



Université du Québec
à Rimouski

**Analyse des paramètres opératoires et leur impact sur
les propriétés morphologiques et mécaniques des
cordons de soudure en angle de l'acier inoxydable
301LN - Étude expérimentale et développement d'une
modélisation numérique**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître

par

© THIERRY Adrien, Maîtrise en ingénierie
Université du Québec à Rimouski (UQAR)

mars 2024

Membres du jury :

Xuande Chen, président de jury, Université du Québec à Rimouski
Noureddine Barka, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Hermawan Hendra, examinateur externe, Université Laval

Dépôt initiale le 10 Juin 2024

Dépôt finale le 21 août 2024

UNIVERSITE DE QUEBEC A RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Remerciement

Je tiens d'abord à remercier le professeur Noureddine Barka et Dehghan Shayan, dont leurs expertises et mon permis de me surpasser dans ma réflexion.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée durant les expérimentations. Sans qui se mémoire n'aurai jamais pu voir le jour.

Je tiens également à remercier mes amis qui m'ont beaucoup soutenue durant la rédaction de ce mémoire. Merci a eux qui m'ont permis de décompresser durant ces deux années.

Résumé

Le soudage laser possède de nombreux avantages : un faible impact thermique, une zone affectée thermiquement (ZAT) de faible épaisseur ainsi qu'une grande pénétration. Il permet de souder de nombreux matériaux tels que l'acier inoxydable AISI 301LN avec des mises en position spécifique à ce procédé. Dans ce mémoire le soudage en angle sur deux plaques fines de 301LN est étudié. Cette mise en position est utilisé afin de simuler le comportement des soudures en angle couramment retrouver dans de nombreuses structures

En utilisant la méthode Taguchi, une table d'expérience est conçue permettant d'étudier les effets de la puissance, de la vitesse, le diamètre focal et l'amplitude des oscillations du laser sur le cordon de soudure. L'analyse statistique ANOVA est utilisée pour déterminer l'influence de ces paramètres sur les propriétés de la soudure, permettant la construction de modèles mathématiques.

La morphologie obtenue par attaque chimique est un facteur crucial sur la qualité de la soudure. Afin d'optimiser la pénétration, le diamètre focal doit être minimisé tout en gardant l'équilibre entre la puissance et la vitesse. La microstructure révèle l'apparition de delta-ferrite, spécifique au soudage d'acier inoxydable austénitique. L'étude de la dureté montre que le ZAT est de faible épaisseur, nécessaire pour l'intégrité des joints.

Pour finaliser l'étude, des essais en traction sont effectués. L'utilisation du modèle de Ramberg-Osgood modifié a permis la description d'une loi de comportement des assemblages soudés avec un coefficient de Pearson de 0.997. À partir de ces modèles, l'énergie d'absorption est calculée analytiquement. Elle est inférieure à la valeur expérimentale d'environ 10% ce qui s'explique par la limitation du modèle. Les études statistiques ont montré que pour maximiser le comportement mécanique, la pénétration doit être minimisés et la vitesse comprise entre 3.0 m.min^{-1} et 3.7 m.min^{-1} .

La détermination des paramètres opératoires est un inconvénient majeur du soudage laser. Néanmoins, sa modélisation et résolution numérique permettent de réduire cet intervalle d'étude. L'équation de chaleur est résolue, permettant de déterminer la morphologie du cordon de soudure. Ces caractéristiques sont comparées aux résultats de la première étude, montrant que le modèle manque de précision mais reste une bonne approximation. Ce décalage avec l'expérimentation provient de la négligence de certains phénomènes comme l'écoulement du métal liquide.

Mots clés : 301LN, Soudage laser, Jointure angle, COMSOL, ANOVA, Microstructure, Comportement mécanique

Abstract

Laser welding offers numerous advantages : low thermal impact, a thin heat-affected zone (HAZ), and deep penetration. It enables the welding of various materials such as stainless steel AISI 301LN with specific positioning to this process. This paper focuses on angle welding on two thin plates of 301LN. This setup is used to simulate the behavior of corner welds commonly found in many structures.

Using the Taguchi method, an experimental design table is developed to study the effects of power, speed, focal diameter, and laser oscillation amplitude on the weld bead. ANOVA statistical analysis is employed to determine the influence of these parameters on weld properties, facilitating the construction of a mathematical model. The morphology revealed by chemical etching is crucial for weld quality. To optimize penetration, focal diameter should be minimized while maintaining a balance between power and speed. The microstructure shows the presence of delta-ferrite, characteristic of austenitic stainless steel welding. Hardness analysis indicates a thin HAZ, essential for joint integrity.

To finalize the study, tensile tests are conducted. The use of the modified Ramberg-Osgood model allowed the description of a behavior law for welded assemblies with a Pearson coefficient of 0.997. From these models, the absorption energy is calculated analytically, it is lower than the experimental value by about 10%, which can be explained by the limitations of the model. Statistical studies have shown that to maximize mechanical behavior, penetration must be minimized and the speed should be between 3.0 m.min^{-1} and 3.7 m.min^{-1} . Determining operating parameters is a major challenge in laser welding. However, its modeling and numerical resolution help narrow this study interval. The heat equation is solved to determine weld bead morphology. These characteristics are compared with the results of the initial study, showing that the model lacks precision but remains a good approximation. This deviation from experimental results stems from neglecting certain phenomena such as liquid metal flow.

Keywords : 301LN, Laser welding, edge joint, COMSOL, ANOVA, Microstructure, mechanical behavior

Table des matières

Résumé	IV
Abstract	V
Liste des tableaux	IX
Table des figures	XI
Liste des abréviations, des sigles et des acronymes	XIV
Liste des symboles	XV
Introduction générale	1
1 Contexte et généralités	1
2 Soudage laser	2
2.1 Le procédé de soudage	2
2.2 Types de soudage	2
2.3 Fonctionnement d'un laser	3
2.4 Caractéristique du soudage laser	4
2.5 Configuration du soudage	8
2.6 Oscillation du faisceau laser	9
3 Matériaux	11
3.1 Les aciers inoxydables	11
3.2 AISI 301LN	14
4 Problématique	15
5 Objectifs de l'étude	17
6 Méthodologie	17
6.1 Objectif 1	17
6.2 Objectif 2	18
6.3 Objectif 3	19
7 Organisation du mémoire	20

1	Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.	23
1	Introduction	25
2	Matériel d'expérimentation	28
3	Résultat et discussion	31
3.1	Microstructure	31
3.2	Pénétration	34
3.3	Largeur des soudures	37
3.4	Surface de la soudure	41
3.5	Composition chimique	44
3.6	Microdureté	45
4	Conclusion	54
2	Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN	59
1	Introduction	61
2	Méthodologie	62
3	Résultats et Discussion	65
3.1	Comportement générale des soudures	65
3.2	Pente à l'origine	66
3.3	Limite élastique	69
3.4	Limite en traction	72
3.5	Allongement à la rupture	74
3.6	Énergie d'absorption	77
3.7	Modèle de Ramberg Osgood	79
4	Conclusion	82
3	Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser	86
1	Introduction	88
2	Modélisation	90
2.1	Description	90
2.2	Matériau	90
2.3	Physique	97
2.4	Estimateur statistique	102
2.5	Calcul de la morphologie du cordon	102
3	Résultat et discussion	103
3.1	Morphologie du cordon de soudure	103
3.2	Pénétration	104
3.3	Largeur de la soudure	107
3.4	Surface de la zone de soudure	109
4	Conclusion	112

Conclusion générale	117
Annexe	120

Liste des tableaux

1	Composition chimique des différents types d'acier inoxydable [13]	11
2	Composition chimique de l'acier AISI 301LN [14]	14
3	Propriétés mécaniques [14]	14
1.1	Composition chimique de l'acier AISI 301LN à partir de la base de donnée MakeltFrom	28
1.2	Propriétés mécaniques de l'acier AISI 301LN à partir de la base de donnée MakeltFrom	29
1.3	Paramètres opératoires	30
1.4	Paramètres des essais	30
1.5	Valeur du ratio d'austénite et de ferrite pour chaque soudure	33
1.6	Valeur de la pénétration de chaque cordon de soudure	34
1.7	Estimateur statistique du modèle de la pénétration	35
1.8	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la pénétration	37
1.9	Valeur de la largeur des soudures	38
1.10	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la largeur de la soudures	39
1.11	Valeur des surfaces mesurées	41
1.12	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la surface	42
1.13	Valeur des rapports	44
1.14	Valeur mesurée de la dureté de chaque cordon de soudure	46
1.15	Résultat de l'étude anova pour la modélisation de la valeur moyenne de la dureté dans le cordon de soudure	47
1.16	Estimateur statistique du modèle pour la valeur moyenne de la dureté	47
1.17	Valeur mesurée de la taille de la ZAT de chaque cordon de soudure	51
1.18	Résultat de l'étude anova pour la modélisation de la taille de la ZAT	51
1.19	Récapitulatif du modèle de la taille de la ZAT	51
2.1	Composition chimique à partir de la base de donnée MakeltFrom	63
2.2	Propriétés mécaniques, [18]	63
2.3	Paramètres opératoires	64
2.4	Paramètres des essais	65
2.5	Évaluation de la pente à l'origine pour chaque couple de paramètre	67

2.6	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation pour la pente à l'origine	67
2.7	Estimateur statistique du modèle de la pente à l'origine	67
2.8	Évaluation de la limite élastique pour chaque couple de paramètre	69
2.9	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la limite élastique	70
2.10	Écart relatif entre le modèle ANOVA et les valeurs numériques pour f_y	71
2.11	Évaluation de la limite en traction pour chaque couple de paramètre	72
2.12	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la limite en traction	73
2.13	Évaluation de l'allongement à la rupture pour chaque couple de paramètre	74
2.14	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de l'allongement avant rupture	75
2.15	Écart relatif entre le modèle ANOVA et les valeurs numériques pour $A\%$	76
2.16	Évaluation de l'énergie d'absorption pour chaque couple de paramètre	77
2.17	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de l'énergie d'absorption	78
2.18	Écart relatif entre le modèle ANOVA et les valeurs numériques pour U	79
2.19	Écart relatif entre le modèle analytique et les valeurs numériques pour U	82
3.1	Propriété thermique d'après la base de donnée MakeltFrom	91
3.2	Composition chimique d'après la base de donnée MakeltFrom	91
3.3	Valeur de la capacité thermique pour le fer , le chrome et le nickel liquide [26]	92
3.4	Valeur de la pression saturante en fonction de la température pour le fer , le chrome et le nickel [26]	94
3.5	Valeur de la masse volumique en fonction de la température pour le fer , le chrome et le nickel [26]	96
3.6	Paramètres opératoires	101
3.7	Paramètres des essais	101
3.8	Mesure de la pénétration	104
3.9	Résultat des estimateurs statistiques	105
3.10	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la pénétration	106
3.11	Mesure de la largeur de la soudure	107
3.12	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la largeur	109
3.13	Résultat des estimateurs statistiques pour la largeur de la soudure	109
3.14	Valeur des surfaces mesurée	110
3.15	Résultat des estimateurs statistiques pour la surface de la soudure	111
3.16	Valeur des rapports	111
3.17	Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la surface	111

Table des figures

1	Famille des procédés de soudage	3
2	Schéma d'un laser à fibre [6]	4
3	Principaux phénomènes du soudage laser [7]	5
4	Évolution du coefficient d'absorption pour des métaux comme l'acier ou l'aluminium [7]	5
5	Évolution de la pénétration en fonction de la puissance [7]	6
6	Variation de la pénétration en fonction de la vitesse pour des puissances différentes [8]	7
7	Évolution de la pénétration en fonction de la vitesse pour des diamètres focaux différents [8]	7
8	Évolution de la pénétration en fonction de l'écartement à la distance focale [10]	8
9	Différente mise en position	8
10	Schéma de la mise en position	9
11	Évolution de l'état de surface en fonction de la fréquence et de l'amplitude [12]	10
12	Évolution de la morphologie de la soudure en fonction de la fréquence et de l'amplitude [12]	10
13	Évolution de la pénétration en fonction de la fréquence et de l'amplitude des oscillations [12]	11
14	Loi de comportement pour différents type d'acier [13]	12
15	Micrographie de l'acier AISI 301LN SS [15]	15
1.1	Pseudo diagramme de phase binaire de Cr-Ni pour 70% de Fer,[9]	26
1.2	Robot 6 axes utilisé pour les soudures	29
1.3	Représentation schématique de la configuration du soudage	29
1.4	Schéma de la position des mesure pour la micro-dureté	31
1.5	Macrostructure de la soudure avec un agrandissement de X5	32
1.6	Microstrucutre de la soudure	33
1.7	Variation de la pénétration en fonction des paramètres opératoires	36
1.8	Variation de la pénétration en fonction des paramètres opératoires	36

