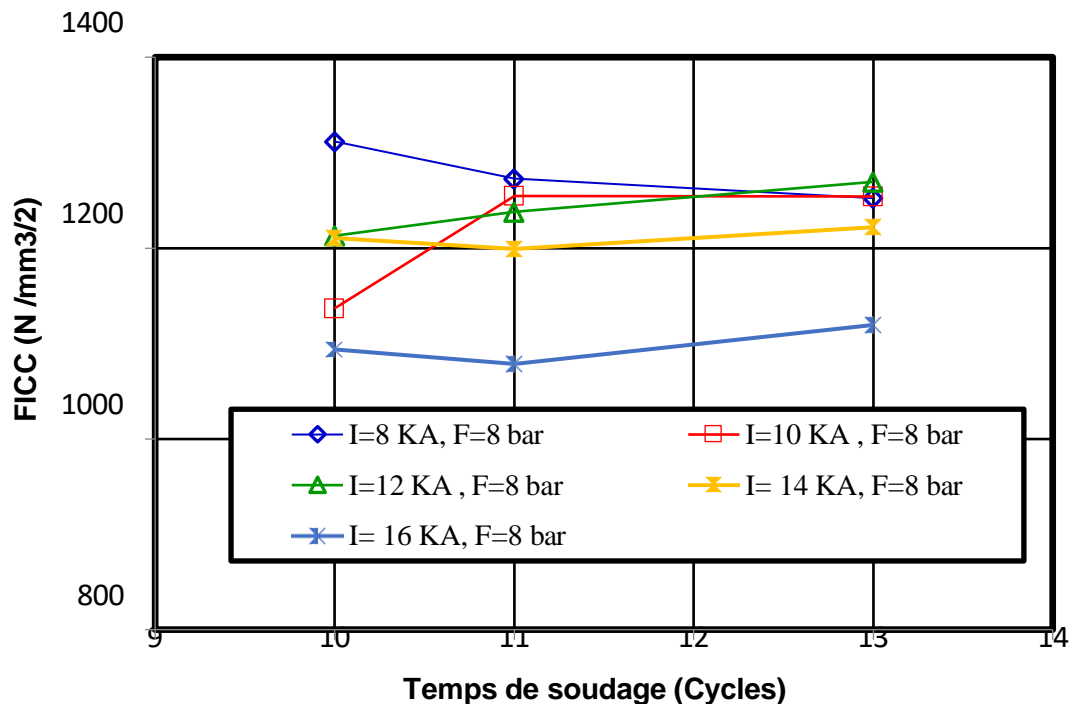


Figure. 14 Effet du temps de soudage sur FICC pour joint par recouvrement pour F=8 bars.

#### V.4 Effet du temps de soudage sur le FICC pour les peels joints

Pour les joints par pelage, les figures 15 et 16 révèlent une différence notable dans le comportement du FICC en fonction du temps de soudage. Sous une force constante de 6 bars (Figure 15), une augmentation du temps de soudage entraîne une réduction du FICC. Cette tendance reflète un affaiblissement progressif du métal de base et une redistribution des contraintes vers la zone de fusion, conduisant à une rupture précoce. La présence de défauts microscopiques, comme des inclusions ou des zones de surfusion, pourrait accentuer cette baisse.

Cependant, avec une force d'électrode de 8 bars (Figure 16), le FICC augmente de manière quasi linéaire avec le temps de soudage. Cette augmentation peut être attribuée à une meilleure liaison métallurgique dans le noyau et à une réduction des zones de concentration de contraintes. Néanmoins, des temps de soudage prolongés pourraient entraîner un épaissement excessif du noyau, augmentant ainsi la susceptibilité à des modes de rupture complexes [5].

## CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

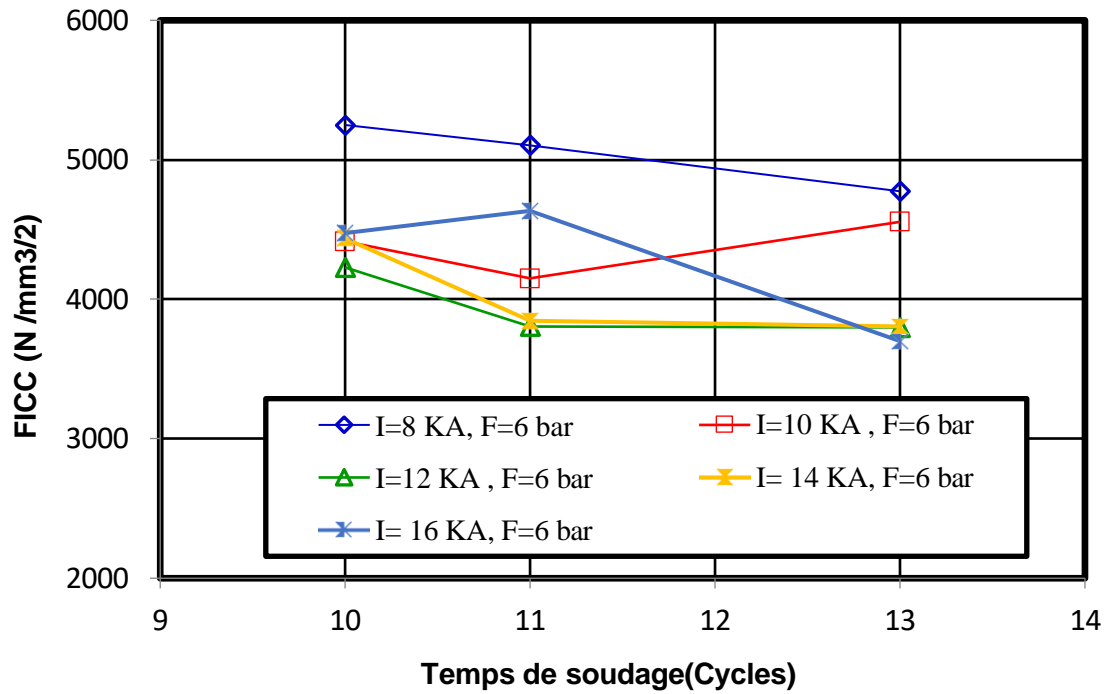


Figure. 15 Effet du temps de soudage sur FICC pour les peels joint pour F=6 bars.

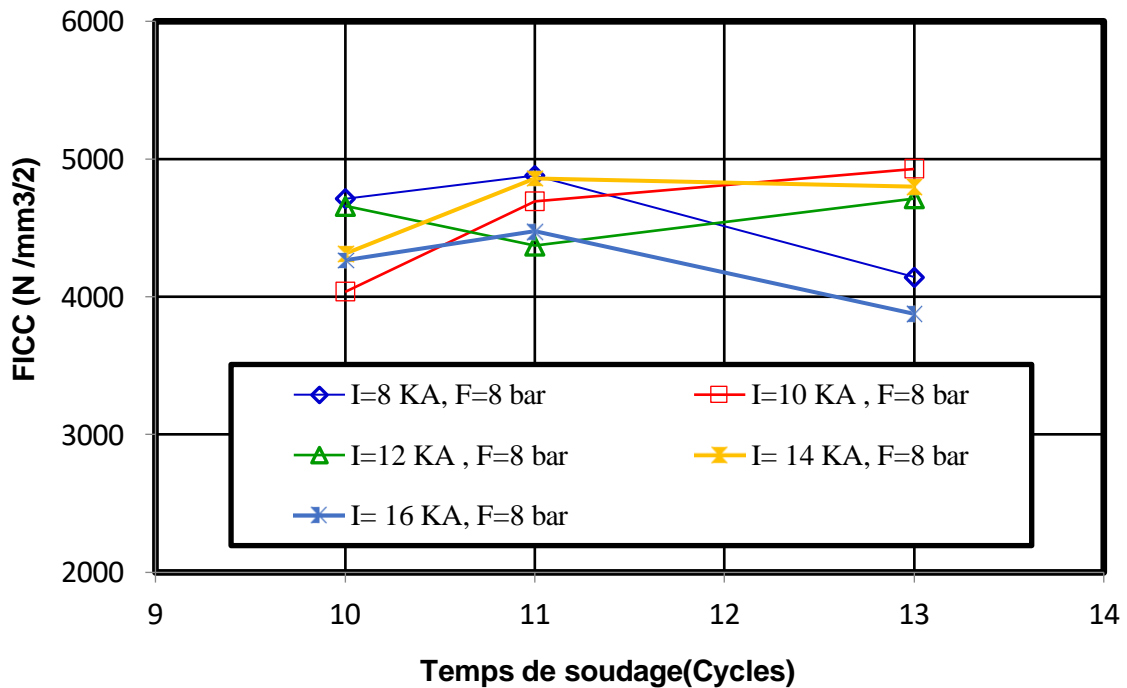


Figure. 16 Effet du temps de soudage sur FIC pour les peels joints pour F=8 bars.