1.9	Graphiques de contours pour la pénétration en fonction des paramètres opératoires	38
1.10	Influence des paramètres de l'amplitude et du diamètre focal sur la largeur de la soudure	40
1.11	Graphique de contour de l'amplitude et du diamètre focal pour l'épaisseur	41
1.12	Influence des paramètres sur la surface	43
1.13	Diagramme d'interaction de l'amplitude et du diamètre focale	43
1.14	Évolution des éléments chimiques le long de la ligne	44
1.15	Courbes pour l'essai 1	45
1.16	Moyenne de la dureté en fonction de l'éloignement du bord de l'essai 1	46
1.17	Variation de la dureté en fonction des paramètres opératoires	48
1.18	Diagramme d'interaction pour la dureté	49
1.19	Graphiques de contours pour la dureté en fonction des paramètres opératoires	50
1.20	Variation de l'épaisseur de la ZAT en fonction des paramètres opératoires	52
1.21	Graphiques de contours pour l'épaisseur de la ZAT en fonction des paramètres opératoires	53
2.1	Bras robotique utilisé durant les essais	63
2.2	Coupe de la mise en position	64
2.3	Comparaison de la courbe moyenne des essais en traction	66
2.4	a) Influence de la puissance et de la vitesse sur la pente à l'origine, b) Diagramme d'interaction entre la puissance et la vitesse	68
2.5	Graphique de contour de la pente à l'origine en fonction de la puissance et de la vitesse	69
2.6	a) Influence de la puissance et de la vitesse sur la limite élastique, b) Diagramme d'interaction pour la limite élastique	71
2.7	Graphique de contour pour la limite élastique	72
2.8	a) Influence de la puissance et de la vitesse sur la limite en traction f_U , b) Diagramme d'interaction pour la limite en traction f_U	73
2.9	Graphique de contour de la limite élastique en fonction de la puissance et de la vitesse	74
2.10	a) Influence de la puissance et de la vitesse sur l'allongement avant la rupture , b) Diagramme d'interaction pour l'allongement avant la rupture	76
2.11	Graphique de contours pour l'allongement avant rupture en fonction de la puissance et de la vitesse	77
2.12	a) Influence de la puissance et de la vitesse sur l'allongement avant la rupture , b) Diagramme d'interaction pour l'allongement avant la rupture	79
2.13	Graphique de contour de l'énergie d'absorption en fonction de la puissance et de la vitesse	80
2.14	a) Modélisation de l'essai 3.2, b) 4.1	80
3.1	Schéma de la mise en position	90

Table des figures

3.2	Évolution de la capacité thermique et de l'enthalpie en fonction de la température	92
3.3	Évolution de l'entropie en fonction de la température	93
3.4	Valeur de la pression saturante (atm) du 301Ln en fonction de la température (K)	94
3.5	Évolution de la masse volumique en fonction de la température	95
3.6	Évolution de la conductivité thermique en fonction de la température . . .	97
3.7	Évolution des coefficients de présence de chaque phase en fonction de la température	98
3.8	Schéma de la distribution de puissance du laser	99
3.9	Définition des repères	99
3.10	Convergence du maillage	100
3.11	Maillage final	101
3.12	Comparaison de la zone de soudure entre la simulation et l'expérience . . .	103
3.14	Influence des paramètres opératoires sur la pénétration calculée	106
3.15	Comparaison de la contribution des paramètres opératoires entre la simulation et l'expérience	107
3.16	Largeur de la soudure mesurée et simulée pour chaque essai	108
3.17	Écart relatif de la largeur de la soudure pour chaque essai	108
3.18	Contribution des paramètres opératoires sur la largeur de la soudure	110
3.19	Variation de la surface mesurée et simulée en fonction des essais	110
3.20	Contribution des paramètres opératoires sur la surface de la soudure	112
3.21	Cartographie de la dureté pour chaque essais	120
3.22	Cartographie de la dureté pour chaque essais	121

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

Abréviation	Nom
DOE	Plan d'expérience
ANOVA	Analyse de variance
SS	Acier inoxydable
AISI	American Iron and Steel Institute
ZAT	Zone affecté thermiquement
CCHST	Centre canadien d'hygiène et sécurité du travail
CW	Laser continue
PW	Laser pulsé
Nd :YAG	Neodymium-doped yttrium aluminum garnet ; Nd :Y3Al5O12
TIG	Tungsten Inert Gas
C	Carbone
Cr	Chrome
Ni	Nickel
Mo	Molybdène
Mn	Manganèse
Cu	Cuivre
N	Azote
Mg	Magnésium
Si	Silicium
P	Phosphore
S	Souffre
δ	Ferrite
γ	Austénite
α'	Martensite
L	Phase liquide
DI	Degré de liberté
Sc séq	Somme carré séquentielle
Sc adj	Somme carré ajusté
Cm adj	Moyenne quadratique ajusté
Hv	Unité de la dureté de Vicker
HRC	Unité de la dureté Rockwell
R^2	Corrélation de Pearson
MAE	Erreur moyenne absolu
MAPE	Erreur moyenne absolue en pourcentage
MRSE	L'erreur moyenne quadratique
RMRSE	Erreur relative moyenne quadratique

Liste des symboles

Symbole	Nom	Unité
T	Température	K
Cr_{eq}	Taux de Chrome équivalent	%
Ni_{eq}	Taux de Nickel équivalent	%
E	Module d'Young	GPa
σ	Contrainte	MPa
ϵ	Déformation	$mm.mm^{-1}$
f_u	Résistance à la traction	MPa
f_y	Limite élastique	MPa
$R_{0,01}$	Limite élastique à 0.01 %	MPa
A%	Élongation à la rupture	%
d	Taille de grain	mm
P	Puissance	kW
V	Vitesse	$m.min^{-1}$
A	Amplitude	mm
D	Diamètre focal	mm
T_f	Température de fusion	K
L_f	Chaleur latente de fusion	$J.g^{-1}$
H_T^o	Enthalpie à la température T	J
C_{ps}	Capacité thermique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
s_T^o	Entropie pour la température T	$J.K^{-1}$
P_{sat}	Pression de vapeur saturante	atm
ρ	Masse volumique	$kg.mm^{-3}$
k	Conductivité thermique	$W.cm^{-1}$
K	Kelvin	
mm	Millimètre	
GPa	Gigapascal	
MPa	Mégapascal	
kW	Kilowatt	
g	Gramme	
kg	Kilogramme	
J	Joule	
W	Watt	
∇	Opérateur gradient	
∇^2	Opérateur Laplacien	
θ_s	Phase solide	
θ_l	Phase liquide	

Introduction générale

1 Contexte et généralités

Le laser, acronyme de "*light amplification by stimulated emission of radiation*," est un mécanisme permettant de générer une onde électromagnétique ayant une fréquence comprise entre les ultraviolets et les infrarouges. À partir de ce mécanisme, Maiman (1960) [1] fabriqua la première source laser en utilisant une lampe à rubis émettant une radiation de longueur d'onde de 692,9 nm et 694,3 nm. Cette prouesse technologique fut possible grâce à la publication sur le laser théorique de Charles Townes et Arthur L. Schawlow de 1958 [2]. Dans la même décennie, plusieurs autres sources de laser ont été fabriquées, dont des lasers qui sont encore utilisés de nos jours, telles que le Nd :YAG ou le laser CO₂.

Le laser est une source de radiation électromagnétique monochromatique. Ces propriétés sont indispensables à la création d'une source laser. C'est après la démonstration de Maiman en 1960 que l'industrie du laser vit le jour. Depuis ce jour, elle n'a fait que croître ; en 2019, le revenu lié à cette industrie était de 4,9 milliards de dollars [3]. Le soudage laser représente environ 18% du revenu. Cette technologie a l'avantage d'être facilement automatisée et robotisée, ce qui rend ses applications dans un cadre industriel facile. En effet, elle se retrouve dans les productions de masse de secteurs tels que l'automobile, l'aéronautique, l'électronique [4]. De plus, elle peut être informatisée, ce qui lui donne la propriété d'être hautement répétable.

Les plans d'expériences (DOE) et les méthodes statistiques ont largement montré leurs efficacités [5]. Dans cette étude les paramètres opératoires du laser seront optimisés afin de maximiser le comportement mécanique de la soudure ; essai en traction, dureté. Afin de réduire le nombre d'essais la méthode Taguchi est utilisée. Pour l'ensemble des études présentes dans le mémoire la table L_9 est utilisée. Elle est construite pour l'étude des chapitres 1 et 3 à partir de quatre paramètres à trois niveaux et pour l'étude du chapitre 2, à partir de deux paramètres à trois niveaux.

La première étude, utilisera comme paramètre opératoire ; la puissance, la vitesse, le diamètre focal ainsi que l'amplitude de l'oscillation du laser. Cette étude aura pour objectif de quantifier l'influence de ces paramètres opératoires sur la morphologie de la soudure ainsi que sur sa dureté. Pour la seconde étude, les résultats de la première seront utilisés afin de sélectionner une valeur du diamètre focale et de l'amplitude. Elle aura pour objectif de connaître l'influence de la puissance et de la vitesse sur la résistance en traction d'une

soudure d'angle. Finalement la dernière étude proposera un modèle de simulation numérique, les résultats obtenus seront comparés à ceux de la première étude afin de valider la robustesse du modèle.

Ce mémoire commence par une définition du soudage ainsi d'un aperçu sur la diversité de ce procédé. Pour ensuite expliquer le fonctionnement d'un laser et son utilisation dans le cadre du soudage. Le principe et les caractéristiques du soudage laser seront expliqués afin de familiariser le lecteur avec celui-ci. Une petite revue de littérature sur l'influence des paramètres opératoires sur des mises en position bout à bout et par recouvrement est effectuée. Pour finir un rappel sur les aciers inoxydables, et un descriptif de l'acier AISI 301LN SS est alors présenté.

2 Soudage laser

2.1 Le procédé de soudage

C'est un procédé permettant d'assembler des objets métalliques de composition chimique plus ou moins différente de façon permanente. Pour cela, les différents corps sont échauffés à très haute température afin de faire entrer en fusion la jointure entre les différents corps, le refroidissement de celle-ci crée une jointure permanente. C'est le procédé le plus couramment utilisé dans l'industrie pour assembler des parties métalliques. Cependant, la plupart du temps, un métal d'apport est utilisé pour augmenter la quantité de métal en fusion au niveau de la jointure.

2.2 Types de soudage

D'après le Centre canadien d'hygiène et sécurité du travail (CCHST), il existe plus de 70 procédés de soudage différents. La principale différence est l'origine de la source de chaleur. Des exemples de procédé de soudage sont présentés sur la figure 1. Le soudage laser est le procédé étudié, utilisant un faisceau à haute énergie comme source de chaleur, le classant comme un procédé d'assemblage avancé. Le soudage laser permet de bien contrôler l'apport en chaleur, le rendant polyvalent. En effet, il peut souder des plaques fines de 0,01 mm jusqu'à des plaques de plusieurs dizaines de millimètres d'épaisseur. Il est considéré comme un procédé à haute vitesse, précis et facilement automatisable, augmentant grandement sa popularité ces dernières années dans le milieu industriel. Cependant, afin d'appliquer correctement le soudage laser continu ou pulser (CW et PW), il est nécessaire d'effectuer des études préalables sur chaque nouveau matériau pour connaître les interactions matière/laser.

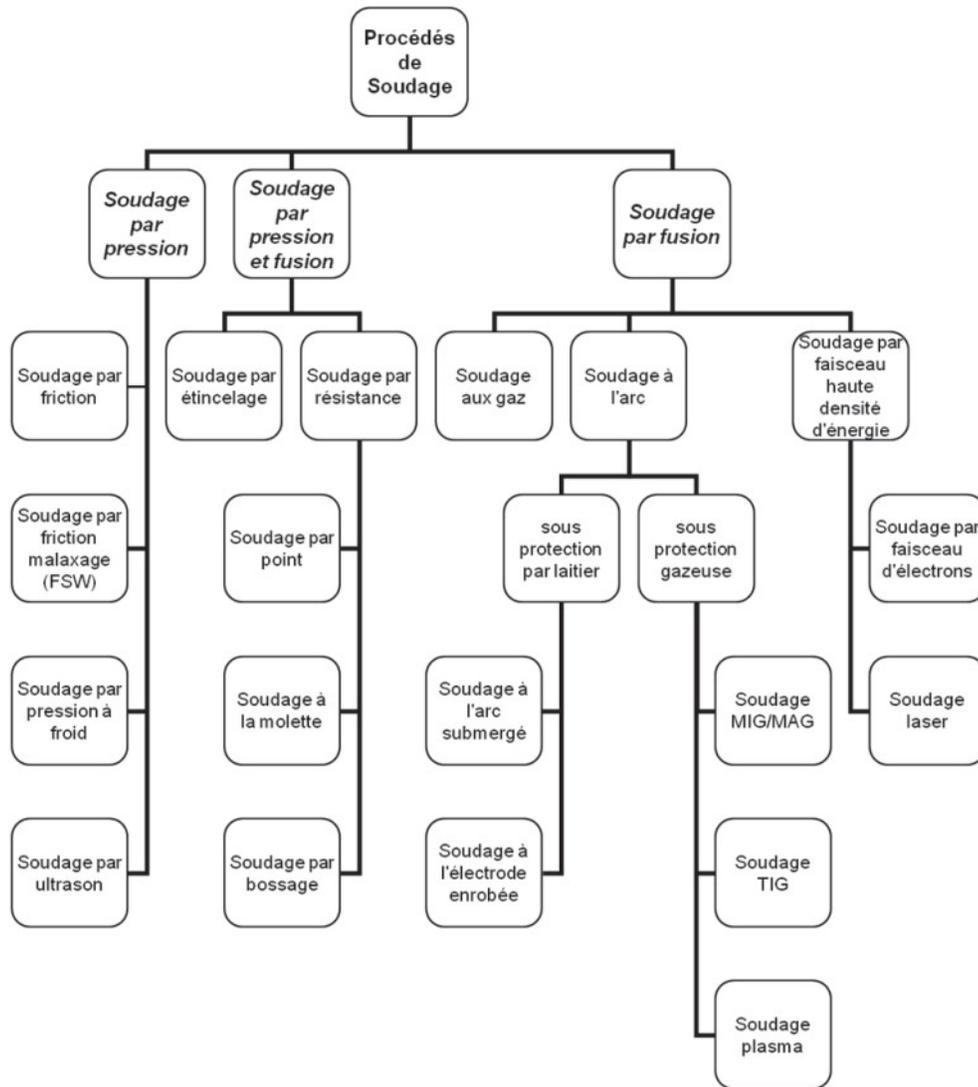


Figure 1 – Famille des procédés de soudage

2.3 Fonctionnement d'un laser

Le laser repose sur des principes quantiques. À l'échelle des atomes, l'énergie de la matière est quantifiée. À l'équilibre, chaque élément se trouve dans son état fondamental, noté E_1 , dont la valeur dépend de l'élément étudié. Il est possible de faire passer un atome d'un état E_i à un état E_{i+1} ($E_{i+1} > E_i$) en lui faisant absorber un photon de fréquence ν données par l'équation 1.

$$\nu = \frac{E_{i+1} - E_i}{h} \quad (1)$$

Où h la constante de Planck ($= 6,63 \times 10^{-34}$ J.s). Lorsqu'un atome est excité dans un état E_{i+1} , il peut se désexciter vers un état E_i et émettre un photon de fréquence ν . On appelle ces phénomènes l'absorption et l'émission spontanée d'un photon. Cependant, A. Einstein

démontra en 1917 qu'il existe un troisième phénomène appelé l'émission stimulée. Si un atome se trouvant dans un état E_{i+1} reçoit un photon de fréquence ν , alors l'atome se désexcite vers un état E_i et émet un photon possédant les mêmes caractéristiques que le photon reçu. Ce phénomène permet donc d'augmenter la population de photons. Le laser se base sur ce principe. À l'équilibre thermodynamique, il n'est pas possible d'augmenter la population des photons, car l'ensemble des atomes se trouvent dans leurs états fondamentaux. Il est nécessaire d'appliquer une inversion de population, pour cela une source externe est utilisée pour exciter les atomes du milieu amplificateur.

En pratique, le système d'un laser peut être décomposé en trois parties. Le milieu actif permettant de définir la longueur d'onde du laser. Ce milieu est composé d'atomes excités par une source extérieure qui permet d'augmenter la population d'électrons. Il existe de nombreux milieux actifs, mais dans le cas de notre étude, un cristal Nd :YAG est utilisé. La source d'énergie est l'élément permettant d'exciter les atomes qui composent le milieu actif. Dans cette étude une diode laser est utilisée comme source externe. Enfin, le résonateur optique est généralement composé de deux miroirs, l'un réfléchissant 100% des rayons entrants et l'autre laissant une très petite partie traverser, formant ainsi le faisceau sortant du laser. La figure 2 schématise les différents composant d'un laser.

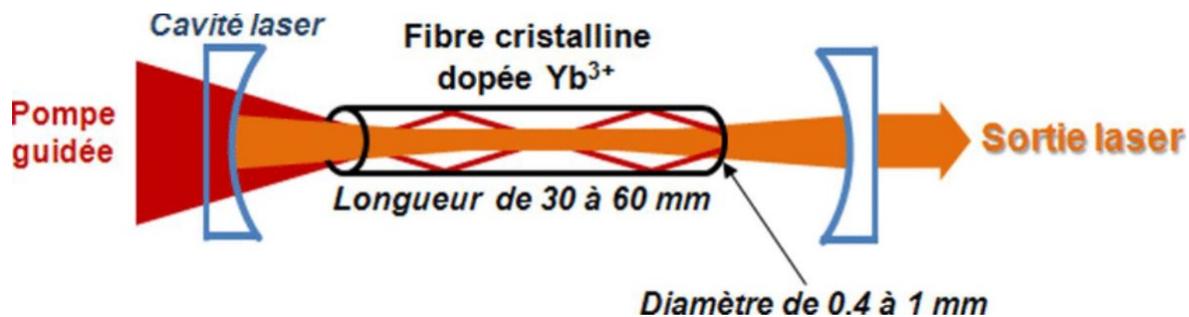


Figure 2 – Schéma d'un laser à fibre [6]

2.4 Caractéristique du soudage laser

Les phénomènes rencontrés durant le soudage laser sont complexes, en effet cela fait appel à la fois à la mécanique des fluides et à la thermodynamique. La figure 3 montre les différents mécanismes rencontrés pendant le soudage laser. Il existe deux modes de soudure pour le soudage laser : par conduction thermique ou par 'Keyhole'. On appelle, soudage par 'Keyhole, lorsqu'un métal est irradié avec un faisceau à haute énergie provoquant l'apparition d'une cavité engendrée par la pression de vapeur de saturant provenant de la vaporisation du métal. Comme le laser se réfléchit sur les différentes parois de la cavité, augmentant le flux thermique tout en agrandissant la taille de celle-ci. Il est considéré comme un procédé d'assemblage efficace. L'absorption de l'énergie du laser par le matériau solide varie très peu avec la température mais à partir de la température de fusion et celle-ci augmente considérablement [7]. La figure 4 montre l'évolution de l'absorption de la température et de l'état de surface de métaux comme l'acier et l'aluminium.

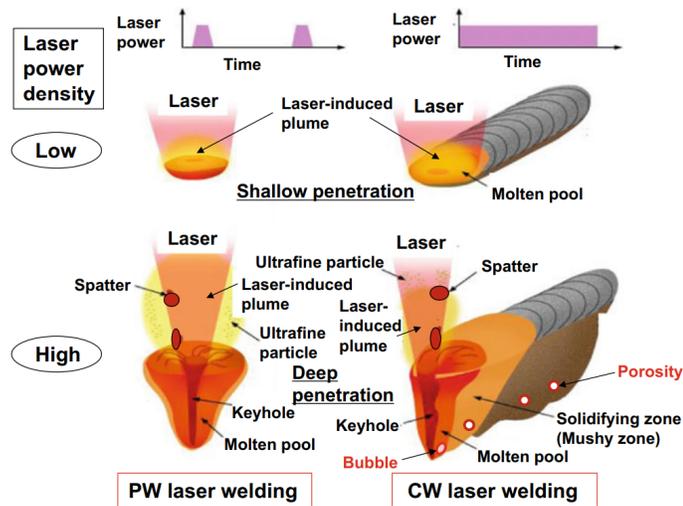


Figure 3 – Principaux phénomènes du soudage laser [7]

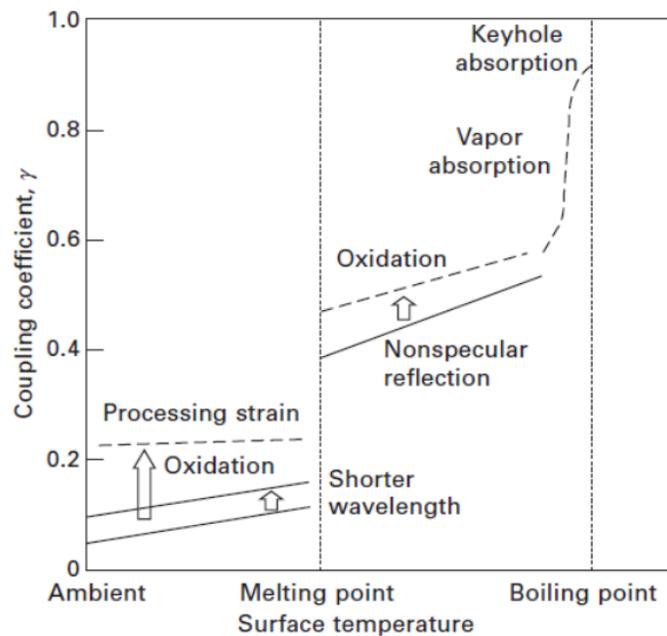


Figure 4 – Évolution du coefficient d'absorption pour des métaux comme l'acier ou l'aluminium [7]

Ce procédé possède à la fois une bonne tolérance dimensionnelle ainsi qu'une grande productivité ce qui en fait un excellent procédé utilisé dans de nombreuses applications. C'est un processus propre et silencieux, principalement dû à la haute énergie de la source de chaleur, de l'ordre du MW.cm^{-2} . Cette particularité entraîne une faible épaisseur de la zone affectée thermiquement (ZAT) et une vitesse de refroidissement rapide. La forte localité de la source

de chaleur engendre une zone échauffée de faible inertie thermique. Ces propriétés donnent au cordon de soudure une forte vitesse de refroidissement. Cela permet d'expliquer l'origine de la faible épaisseur de la ZAT. Également limite la dilatation du métal et engendre une faible déformation durant le procédé. Cependant une source laser peut-être paramétrée de plein de façons différentes et chacun des paramètres a une influence sur la soudure finale. La puissance est directement liée à la pénétration. Plus elle est élevée, plus la pénétration le sera.

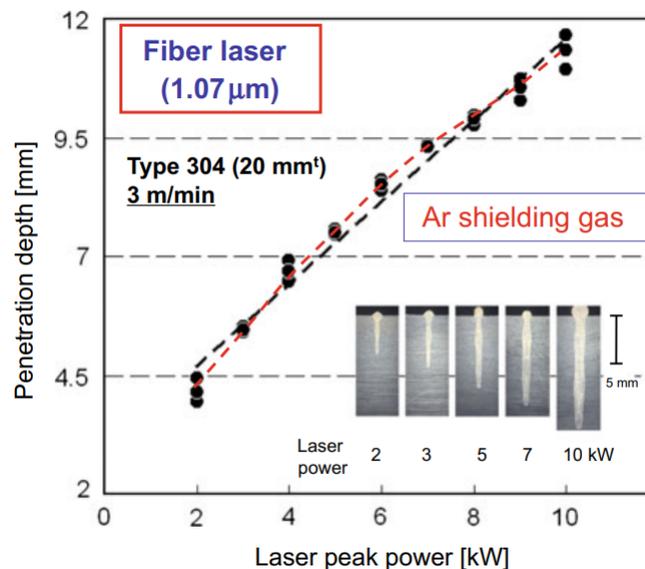


Figure 5 – Évolution de la pénétration en fonction de la puissance [7]

La figure 5 montre l'influence de la puissance du laser sur la pénétration de l'acier inoxydable 304. Il est clair que plus la puissance augmente, plus la pénétration sera grande [7]. Cela signifie que pour la plupart des soudures effectuées dans le cadre industriel, il existe une puissance permettant d'obtenir une pénétration totale. Cependant la puissance n'est pas le seul paramètre pouvant influencer sur la morphologie de la surface, en effet la vitesse de déplacement du laser est aussi un facteur important. Celui-ci modifie le temps de contact entre le laser et la matière. Lorsque la vitesse augmente la pénétration diminue. La figure 6 montre comment la puissance influence la pénétration mais également l'importance de bien choisir le paramètre de vitesse. Néanmoins en fonction de l'épaisseur à souder la vitesse peut varier de $10 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ à $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ce qui en fait un procédé rapide. Celui-ci est jusqu'à deux fois plus rapide que du soudage au plasma et huit fois plus rapide que le soudage TIG [9]. Il est aussi possible de jouer sur la taille du laser. En fonction des sources utilisées celui-ci peut varier de 0.2 mm à 13 mm. Cependant dans le cas du soudage laser, de faibles diamètres focaux sont utilisés. La figure 7 permet de montrer que l'augmentation du diamètre focale, fait diminuer la pénétration. En effet en augmentant celui-ci, la densité d'énergie transmise est réduite, diminuant ainsi la pénétration.

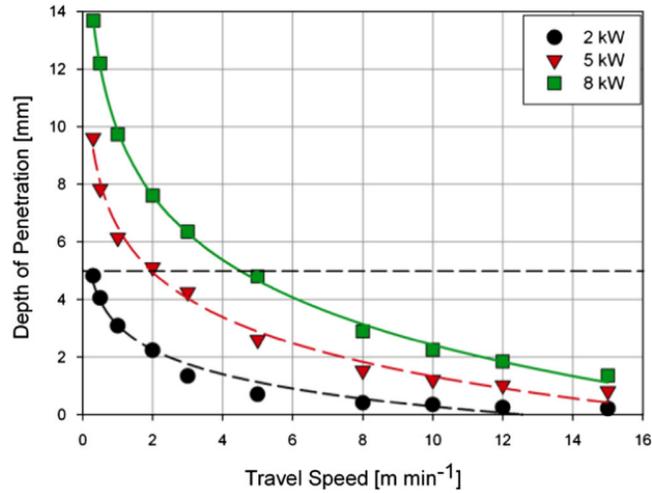


Figure 6 – Variation de la pénétration en fonction de la vitesse pour des puissances différentes [8]

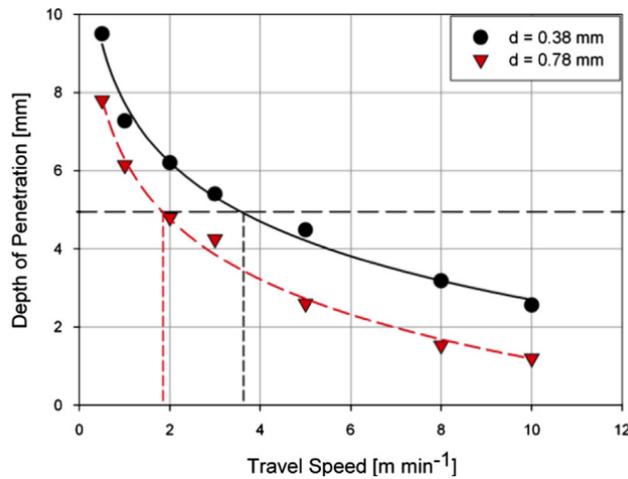


Figure 7 – Évolution de la pénétration en fonction de la vitesse pour des diamètres focaux différents [8]

Finalement le dernier paramètre qui peut être modifié est la distance focale. La figure 8 permet de mettre en évidence l'influence de la modification de la distance du laser par rapport à sa distance focale. Globalement, plus le laser est éloigné de sa position focale et moins la pénétration est élevée. En effet s'y éloigner revient à réduire la quantité d'énergie transmise au matériau en augmentant la dispersion du faisceau [10].