### IV. Mode de rupture

La rupture par déboutonnage prédomine dans notre étude pour l'acier inoxydable 316L soumis à une charge de cisaillement par traction et pelage pour un courant de soudage de 8 KA à 16 KA, un temps de soudage de 10 à 13 cycles et une force d'électrode de 6 et 8 bars, en raison de la résistance et de la dureté élevées inhérentes au matériau, comme le montrent les figures 17, 18, 19, 20, 21 et 22. La microstructure de l'acier inoxydable 316L, en particulier dans la zone affectée thermiquement, influence les propriétés mécaniques de la soudure et sa susceptibilité à la rupture [6]. La charge en pelage impose une combinaison de contraintes de traction et de cisaillement, la composante de traction dépassant souvent la contrainte de cisaillement, ce qui rend la rupture par déboutonnage plus probable [7]. Les facteurs de conception des joints, tels que la longueur de la zone de recouvrement et la préparation de la surface, influencent également l'intégrité de la soudure. Par conséquent, pour obtenir des soudures fiables, il faut accorder une attention méticuleuse aux paramètres de soudage, aux considérations micro-structurelles, aux conditions de chargement et à la conception du joint afin d'atténuer la rupture par déboutonnage et de garantir l'intégrité structurelle du joint soudé [8, 9, 10].



Figure. 17 Déboutonnage de peel joint pour courant de soudage de 8 KA à 16 KA, temps de soudage 10 cycles et force de soudage 8 bars.



Figure. 18 Déboutonnage de peel joint pour courant de soudage de 8 KA a 16 KA, temps de soudage 11cycles et force de soudage 8 bars.



Figure. 19 Déboutonnage de peel joint pour courant de soudage de 8 KA a 16 KA, temps de soudage 13 cycles et force de soudage 8 bars.



Figure. 20 Déboutonnage de joint par recouvrement pour courant de soudage de 8 KA a 16 KA, temps de soudage 10 cycles et force de soudage 8 bars.



Figure. 21 Déboutonnage de joint par recouvrement pour courant de soudage de 8 KA à 16 KA, temps de soudage 11 cycles et force de soudage 8 bars.



Figure. 22 Déboutonnage de joint par recouvrement pour courant de soudage de 8 KA à 16 KA, temps de soudage 13 cycles et force de soudage 8 bars.

## Conclusion

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'impact significatif des paramètres de soudage sur les propriétés mécaniques des joints en acier inoxydable AISI 316L, tant pour les joints par recouvrement que pour les joints par pelage. L'augmentation du courant de soudage a montré une tendance à améliorer la résistance des joints, bien que des courants excessifs puissent entraîner des défauts tels que la surchauffe et la déchirure. De même, le temps de soudage joue un rôle crucial, où une optimisation est nécessaire pour éviter la dégradation de la qualité des joints.

Les analyses des courbes charge-déplacement ont révélé des comportements distincts selon les types de joints, soulignant l'importance de la conception et des paramètres de soudage pour garantir

## CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

l'intégrité structurelle. En outre, l'effet du diamètre du noyau et de la pénétration au niveau du point de soudure a été clairement établi, indiquant que des ajustements précis des paramètres peuvent conduire à des améliorations notables des performances des joints.

L'augmentation du courant de soudage réduit généralement le FICC en raison de la fusion excessive et des défauts, bien qu'un léger bénéfice soit observé à des courants très élevés grâce à une meilleure redistribution des contraintes. Le temps de soudage affecte le FICC différemment selon la force appliquée à 6 bars, il diminue en raison de la dégradation thermique, tandis qu'à 8 bars, il l'améliore par une fusion plus uniforme. Un ajustement précis des paramètres est essentiel pour optimiser la qualité des joints.

Enfin, la compréhension des modes de rupture, notamment la rupture par déboutonnage, est essentielle pour le développement de soudures fiables. Les résultats soulignent la nécessité d'une attention méticuleuse aux conditions de soudage et aux caractéristiques micro-structurelles pour minimiser les risques de défaillance et assurer la durabilité des assemblages soudés.