Néanmoins ce procédé n'est pas parfait, possédant quelques inconvénients, le faible rapport $\frac{\text{Pénétration}}{\text{Largeur}}$ de la soudure favorise l'apparition de fissures pendant le refroidissement [7]. La faible taille du faisceau laser permet d'effectuer des traitements thermiques localisés sur les aciers, cependant cette méthode est sensible au tolérancement dimensionnel et demande un montage précis.

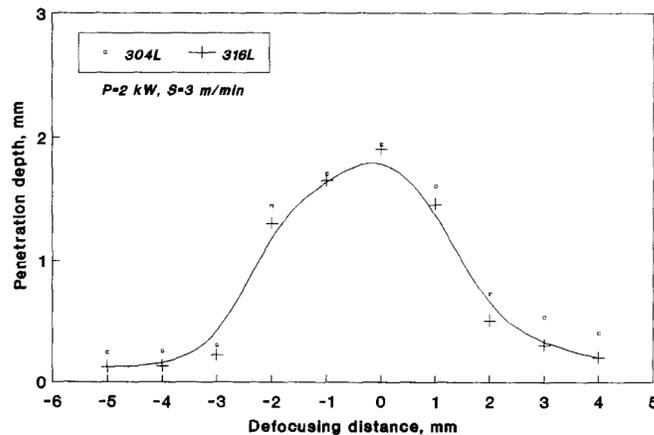


Figure 8 – Évolution de la pénétration en fonction de l'écartement à la distance focale [10]

C'est aussi un procédé coûteux même si les prix commencent à diminuer, cela devrait augmenter le nombre d'entreprises utilisant ce procédé. Là, où le soudage laser devient intéressant est qu'il permet de souder des matériaux demandant un faible apport en chaleur comme les aciers inoxydables ou les composants électroniques [9].

2.5 Configuration du soudage

Il existe différentes mises en position, comme le montre la figure 9. Dans le cas du soudage à l'arc, il est courant de souder des plaques ayant eu un travail sur les bords ou des joints en T. Cependant pour le soudage laser, les mises en positions les plus couramment utilisées sont le bout à bout ou par recouvrement. Choisir le type de jointure est extrêmement important, en effet celle-ci peut avoir un rôle majeur sur la qualité de la soudure que ça soit au niveau de sa morphologie ou de sa résistance.

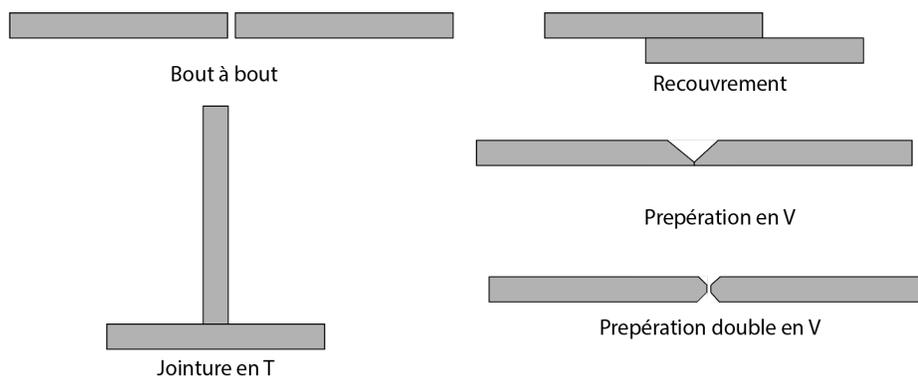


Figure 9 – Différente mise en position

Néanmoins dans le cadre de ce mémoire une mise en position particulière sera étudiée. En effet, de nombreux travaux portant sur le soudage laser se focaliser simplement sur le bout

à bout ou sur le recouvrement. Cependant dans l'industrie, il est courant de rencontrer des mises en position d'angle, c'est pour cela, que se mémoire étudiera le comportement du soudage laser sur la mise en position décrite par la figure 10.

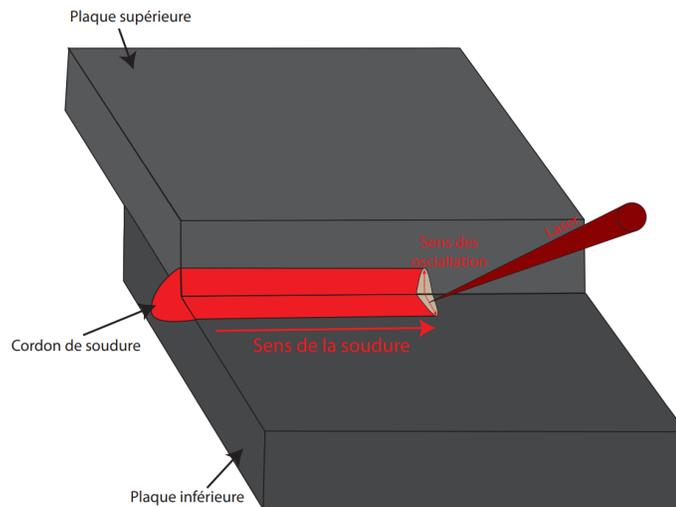


Figure 10 – Schéma de la mise en position

Au lieu de souder les deux plaques par le dessus comme il est fait habituellement dans le cas d'une soudure par recouvrement, la source de chaleur arrivera avec une inclinaison proche de 45° au niveau de l'angle entre les deux plaques afin de les souder sur la jointure.

2.6 Oscillation du faisceau laser

Afin de remédier au problème de la faible largeur de la soudure des chercheurs ont pensé qu'élargir la surface échauffée permettrait d'améliorer la résistance de la soudure ainsi que sa qualité. En effet ils ont pensés à l'aide d'un système de balayage optique faire osciller le faisceau laser, afin d'augmenter la surface de contact entre le laser et la matière [11]. Le cas d'oscillations triangulaire, a été étudié par Hao et al [12] afin de mieux comprendre l'effet de la fréquence et de l'amplitude sur la morphologie de la soudure. La figure 11 permet de mettre en évidence l'influence de l'oscillation du faisceau laser sur la surface des plaques soudées. Lorsque la fréquence est faible, il est facile de distinguer le mouvement du faisceau, néanmoins l'augmentation de la fréquence permet de lisser la soudure afin de la faire ressembler à une soudure sans les oscillations. Ce lissage est plus difficile à réaliser lorsque l'amplitude est grande.

Également l'état de surface de la soudure n'est pas le seul élément à être impacté, sa morphologie l'est aussi. La figure 12 montre les morphologies des soudures obtenues pour différentes fréquences et amplitudes. L'augmentation de l'amplitude fait diminuer la pénétration et augmente la largeur de la soudure. L'augmentation de la fréquence réduit fortement la pénétration. La figure 13 montre avec plus de détail les effets de la fréquence et de l'amplitude sur la pénétration.

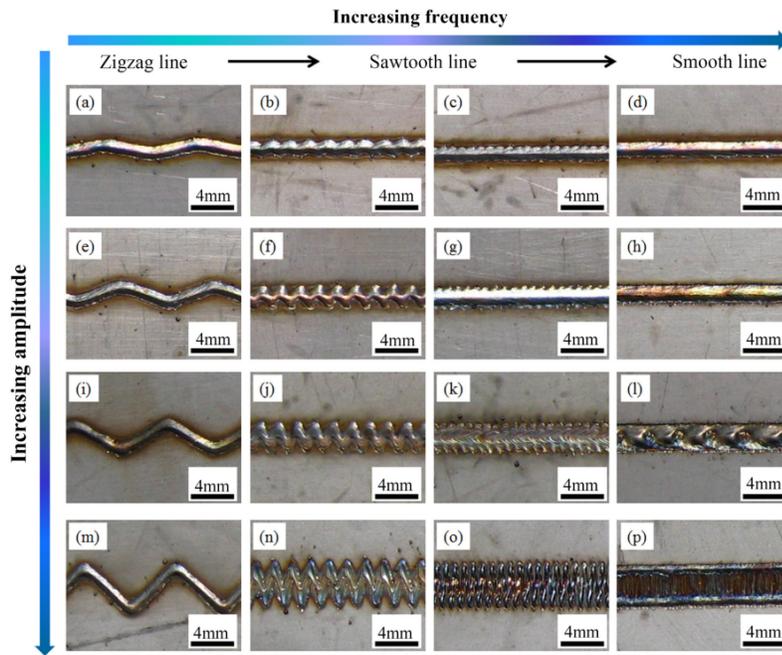


Figure 11 – Évolution de l'état de surface en fonction de la fréquence et de l'amplitude [12]

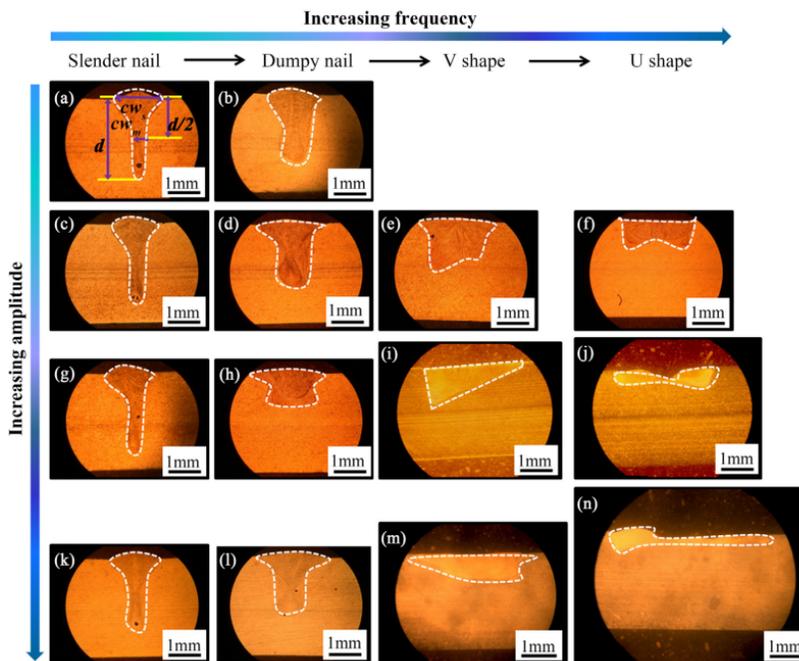


Figure 12 – Évolution de la morphologie de la soudure en fonction de la fréquence et de l'amplitude [12]

À de très faibles oscillations l'amplitude n'influence quasiment pas la pénétration.

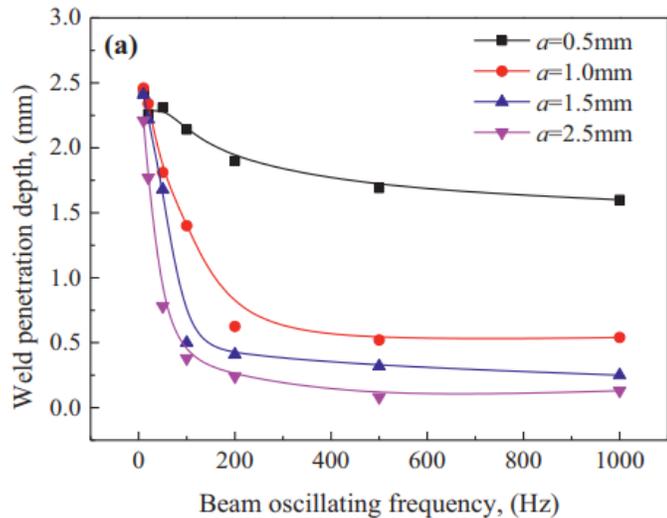


Figure 13 – Évolution de la pénétration en fonction de la fréquence et de l'amplitude des oscillations [12]

Cependant pour une fréquence plus élevée, celle-ci diminue drastiquement la pénétration. L'augmentation de la fréquence fait aussi diminuer la pénétration. Hao et al [12] explique que cela est dû à un changement de mode de soudure, pour des fréquences faibles, la soudure est effectuée en trous de serrures alors que pour une fréquence élevée, elle est effectuée en conduction thermique. À partir d'une certaine valeur de fréquence celle-ci n'a qu'une très faible influence sur la pénétration.

3 Matériaux

3.1 Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des matériaux possédants une grande résistance à la corrosion, cela est principalement dû à l'ajout d'un minimum de 10.5% de chrome et de limiter la quantité de carbone à 1.2%. Cependant cet ajout de chrome favorise l'apparition de microstructures qui n'apparaissent habituellement pas dans les aciers traditionnels. Il existe différents types d'acier inoxydable, cependant nous allons simplement nous intéresser à ceux dénommés ferritique, austénitique et austénitique-ferritique également appelé duplex.

Table 1 – Composition chimique des différents types d'acier inoxydable [13]

Type d'acier inoxydable	Composition chimique [wt%]			
	C (max)	Cr	Ni	Mo
Ferritique	0,03-0,08	10,50-18,00	0-1,00	-
Austénitique	0,02-0,08	16,50-21,00	6,00-26,00	0-7,00
Duplex	0,03	21,00-24,00	3,50-6,50	0,10-3,5

La table 1 montre les proportions de carbone, de chrome, de nickel et de molybdène permettant de catégoriser les différentes familles d'acier inoxydable. En plus de leurs compositions chimiques, leurs comportements mécaniques varient aussi des aciers plus traditionnels. En effet le graphique de comportement ($\sigma(\epsilon)$) des aciers inoxydables est totalement différent des aciers classiques. Il est caractérisé par un comportement non linéaire même dans la partie élastique.

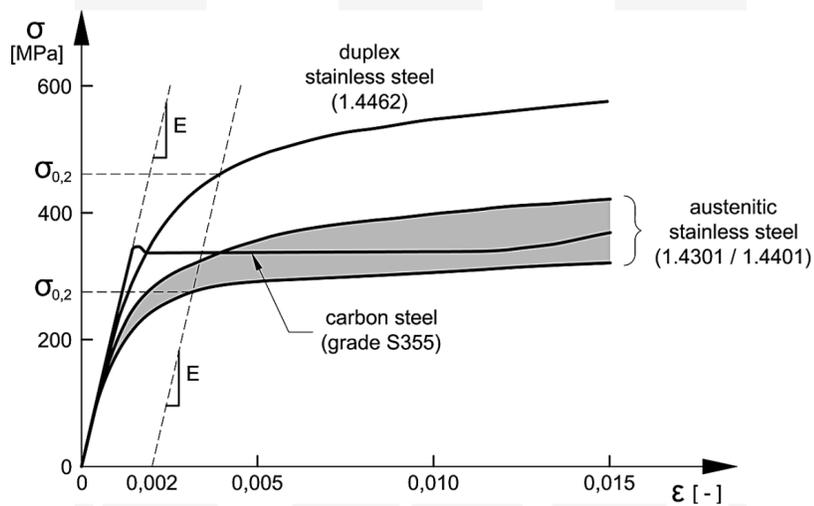


Figure 14 – Loi de comportement pour différents type d'acier [13]

La figure 14 montre les différences dans le comportement des aciers inoxydables par rapport aux aciers classiques. Cependant la non-linéarité peut être caractérisée par un coefficient n défini par l'équation 2.

$$n = \frac{\log(0.05)}{\log\left(\frac{R_{0.01}}{f_y}\right)} = \frac{\log(20)}{\log\left(\frac{f_y}{R_{0.01}}\right)} \quad (2)$$

Où f_y est la limite élastique avec une elongation de 0.2% et $R_{0.01}$ est la valeur de la contrainte pour une elongation de 0.01%. Ce coefficient prend une valeur comprise entre 5 et 14. Plus il se rapproche de 14, plus l'acier possède un comportement non linéaire. Les aciers inoxydables ont la propriété d'avoir une elongation bien plus élevée entre la limite élastique et la limite avant rupture [13]. Cependant le comportement des aciers inoxydables peut quand même être modélisé. Pour cela une variante de l'équation Ramberg-Osgood est utilisée.

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma}{f_y}\right)^n & \text{pour } \sigma \leq f_y \\ 0.002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \epsilon_u \cdot \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y}\right)^m & \text{pour } f_y < \sigma < f_u \end{cases} \quad (3)$$

Où

- n est le coefficient défini par l'équation 2, il peut à la fois être pris dans des tables ou être calculé

- E_y est le module de la tangente de la courbe à la limite élastique et est définies par
$$E_y = \frac{E}{1+0.002.n\frac{E}{f_y}}$$
- ϵ_u est l'élongation correspondante à la résistance maximum f_u et peut être approximer par $\epsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u}$
- m est un coefficient qui est défini par $m = 1 + 3.5\frac{f_y}{f_u}$

La composition chimique des aciers a une grande influence sur leurs propriétés mécaniques. Les aciers inoxydables austénitiques ont une limite plutôt faible : 170-300 MPa à comparer aux autres aciers. Cette valeur est largement influencée par leur composition en carbone et en azote. Il est néanmoins possible de prédire les valeurs de la limite élastique à 0.2% et pour la limite maximum avec une erreur de l'ordre de 20 MPa :

$$R_{p0.2} = 120 + 210\sqrt{N+0.022.Mn+2Cr+14Mo+10Cu+(6.15-0.054\delta)\delta} + \frac{(7+35(N+0.2))}{\sqrt{d}} [MPa] \quad (4)$$

$$R_{p1.0} = R_{p0.2} + 40 \quad [MPa] \quad (5)$$

$$R_m = 470 + 600(N+0.02) + 14Mo + 1.5\delta + \frac{8}{\sqrt{d}} \quad [MPa] \quad (6)$$

Où

- N, Mn, etc représente la composition chimique de l'alliage en wt%
- δ est le pourcentage de ferrite
- d est la taille des grain en mm

Finalement les aciers inoxydables voient leurs comportements changer avec la température. Ces changements sont caractérisés à partir des rapports de la propriété à la température θ sur celle à 20°C.

- Facteur de réduction pour le module d'Young (module d'Young à la température θ sur celle à 20°C)

$$k_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E} \quad (7)$$

- Facteur de réduction pour la limite élastique

$$k_{0.2p,\theta} = \frac{f_{0.2p,\theta}}{f_y} \quad (8)$$

- Le facteur de réduction pour la limite maximum est définis par :

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{u,\theta}}{f_u} \quad (9)$$

3.2 AISI 301LN

L'alliage 301LN est un acier inoxydable austénitique métastable, rendu possible par l'ajout d'azote et de nickel. Ces ajouts ont un impact critique dans l'amélioration de la ductilité et de la résilience du matériau. Pour limiter l'apparition de carbure de chrome aux joints des grains, la teneur en carbone de l'acier AISI 301LN est faible. L'azote en plus de stabiliser le matériau, permet aussi d'augmenter sa résistance mécanique et à la corrosion. Lorsqu'il est recuit une fine microstructure apparaît, ce qui le rend à la fois résistant et flexible. La présence de chrome permet la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome à la surface, protégeant le matériau de la corrosion. C'est aussi un matériau ayant de bonnes propriétés de soudabilité.

Table 2 – Composition chimique de l'acier AISI 301LN [14]

Fe	Cr	Ni	Mg	Si	N	P	C	S
équilibre	16-18 %	6-8%	2	1%	0,07-0,20%	0,05%	0,03	0,03

Table 3 – Propriétés mécaniques [14]

Résistance en traction	Limite élastique	Module d'Young	Coefficient de Poisson	Élongation avant rupture	Dureté
520 MPa	209 MPa	193 Gpa	0,3	28%	32,5 HRC

La figure 15 montre la microstructure présente dans le matériau de base L'austénite (γ) est observée. C'est un allotrope du fer stable à des températures comprises entre 911°C et 1392°C, ayant une structure cubique face centrée. Il est également possible de retrouver de la martensite (α'), qui est une phase métastable, ayant une structure cubique face centrée. Lorsqu'un acier est refroidi doucement les atomes ont le temps de se diffuser. L'austénite n'est plus stable en dessous de 911°C qui se transforment en cémentite et ferrite. Cependant, en refroidissant rapidement l'acier, la migration des atomes de carbones ne s'effectue pas, formant la martensite.

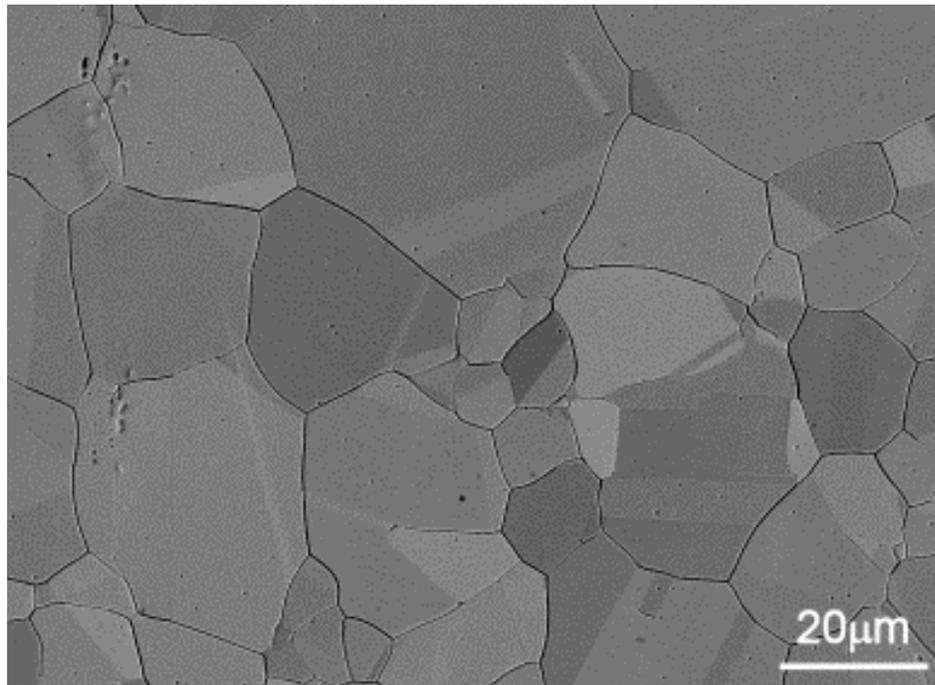


Figure 15 – Micrographie de l'acier AISI 301LN SS [15]

4 Problématique

Les avantages du soudage laser lui ont permis de devenir un des procédés d'assemblage permanent, le plus utilisé dans de nombreux secteurs industriels. Particulièrement dans l'automobile, l'aéronautique ou le ferroviaire. Il est capable de produire des assemblages soudés à de haute vitesse tout en gardant une forte pénétration. Ce procédé est utilisé dans des environnements variés : à l'air libre, avec des gaz de protection ou dans le vide. Ces différentes propriétés permettent de le qualifier comme une technologie de haute qualité et de précision. Son principe de fonctionnement le rend facilement automatisable à l'aide de bras robotisés. C'est une excellente alternative au procédé d'assemblage plus classique. Il permet une soudure sans métal d'apport et possède un excellent rapport de pénétration/largeur du cordon de soudure. Une amélioration de la résistance mécanique, vibratoire et au choc peut être soulignée [7]. Cette technologie permet également une faible distorsion thermique. Il peut aussi souder des assemblages sans contact. La précision du bras robotique permet une forte répétabilité.

Le soudage laser est un procédé qu'on retrouve maintenant dans de nombreux secteurs industriels tel que le microélectronique ou la construction navale. Il est précis, peu coûteux, fiable et automatisable [16]. L'intérêt de ce procédé a augmenté avec le développement des sources lasers basées sur la technologie Nd-YAG, émettant dans la région proche de l'infrarouge entre $1.03 \mu m$ et $1.07 \mu m$. Cette longueur d'onde permet de mieux se propager dans les fibres optiques. Les évolutions techniques ont permis aux lasers d'avoir une haute fiabilité. Leur permettant de créer de faisceau de forte puissance pouvant aller jusqu'à une

dizaine de kW. Ces différents avantages, ont rendus se procédé très populaire parmi les technologies d'assemblage.

Les aciers inoxydables sont des alliages possédant une excellente résistance à la corrosion engendrée par l'apport de chrome et de nickel. Ils sont classifiés en fonction de leurs microstructures et de leurs compositions chimiques. Les principales familles sont dénommées austénitique, ferritique et duplex (austénitique et ferritique). Ces aciers sont largement utilisés dans le secteur automobile pour la fabrication de pièce demandant de bonnes propriétés mécaniques.

Les aciers inoxydables austénitiques sont utilisés dans l'industrie en raison de leurs résistances à la corrosion et leurs résistances mécaniques [17]. Les propriétés mécaniques de ces aciers dépendent de la modification de la microstructure et de la microtexture [18]. La diffusion non homogène des éléments des alliages, modifiant la composition chimique entre les différentes zones de la soudure, se traduit par une fluctuation des propriétés mécaniques [19]. La formation de composants intermétalliques et la précipitation de carbure métallique sont à l'origine de la variation des propriétés [20]. Le soudage est le procédé principalement utilisé pour la fabrication d'assemblage en acier inoxydable. La morphologie et les propriétés mécaniques d'une soudure sont les principaux critères de qualités. Il est donc nécessaire de connaître l'influence des paramètres opératoires sur le cordon de soudure et comment les optimiser.

Néanmoins le soudage laser ne possède pas que des avantages. Des imperfections peuvent être retrouvées dans les cordons de soudure. Pour fabriquer un assemblage de haute qualité avec un faisceau laser, il est nécessaire d'établir des procédures permettant d'éviter les défauts de soudage [7]. Les défauts de soudure ont une influence conséquente sur les propriétés mécaniques des assemblages soudés. Ils peuvent être classés en trois catégories : les défauts géométriques, internes et les défauts de propriété [7]. Par exemple, la porosité est retrouvée régulièrement dans des soudures de forte pénétration. Celles-ci sont provoquées par des faisceaux à très haute énergie. Il est aussi possible d'en retrouver dans la zone de fusion ou au niveau de la ZAT. La fissuration par solidification est principalement observée dans des cordons de soudure d'alliages d'aluminium, de base de nickel ou dans certains aciers inoxydables. Il est nécessaire de limiter l'apparition de ces défauts [7].

Obtenir la combinaison idéale des paramètres opératoire permet la création d'une jointure de haute qualité et de réduire les coûts de fabrications. Il existe différentes méthodes permettant de déterminer les meilleurs paramètres opératoires. La méthode d'essais et d'erreur est la plus couramment utilisée. Néanmoins c'est une méthode lente et coûteuse. Elle ne permet pas une grande amélioration des connaissances sur les phénomènes physiques présents durant le procédé. Le recours à la simulation numérique est alors nécessaire pour analyser les phénomènes en jeu. Elle permet une meilleure compréhension des mécanismes physiques du soudage. Cependant la modélisation demande beaucoup de ressource de calcul et extrêmement lente.

Les études précédentes sur les soudures d'acier inoxydable austénitique ont montré que les propriétés mécaniques du cordon peuvent être significativement différentes du matériau de base. Le procédé de soudage et la composition chimique du cordon ont une influence sur

ces propriétés. La réduction des coûts d'utilisations des lasers à haute puissance a permis un regain d'intérêt sur l'utilisation des lasers oscillant [21]. L'oscillation du laser à haute fréquence permet une meilleure stabilité du bain de fusion. Ce qui permet d'ouvrir à de nouvelle possibilité de manipulation du laser. Les soudures produites par un faisceau de forte puissance sont en forme de clou, avec un rapport profondeur/largeur élevé néanmoins leur application reste limité à cause des exigences d'ajustement des jointures élevé [22].