### REFERENCES

- [1] Chen, X., Liu, Y., Chen, H., Liu, J., Yan, Y., & Zhai, J. (2022). "Effect of welding current and welding time on nugget size in RSW," ICETIS 2022; 7th International Conference on Electronic Technology and Information Science, pp. 1-4. Harbin, China.
- [2] Hayat, F., & Sevim, I. (2012). "The effect of welding parameters on fracture toughness of resistance spot-welded galvanized DP600 automotive steel sheets," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 58, 1043–1050. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3428-x>
- [3] Moslemi, N., Redzuan, N., Ahmad, N., & Hor, T. N. (2015). "Effect of current on characteristic for 316 stainless steel welded joint including microstructure and mechanical properties," Procedia CIRP, 26, 560-564. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.010>
- [4] Mohammed, H. G., Ginta, T. L., & Mustapha, M. (2021). "The investigation of microstructure and mechanical properties of resistance spot welded AISI 316L austenitic stainless steel," Materials Today: Proceedings, 46(4), 1640-1644. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.258>
- [5] Jagadeesha, T. (2017). "Experimental studies in weld nugget strength of resistance spot-welded 316L austenitic stainless steel sheet," International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

## CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

- [6] Babu, N. N., Bhaduri, A. K., & Kamath, S. V. (2005). "Microstructural characterization of resistance spot welds in 316L stainless steel," *Science and Technology of Welding & Joining*, 10(1), 71-77.
- [7] Marashi, S. (2014). "Failure of resistance spot welds: tensile shear versus coach peel loading conditions," *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 246-253.
- [8] Khaleel, M. A., Mudawar, H. A., & Jarrar, M. S. (2005). "Influence of sheet thickness and overlap length on the strength of resistance spot welds," *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 377-385.
- [9] Bahar, A. A., Yusof, M. F. M., Nawi, N. A., & Man, H. C. (2016). "Effect of welding parameters on pull-out strength of resistance spot welded 304L stainless steel sheets," *Materials & Design*, 106, 489-498.
- [10] Pouranvari, M., et al. (2009). "Resistance spot welding of stainless-steel sheets: microstructure and mechanical properties," *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(1-2), 12-17.

# Conclusion générale et perspectives

## Conclusion générale et perspectives

Le soudage par résistance par points (RSW) est une technique essentielle dans l'assemblage des matériaux métalliques, particulièrement dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique. Cette thèse a exploré en profondeur les effets des paramètres de soudage sur les propriétés mécaniques des joints en acier inoxydable AISI 316L, en mettant en lumière l'importance de l'optimisation des conditions de soudage pour garantir la qualité et la durabilité des assemblages.

Les résultats expérimentaux ont démontré que l'augmentation du courant de soudage et du temps de soudage améliore la résistance des joints, bien que des valeurs excessives puissent entraîner des défauts tels que la surchauffe et la déchirure. Les analyses des courbes charge-déplacement ont révélé des comportements distincts selon les types de joints, soulignant l'importance de la conception et des paramètres de soudage pour assurer l'intégrité structurelle.

L'étude de l'effet du courant de soudage sur le FICC montre que l'augmentation du courant tend généralement à réduire la ténacité des joints soudés, aussi bien pour les assemblages par recouvrement que par pelage. Cette diminution est principalement liée à une fusion excessive, à la formation de défauts internes et à des modifications microstructurales dans la zone soudée. Toutefois, à des courants plus élevés, une légère amélioration du FICC peut survenir en raison d'une meilleure redistribution des contraintes dans le noyau de soudure. L'augmentation du temps de soudage réduit le FICC à 6 bars en raison d'une surchauffe dégradant la zone soudée. En revanche, à 8 bars, elle améliore la qualité de la fusion et augmente le FICC. Un équilibre est donc nécessaire pour éviter les effets néfastes d'un apport thermique excessif. Ces résultats soulignent l'importance d'un contrôle précis des paramètres de soudage pour optimiser la performance mécanique des assemblages.

De plus, l'étude a mis en évidence l'impact significatif du diamètre du noyau et de la pénétration au niveau du point de soudure sur les performances des joints. La compréhension des modes de rupture, notamment la rupture par déboutonnage, est cruciale pour le développement de soudures fiables. Les résultats soulignent la nécessité d'une attention méticuleuse aux conditions de soudage et aux caractéristiques micro-structurelles pour minimiser les risques de défaillance et garantir la durabilité des assemblages soudés.

Cette recherche approfondit notre connaissance des processus de soudage et des facteurs influençant l'efficacité des joints, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles innovations dans le secteur du soudage par résistance, analyse des mécanismes de la rupture des joints soudée par points en

alliage légers et joints hétérogènes acier/Al pour applications automobiles.