Cependant, il est possible de résoudre ce problème en utilisant un modèle d'oscillation prédéterminer. Les oscillations permettent une distribution de l'énergie sur une zone plus large. Cela produit des soudures de haute qualité, au prix d'une réduction légère de la vitesse de fabrication [23]. En effet, cela permet un meilleur contrôle de la vitesse de refroidissement ce qui est bénéfique pour les alliages d'aluminium ou les aciers à hautes résistances qui sont utilisés dans les secteurs aéronautiques et spatiaux [24].

5 Objectifs de l'étude

L'objectif général de ce mémoire est de mener une série d'étude sur le soudage en angle de l'acier 301LN. Afin d'affiner nos connaissances sur l'interaction laser-matière de ce matériau mais aussi sur le comportement du soudage laser pour cette mise en position. Les données obtenues permettront de créer des modèles prédictifs à l'aide d'analyse statistique ou de simulation numérique afin d'éviter le processus long et coûteux des essais. Durant ces études un laser à fibre continue est utilisé. Ce mémoire peut alors se diviser en trois objectifs :

L'objectif premier de ce mémoire est d'examiner l'influence des paramètres opératoires sur la morphologie de la soudure (pénétration, largeur et surface) et de comprendre l'origine de cette influence. Les résultats obtenus permettront de développer un modèle mathématique prédictif. Le deuxième objectif est d'étudier l'impact de la puissance et de la vitesse du laser sur les propriétés mécaniques de la soudure. Les résultats des essais de traction permettront de modéliser le comportement à l'aide de l'équation de Ramberg-Osgood, ainsi que de trouver une relation directe entre les paramètres opératoires et les propriétés mécaniques. Enfin, le dernier objectif est de développer un modèle de simulation par éléments finis capable de prédire la morphologie de la soudure.

6 Méthodologie

6.1 Objectif 1

Pour répondre à l'objectif 1, les propriétés morphologiques et physiques seront mesurées sur des échantillons ayant été soudés avec des paramètres opératoires différents. La méthode d'analyse ANOVA permet alors de quantifier l'influence de chaque paramètre opératoire sur les propriétés mesurées. Pour y parvenir, un intervalle de paramètres a été déterminé en utilisant les valeurs maximales et minimales du laser pour le matériau 301 LN. Les principaux paramètres considérés incluent la puissance du laser, la vitesse de soudage, l'amplitude du laser oscillant et le diamètre focal. La méthode de Taguchi a été employée pour construire les tables d'expérimentations afin de minimiser le nombre d'essais. Une fois ces tables établies, les soudures ont été réalisées à l'aide d'un bras robotique équipé d'une tête laser. Pour

s'assurer que le laser est atteint sa vitesse et puissance nominale, la trajectoire de celui-ci commence avant la jointure et se termine après. Cela permet de limiter les effets de bords. Avant chaque soudure, une attention particulière est donnée pour s'assurer que le laser est bien centré sur la jointure, afin de minimiser l'influence de la position initiale. Elles sont par la suite préparées et enrobées dans de la résine Epomet en utilisant l'enrobeuse SimpliMet 3000. Une étude de la microdureté a ensuite été effectuée. La machine de microdureté MMT-X7B est utilisée. Elle permet de mesurer la dureté avec des empreintes de faible taille ; de l'ordre de la dizaine de micromètres. Les empreintes vickers sont effectuées en utilisant une force de 1000g pendant 10s. La cartographie de la dureté du cordon de soudure est conçue à l'aide d'une matrice composée de 4 lignes et 14 colonnes. Les empreintes sont espacées de $150 \mu m$. Cela permet d'éviter les effets de plasticité engendrés par la mesure précédente. Pour positionner la matrice de mesure, la première ligne est positionnée de sorte à être tangente au bord de la soudure. Les cartographies sont alors utilisées pour mesurer la dureté dans les différentes zones de soudure et d'approximer leurs épaisseurs.

Les échantillons subissent une attaque chimique. Pour cela l'acide "Marble" est utilisé. Les soudures sont trempées dans l'acide pendant environ 2s. L'attaque chimique a permis de révéler la morphologie et la microstructure du cordon de soudure. Le microscope Nikon Eclipse MA 100 est utilisé durant l'observation des échantillons. Les propriétés de la morphologie sont mesurées à l'aide du logiciel Image J. La pénétration est mesurée en prenant la droite passant par le centre de la soudure. La largeur est mesurée en prenant la droite passant par les deux extrémités de la soudure. L'option de mesure de surface du logiciel Image J est utilisée pour mesurer la surface de la soudure. Pour appliquer la méthode statistique ANOVA, le logiciel Minitab 18 est utilisé. Il est d'abord nécessaire d'identifier les facteurs influant. La méthode F séquentielle a été utilisée : les facteurs ayant une valeur p (probabilité que l'élément testé ne soit pas viable) trop élevée ont été éliminés progressivement jusqu'à obtenir une valeur p du modèle inférieure à 0,05. Ainsi, une équation mathématique est obtenue, permettant de connaître l'influence de chaque paramètre sur la propriété testée.

6.2 Objectif 2

Pour répondre à l'objectif 2, un intervalle de paramètres a été déterminé en utilisant les valeurs maximales et minimales du laser pour le matériau 301 LN. Les principaux paramètres considérés incluent la puissance du laser et la vitesse de soudage. La méthode de Taguchi a été employée pour construire les tables d'expérimentation. Une fois ces tables établies, les soudures ont été réalisées à l'aide d'un robot de soudage. Pour s'assurer que le laser est atteint sa vitesse et puissance nominale, la trajectoire de celui-ci commence avant la jointure et se termine après afin de limiter les effets de bords. Avant chaque soudure, une attention particulière est donnée pour s'assurer que le laser est bien centré sur la jointure, pour minimiser l'influence de la position initiale. Pour chaque soudure la section est mesurée. Les essais en traction sont effectués sur la machine MTS180 avec une vitesse de déformation de $0.004 s^{-1}$. Un graphique montrant la réponse de la contrainte en fonction de la déformation est obtenu pour chaque soudure. À partir de celui-ci la pente à l'origine, la limite élastique, la limite en traction, l'allongement avant la rupture et l'énergie d'absorption sont mesurés.

Pour l'analyse des données obtenues des scripts Python sont utilisés. La mesure de la pente à l'origine est effectuée en prenant les premiers points des graphiques obtenus. La mesure de la limite élastique s'effectue en prenant la droite parallèle à la zone élastique passant par la déformation de 0.2%, la limite élastique est alors l'intersection entre cette droite et la loi de comportement de la soudure. La limite en traction est la valeur maximum de la contrainte subie durant l'essai. L'allongement avant de la rupture est l'intersection entre la droite parallèle à la zone élastique passant par le dernier point mesuré et le graphique obtenu. Pour l'énergie d'absorption, un algorithme de calcul numérique d'intégrale par trapèze est utilisé. De la même façon que pour l'objectif 1, le logiciel Minitab 18 est utilisé pour effectuer une analyse de variance (ANOVA). La même méthodologie est utilisée pour la détermination de l'influence des paramètres opératoires. Les propriétés obtenues sont alors utilisées pour modéliser la loi de comportement à l'aide du modèle de Ramberg-Osgood. Le coefficient de Pearson est calculé pour chaque modélisation afin de vérifier la robustesse du modèle. À partir de ce modèle une valeur d'énergie d'absorption est alors calculée analytiquement puis elle est comparée à la valeur expérimentale obtenue.

6.3 Objectif 3

Pour répondre à l'objectif 3, le logiciel de simulation numérique COMSOL est utilisé afin de développer un modèle capable de prévoir la morphologie du cordon de soudure. Les équations seront résolues à l'aide du solveur PARADISO. L'évolution des propriétés physiques en fonction de la température de l'acier 301LN est modélisée en utilisant la méthodologie développée dans l'ouvrage "Thermophysical Properties of Stainless Steel" par Choong S.Kim [25]. Afin de réduire le temps de calcul, un modèle 2D est développé. L'équation de chaleur est la seule équation qui sera résolue. Les conditions aux limites convective et radiative sont utilisées. La source de chaleur est modélisée à partir d'une gaussienne. Une modélisation mathématique de l'oscillation de la source laser respectant les conditions géométriques est effectuée. Pour le choix du maillage, une étude de convergence est effectuée. Afin d'affiner le maillage obtenu le module 'Adaptative mesh' de COMSOL est utilisé.

Les principaux paramètres considérés incluent la puissance du laser, la vitesse de soudage, l'amplitude des oscillations et le diamètre focal. La méthode de Taguchi a été employée pour construire les tables d'expérimentation. Pour le calcul de la morphologie du cordon de soudure, la moyenne du champ de la phase liquide est utilisée. Les propriétés morphologiques sont alors mesurées de la même façon que pour l'objectif 1. Les valeurs obtenues par la simulation et expérimentalement sont comparées à l'aide d'estimateurs statistiques telles que le coefficient de Pearson, la moyenne absolue, l'erreur moyenne absolue, l'erreur moyenne quadratique et l'erreur moyenne relative quadratique. De les mêmes façons que pour les objectifs précédents une analyse ANVOA est effectuée afin de connaître l'influence des paramètres opératoires sur la morphologie simulée. L'ANOVA est effectuée suivant la même méthodologie que pour les deux objectifs précédents. Finalement la contribution des paramètres simulée est comparée à ceux obtenus expérimentalement..

7 Organisation du mémoire

En plus de cette introduction générale, ce mémoire est divisé en trois chapitres rédigés sous forme d'article, et il se termine par une conclusion générale. L'introduction générale explique le principe du soudage, ainsi que les caractéristiques du soudage laser. Elle contient également une petite revue de littérature sur l'influence des paramètres opératoires sur la morphologie dans le cas d'une soudure par recouvrement pour des aciers inoxydables et se termine par des explications sur les aciers inoxydables et leurs comportements. Le premier chapitre se focalise sur l'influence des paramètres opératoires sur la morphologie, la microstructure et la dureté d'une soudure d'angle pour l'acier AISI 301LN SS avec des plaques de 2.0 mm. Le second chapitre se concentre sur l'étude de l'influence de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques obtenues par essai en traction. Le troisième chapitre quant à lui se focalise sur le développement comportemental de l'acier AISI 301LN à de haute température ainsi qu'un modèle physique prédisant la morphologie de la soudure. Finalement une conclusion générale répondant aux objectifs de ce mémoire.

Bibliographie

- [1] T. H. Maiman, "Optical and Microwave-Optical Experiments in Ruby," *Physical Review Letters*, vol. 4, pp. 564–566, June 1960.
- [2] A. L. Schawlow and C. H. Townes, "Infrared and Optical Masers," *Physical Review*, vol. 112, pp. 1940–1949, Dec. 1958.
- [3] D. A. Belforte, "The Global Market for Industrial Laser Processing," *PhotonicsViews*, vol. 17, no. 2, pp. 35–37, 2020. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/phvs.202070211>.
- [4] J. Blackburn, "Laser welding of metals for aerospace and other applications," in *Welding and Joining of Aerospace Materials*, pp. 75–108, Elsevier, 2012.
- [5] E. Anawa and A. Olabi, "Optimization of tensile strength of ferritic/austenitic laser-welded components," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, pp. 571–577, Aug. 2008.
- [6] SANGLA Damien, *Nouveaux concepts pour des lasers de puissance : fibres cristallines dopées Ytterbium et pompage direct de cristaux dopés Néodyme*. PhD thesis, UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1, Lyon, Dec. 2009.
- [7] S. Katayama, *Fundamentals and Details of Laser Welding*. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering, Singapore : Springer Singapore, 2020.
- [8] W. Suder and S. Williams, "Power factor model for selection of welding parameters in CW laser welding," *Optics & Laser Technology*, vol. 56, pp. 223–229, Mar. 2014.
- [9] N. Barka and S. S. Karganroudi, "ÉTUDE DES EFFETS DES PARAMÈTRES DE SOUDAGE LASER FIBRE CONTINU – APPLICATION À L'ACIER AISI 304L SOUDÉ SELON DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS,"
- [10] A.-M. El-Batahgy, "Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels," *Materials Letters*, vol. 32, pp. 155–163, Aug. 1997.
- [11] A. Mahrle and E. Beyer, "Modeling and simulation of the energy deposition in laser beam welding with oscillatory beam deflection," in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, (Orlando, Florida, USA), p. 1805, Laser Institute of America, 2007.

- [12] K. Hao, G. Li, M. Gao, and X. Zeng, "Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 225, pp. 77–83, Nov. 2015.
- [13] I. Tylek and K. Kuchta, "MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STAINLESS STEELS,"
- [14] P. Farhadipour, S. Dehghan, N. Barka, A. Iltaf, and P. Farhadipour, "A study on effect of laser overlay welding parameters of stainless steel 301 LN : tensile test, microstructure analysis and microhardness evaluation," *Welding International*, pp. 1–13, Apr. 2024.
- [15] A. Chlupová, J. Man, I. Kuběna, J. Polák, and L. P. Karjalainen, "LCF Behaviour of Ultrafine Grained 301LN Stainless Steel," *Procedia Engineering*, vol. 74, pp. 147–150, 2014.
- [16] Y. Kawahito, M. Kito, and S. Katayama, "In-process monitoring and adaptive control for gap in micro butt welding with pulsed YAG laser," *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 40, pp. 2972–2978, May 2007.
- [17] B. H. Sencer, G. S. Was, M. Sagisaka, Y. Isobe, G. M. Bond, and F. A. Garner, "Proton irradiation emulation of PWR neutron damage microstructures in solution annealed 304 and cold-worked 316 stainless steels," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 323, pp. 18–28, Nov. 2003.
- [18] S. Saha, M. Mukherjee, and T. K. Pal, "Microstructure, Texture, and Mechanical Property Analysis of Gas Metal Arc Welded AISI 304 Austenitic Stainless Steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 24, pp. 1125–1139, Mar. 2015.
- [19] J. Yan, M. Gao, and X. Zeng, "Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 48, pp. 512–517, Apr. 2010.
- [20] Y. Shen, X. Li, X. Sun, Y. Wang, and L. Zuo, "Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel," *Materials Science and Engineering : A*, vol. 552, pp. 514–522, Aug. 2012.
- [21] M. N. Zervas and C. A. Codemard, "High Power Fiber Lasers : A Review," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 20, pp. 219–241, Sept. 2014.
- [22] M. Bachmann, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, "Welding with High-power Lasers : Trends and Developments," *Physics Procedia*, vol. 83, pp. 15–25, 2016.
- [23] S. V. Kuryntsev and A. K. Gilmudinov, "The effect of laser beam wobbling mode in welding process for structural steels," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 81, pp. 1683–1691, Dec. 2015.
- [24] M. Kraetzsch, J. Standfuss, A. Klotzbach, J. Kaspar, B. Brenner, and E. Beyer, "Laser Beam Welding with High-frequency Beam Oscillation : Welding of Dissimilar Materials with Brilliant Fiber Lasers," 2024.
- [25] Kim, C S, *Thermophysical properties of stainless steels*. 1975.

Chapitre 1

Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

Résumé

La soudure laser offre des avantages par rapport aux méthodes traditionnelles : moins d'impact thermique, pas de métal d'apport tout en gardant une forte pénétration. Cette étude explore l'impact de divers paramètres de fonctionnement sur la qualité des soudures en angle de l'acier 301LN, en se concentrant spécifiquement sur la microstructure, la microdureté et la morphologie du cordon de soudure. En utilisant la méthode Taguchi, une configuration expérimentale est conçue pour analyser systématiquement ces facteurs. L'analyse de la microstructure révèle une structure de grain unique dans le cordon de soudure et une petite zone thermiquement affectée (ZAT), ce qui indique un contrôle précis de la soudure. Les mesures de pénétration sont corrélées avec des paramètres de fonctionnement spécifiques à l'aide d'images de microstructure. L'analyse de microdureté souligne davantage le contrôle sur l'épaisseur de la ZAT, crucial pour garantir l'intégrité du joint soudé. À travers l'analyse de variance (ANOVA), des facteurs significatifs affectant les propriétés physiques sont identifiés, ce qui aide à construire un modèle mathématique pour quantifier précisément les influences des paramètres. Les résultats suggèrent que pour optimiser la pénétration, minimiser le diamètre focal est essentiel, bien que dans un équilibre délicat avec les réglages de vitesse et de puissance. Pour obtenir la dureté désirée proche du matériau de base, des plages de paramètres spécifiques sont recommandées : une amplitude de 1,45 mm, une puissance entre 2,82 kW et 2,97 kW et un diamètre focal supérieur à 0,34 mm. Ces résultats contribuent non seulement à la compréhension de la soudure laser, mais offrent également des perspectives pratiques pour améliorer la qualité et l'efficacité des soudures dans les applications industrielles.

Mots clés : Soudage laser, microstructure, microdureté, ANOVA, joint à recouvrement

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

1 Introduction

Le processus de soudage laser est une technologie capable de créer un assemblage permanent métallique [1]. Pour y parvenir, il utilise une source laser comme source de chaleur, permettant la fusion localisée des métaux à joindre [2]. Le refroidissement du bain fondu joue un rôle clé dans le processus de soudage [3]. Ce processus d'assemblage est souvent utilisé dans des lignes de production automatisées telles que la fabrication automobile [4]. L'avantage de cette source de chaleur réside dans sa localité et sa précision, réduisant l'échauffement des métaux et augmentant considérablement la vitesse de refroidissement. De plus, le soudage laser est très polyvalent, il peut souder une grande variété de métaux différents tels que des aciers fortement alliés, des aciers inoxydables, de l'aluminium ou du titane [5]. Cependant, le taux de refroidissement rapide peut provoquer des fissures à chaud induites par une contraction thermique excessive [6]. Néanmoins, ce processus dépend des propriétés physiques du laser utilisé. Le soudage par faisceau de haute énergie est basé sur le principe du «keyhole», qui minimise l'énergie transmise par la source de chaleur au reste du matériau, réduisant ainsi considérablement la taille de la zone affectée thermiquement (ZAT), les contraintes résiduelles et les déformations causées par l'expansion thermique. D'un point de vue microscopique, un refroidissement rapide favorise la formation de petites structures cristallines, ce qui conduit à une amélioration des propriétés mécaniques du joint soudé [7]. Enfin, les propriétés du joint dépendent largement de la géométrie du bain fondu et de la mise en position utilisée, ce qui en fait un paramètre d'étude distinct [8]. L'acier inoxydable 301LN est reconnu pour sa structure austénitique, principalement rendue stable grâce à l'ajout de nickel et d'azote, qui jouent des rôles critiques dans l'amélioration de la ductilité et de la résilience du matériau. Ces caractéristiques sont essentielles pour ses performances mécaniques globales. Un aspect clé du 301LN est sa faible teneur en carbone, délibérément maintenue basse pour éviter la formation de carbure de chrome aux joints de grains, ce qui, à son tour, augmente sa résistance à la corrosion le long des joints de grains. Dans cet alliage, l'azote sert un double objectif : il agit non seulement comme stabilisateur mais renforce également la résistance et la résistance à la corrosion du matériau. Une propriété spécifique du 301LN est sa capacité à devenir plus résistante par déformation à froid ; ce processus provoque un durcissement par déformation en augmentant la densité de dislocations dans le matériau due à la déformation. Un tel travail peut également initier la formation de martensite en fonction de l'étendue du travail à froid, affectant la dureté de l'alliage et potentiellement ses propriétés magnétiques. L'état recuit du 301LN présente généralement une structure à grains fins qui donne un équilibre optimal entre résistance et flexibilité. Les propriétés mécaniques et magnétiques du matériau peuvent également être influencées par la présence de phases mineures telles que la ferrite δ ou la martensite induite par la déformation, bien que ces effets soient déterminés par sa composition chimique spécifique et la manière dont il a été traité. La résistance à la corrosion du 301LN est principalement attribuée à sa teneur en chrome, qui forme une couche protectrice d'oxyde de chrome à la surface, la protégeant contre divers environnements corrosifs. Ainsi, la composition cristalline du 301LN lui confère une combinaison unique de durabilité, de formabilité et

de résistance à la corrosion, le rendant très adaptable à diverses applications. De plus, il est considéré comme ayant de bonnes propriétés de soudabilité avec les processus de soudage traditionnels.

Les aciers austénitiques à faible taux de carbone ($< 0,1\%$) produisent des soudures de bonne qualité. Cependant, d'après le pseudodiagramme de phase binaire de chrome et de nickel avec 70% de fer de la figure 1.1, montre que pour la solidification de ce type d'acier il existe quatre modes différents se basant sur la ration $\frac{C_{req}}{N_{ieq}}$.

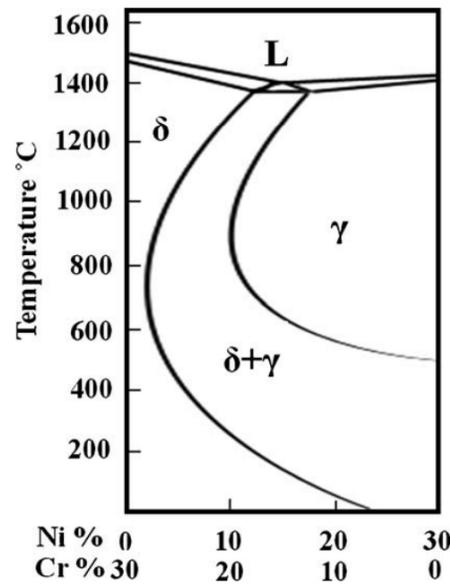


Figure 1.1 – Pseudo diagramme de phase binaire de Cr-Ni pour 70% de Fer,[9]

Où ces deux notions peuvent être définies par $C_{req} = Cr + Mo + 1.5.Si + 0.5.Nb$ et par $N_{ieq} = Ni + 30.C + 0.5.Mn$. Ils existent quatre modes de solidification[10, 11] :

- i. Le mode A, pour $\frac{C_{req}}{N_{ieq}} < 1.25$: $L \rightarrow L+\gamma \rightarrow \gamma$
- ii. Le mode AF, pour $1.25 < \frac{C_{req}}{N_{ieq}} < 1.48$: $L \rightarrow L+\gamma \rightarrow L + \gamma + (\delta + \gamma)_{\text{eutectique}} \rightarrow \gamma + \delta_{\text{eutectique}}$
- iii. Le mode FA, pour $1.48 < \frac{C_{req}}{N_{ieq}} < 1.95$: $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + (\delta + \gamma)_{\text{peritectique et eutectique}} \rightarrow \gamma + \delta$
- iv. Le mode F, pour $\frac{C_{req}}{N_{ieq}} > 1.95$: $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta \rightarrow \gamma + \delta$

La microstructure des aciers inoxydables austénitiques dépend principalement de leur composition chimique. Cependant, les paramètres opérationnels ont une influence considérable sur les propriétés finales du joint soudé [12]. En effet, chacun d'eux affecte le bain de fusion et son mode de refroidissement. La microstructure et la dureté du cordon de soudure, ainsi que la zone affectée thermiquement (ZAT), influencent significativement la résistance mécanique du joint [13]. Ainsi, une haute densité énergétique mais très courte

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

permet de réduire la taille de la ZAT, qui refroidit rapidement, réduisant les contraintes résiduelles et renforçant le joint. Ces alliages ont également de très bonnes propriétés de résistance à la corrosion, ce qui trouve des applications récentes dans les secteurs industriels et des transports. L'effet du laminage à froid sur les propriétés corrosives des aciers AISI 301LN et 316L a été étudié [14]. Les résultats montrent que le 316L a de meilleures propriétés corrosives que le 301LN, principalement en raison de sa proportion plus élevée de molybdène. Cependant, il est également possible d'utiliser la technologie de texturation au laser, qui est un processus de modification de la surface d'un matériau à l'aide d'un laser pulsé, pour améliorer la résistance à la corrosion du matériau [15]. Pour cela, un motif de déplacement circulaire est utilisé pour modifier la morphologie de l'acier 301LN. Il montre que la fréquence de répétition du motif est plus importante pour l'état de surface que son amplitude. De plus, ce processus montre une réduction significative de la corrosion et favorise la création d'une couche d'oxyde dense, ce qui renforce la protection du matériau. Le passage du laser entraîne la création de martensite dans la région traitée, augmentant sa dureté à la surface du matériau.

La puissance du laser joue un rôle important dans les propriétés de résistance mécanique du joint [16]. Ce paramètre a un rôle significatif dans la formation de la microstructure du joint [17]. Pour mieux comprendre l'influence du laser sur les propriétés de l'acier 301LN, l'effet des paramètres opérationnels d'un laser nanoseconde sur les propriétés mécaniques de l'alliage a également été étudié [18]. Il est démontré que pour maximiser la surface durcie, il est nécessaire d'augmenter la puissance du laser et de réduire la vitesse des impulsions. De plus, en réduisant la distance focale, une meilleure pénétration est obtenue sans affecter la largeur du joint. De plus, une étude sur la microstructure du joint de 301LN laminé à chaud et recuit pour une position bout à bout avec un laser Yb : YAG de 4 kW à puissance constante a été réalisée [19]. Il montre que dans la zone de soudure, la dureté diminue. Il a également été observé que pour les deux soudures, la résistance à la traction est plus élevée que celle du matériau de base laminé à chaud. D'autre part, l'évolution de la microstructure en fonction de l'espacement bout à bout est également étudiée [20]. Il a été observé que le cordon de soudure est principalement composé de γ -austénite et de δ -ferrite. De plus, le mode de solidification dans ce cas est le mode AF. Lorsque l'espacement augmente, une zone triangulaire composée de cristaux équiaxes est trouvée, et leurs tailles diminuent drastiquement. La microstructure n'est pas la seule affectée ; la pénétration diminue également lorsque l'espacement augmente. Il conclut que dans ce cas, l'espacement devrait être inférieur à 0,1 mm. L'effet des paramètres opérationnels sur la géométrie du cordon de soudure pour le positionnement superposé de l'acier AISI 304L est trouvé [21]. Il a été indiqué que la vitesse joue un rôle important dans l'état de surface final du cordon de soudure ainsi que dans la pénétration. Cependant, la vitesse est inversement proportionnelle à l'épaisseur du cordon de soudure. Il a également été constaté qu'il n'y a qu'une seule phase d'austénite dans la ZAT, et une petite quantité de martensite est présente sur les lignes de fusion. Enfin, pour augmenter les propriétés mécaniques, il est nécessaire d'augmenter la quantité de δ -ferrite dans le cordon de soudure. Dans le domaine des études scientifiques sur le soudage laser de l'acier AISI 301LN, la plupart des recherches se concentrent uniquement sur les

configurations de joint bout à bout ou de chevauchement. Cependant, il est courant dans les environnements industriels de rencontrer des soudures à des angles, qui sont rarement explorés théoriquement. Ainsi, en s'appuyant sur les connaissances acquises grâce aux recherches précédentes, cette étude vise à déterminer l'influence de la puissance du laser, de la vitesse, du diamètre focal et de l'amplitude d'oscillation du laser sur la microstructure et la microdureté dans le cas d'un cordon de soudure d'angle. En effet, ces deux propriétés affectent significativement la qualité de la soudure finale. La compréhension de ces informations permettra d'identifier les intervalles de paramètres opérationnels pour maximiser la qualité et la résistance du joint. Pour minimiser le nombre de soudures nécessaires, la méthode de conception expérimentale de Taguchi est utilisée. De plus, un test de microdureté sera réalisé pour cartographier la dureté du cordon de soudure. Ensuite, les résultats seront analysés à l'aide de la méthode ANOVA statistique pour déterminer l'influence de chaque paramètre opérationnel sur la propriété étudiée. À cet égard, la gamme des paramètres a été déterminée en considérant les valeurs maximales et minimales du laser. La méthode de Taguchi a facilité la construction de tables de conception expérimentale. Une fois construites, les soudures sont exécutées, préparées et mises dans de la résine. Une étude de microdureté est réalisée, en utilisant une machine capable de mesurer de petites dimensions (environ 150 μm), permettant une cartographie de la dureté de l'échantillon. Pour mesurer la pénétration et comprendre les grains de soudure, une gravure chimique est effectuée. Les mesures seront effectuées à l'aide du logiciel de traitement d'images Image J. Pour appliquer la méthode statistique ANOVA, il est d'abord nécessaire d'identifier les facteurs influents [22]. Pour ce faire, la méthode de test F séquentielle est utilisée : les facteurs avec des valeurs p excessivement élevées (probabilité que l'élément testé ne soit pas viable) sont éliminés une fois que la valeur p du modèle est inférieure à 0,05. Ainsi, une équation mathématique est obtenue, permettant de comprendre l'influence de chaque paramètre sur la propriété testée.

2 Matériel d'expérimentation

Dans cette étude des plaques d'acier AISI 301LN de 0.076" d'épaisseur sont utilisées. La composition chimique et les propriétés mécaniques du fabricant sont consignées dans la table 1.1 et 1.2.

Table 1.1 – Composition chimique de l'acier AISI 301LN à partir de la base de donnée MakeltFrom

Fe	Cr	Ni	Mn	Si	N	P	C	S
équilibre	16-18 %	6-8%	2	1%	0,07 -0,20%	0,05%	0,03	0,03

Une tête laser Nd :YAG équipé de la source laser IPG Photonics YLS3000 est utilisé pour le soudage laser. Elle possède un voltage maximum de 600V et une longueur d'onde de 1070 nm. Cette source est montée sur un robot FANUC ayant une précision de 0.07 mm. L'ensemble de la structure est représenté sur la figure 1.2. Plus précisément, un laser à fibre continue de 200 μm est utilisé. L'appareil DC scanner permet de faire osciller le faisceau laser. La fréquence sera fixée à 150 Hz et les oscillations seront sinusoïdales.

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

Table 1.2 – Propriétés mécaniques de l'acier AISI 301LN à partir de la base de donnée MakeltFrom

Résistance en traction	Limite élastique	Module d'Young	Coefficient de Poisson	Élongation avant rupture	Dureté
765MPa	350 MPa	193 GPa	0,3	40%	32,5 HRC

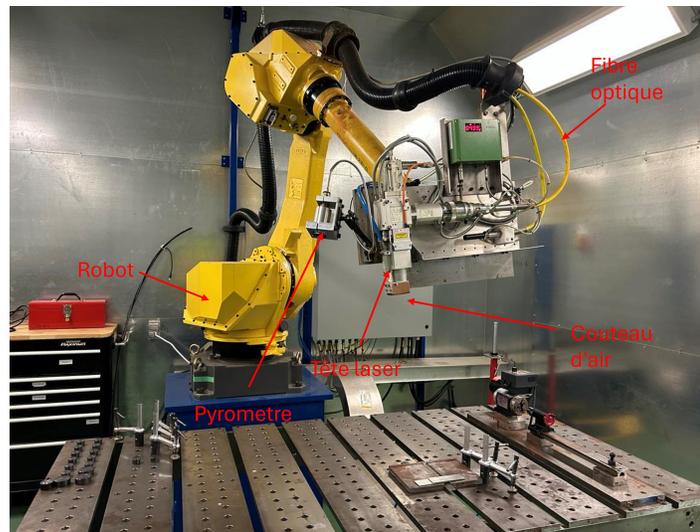


Figure 1.2 – Robot 6 axes utilisé pour les soudures

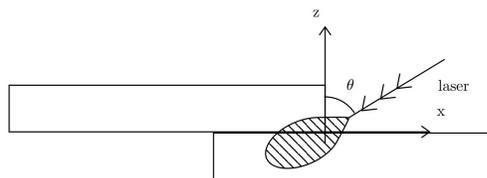


Figure 1.3 – Représentation schématique de la configuration du soudage

Une représentation en deux dimensions de la mise en position est donnée par la figure 1.3. Afin d'avoir une soudure homogène et de s'assurer que le faisceau laser est atteint sa puissance et sa vitesse nominale, celui-ci commencera sa trajectoire avant les plaques à souder et finira après. Si cela n'est pas respecté cela peut engendrer un manque de fusion et de la porosité sur les bords du cordon de soudure. Les plaques utilisées pour les soudures ont pour dimension 100x35 mm et d'une épaisseur 2 mm.

Durant cette étude, quatre paramètres opératoires ont été retenus ; la puissance, la vitesse, le diamètre focal et l'amplitude des oscillations. Pour paramétrer le diamètre focal, le collimateur directement installé sur la source laser. Afin de réduire au minimum le nombre d'essais, la méthode de désigne d'expérience Taguchi est utilisé. Pour chaque paramètre trois

niveaux sont retenus et consignés dans la table 1.3. Ces valeurs ont été choisies de sorte, qu'avec l'énergie minimum les plaques soient à peine soudées et qu'avec l'énergie maximum le bain de fusion soit instable provoquant des éclaboussures et rendant la soudure de piètre qualité. Dans ces conditions la meilleur table est la $L_9(3^4)$.

Table 1.3 – Paramètres opératoires

Paramètres	niveau 1	niveau 2	niveau 3
Diamètre focal	0.25 mm	0.30 mm	0.35 mm
Vitesse	3.5 $m.min^{-1}$	4.0 $m.min^{-1}$	4.5 $m.min^{-1}$
Puissance	2.6 kW	2.7 kW	2.8 kW
Amplitude	1.25 mm	1.50 mm	1.75 mm

Table 1.4 – Paramètres des essais

Essais	Diamètre focal (mm)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	Puissance (kW)	Amplitude (mm)	Énergie surfacique ($J.mm^{-2}$)
1	0,25	3,5	2,6	1,25	79.7
2	0,25	4.0	2,7	1,50	66.1
3	0,25	4,5	2,8	1,75	56.4
4	0,30	3,5	2,7	1,75	63.9
5	0,30	4.0	2,8	1,25	68.6
6	0,30	4,5	2,6	1,50	51.7
7	0,35	3,5	2,8	1,50	66.2
8	0,35	4.0	2,6	1,75	49.8
9	0,35	4,5	2,7	1,25	54.4

La table 1.4 montre les paramètres opératoires pour l'ensemble des neuf essais qui seront effectués.

Pour la suite une section de la soudure est alors découpée et mise dans de la résine Epomet à l'aide de la machine SimplitMet 3000. Les échantillons sont alors polis afin d'obtenir un revêtement miroir. Pour l'étude de la microstructure les échantillons sont alors attaqués chimiquement par un l'acide "Marble etchant". Pour les observations le microscope Nikon Eclipse MA 100 utilisées. Les images obtenues sont utilisées pour mesurer la pénétration, la largeur et la surface des cordons de soudure.

Afin d'évaluer la qualité de la soudure une cartographie de la dureté est effectuée à l'aide de la machine de microdureté MMT-X7B. Les empreintes vickers sont alors effectuées avec une force de 1000g pendant 10s. Durant ces essais les échantillons sont aussi polis. Les empreintes sont réparties dans une matrice de 4 lignes et de 14 colonnes avec espacement entre chaque mesure de $150\mu m$.

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

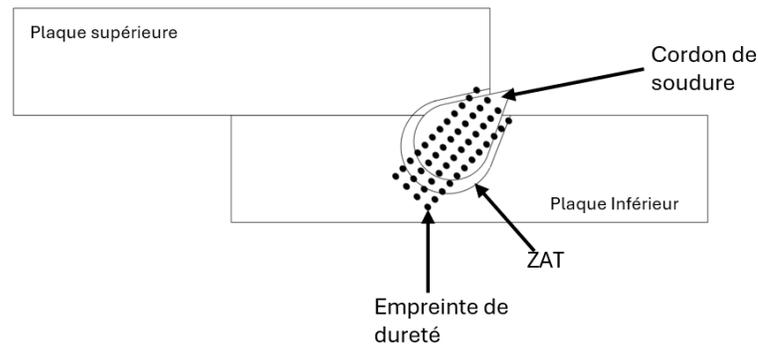


Figure 1.4 – Schéma de la position des mesure pour la micro-dureté

Le placement de cette matrice sur le cordon de soudure est représenté sur la figure 1.4. La cartographie obtenue permet de distinguer les différentes zones d'une soudure ; le cordon, la ZAT et le matériau de base mais aussi d'identifier des défauts contenus dans le cordon de soudure comme des fissures ou des trous de porosité sur la zone cartographiée. La variation de la dureté permet de mesurer approximativement l'épaisseur de la ZAT.

Les résultats obtenus des essais sont analysés à l'aide de la méthode statistique ANVOA en utilisant le logiciel MINITAB 18. La méthode de F séquentielle est employée : les facteurs ayant une valeur de p (probabilité que l'élément testé ne soit pas viable) trop élevée sont éliminés les uns après les autres jusqu'à obtenir une valeur de p du modèle inférieure à 0.05. Le modèle obtenu permet de connaître la contribution des paramètres opératoire sur la propriété analysée. Une équation peut alors être déduite des résultats permettant de connaître avec plus de détail l'influence des paramètres sur ladite propriété. À partir de cette équation un graphique et une cartographie de leur effet sont alors tracés.

$$P_s\left(\frac{J}{mm^{-2}}\right) = \frac{\text{Puissance}(W)}{\text{Vitesse}\left(\frac{mm}{s}\right) \sqrt{\text{Amplitude (mm)} \cdot \text{Diamètre focale (mm)}} \quad (1.1)$$

L'équation 1.1 permet de calculer l'intensité énergétique et sera utilisée afin de discuter des effets des paramètres opératoires sur les propriétés de la soudure. Elle a été trouvée par analyse dimensionnelle.

3 Résultat et discussion

3.1 Microstructure

Tout d'abord les métallographies ne montrent aucune fissuration à chaud ni de porosité, cela démontre bien les bonnes propriétés de soudabilité de l'acier 301LN. La zone de soudure est en forme de V et elles sont toutes symétriques par rapport à l'axe du laser, cela montre une répartition uniforme de la chaleur dans la soudure. Il est possible de décomposer chacune des images en trois zones : le matériau de base (BM), la zone affectée thermiquement (ZAT) et le cordon de soudure (CS). Dans un premier temps, en raison de la haute densité d'énergie et de la faible dispersion thermique du laser, la ZAT est très étroite.

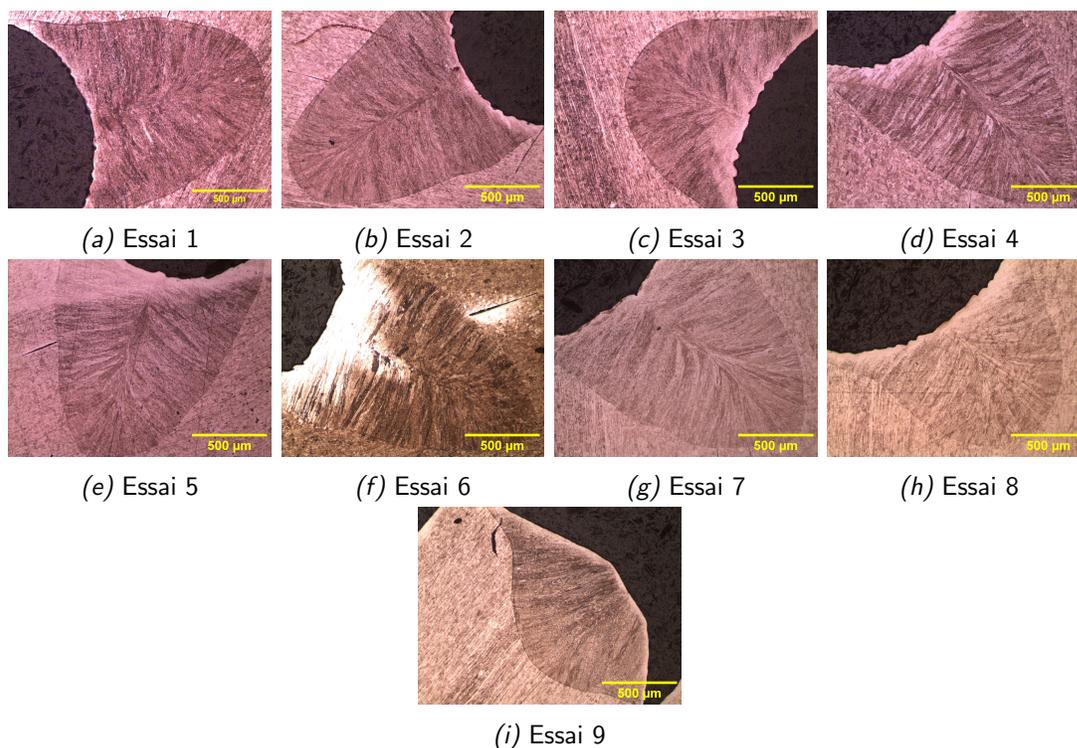


Figure 1.5 – Macrostructure de la soudure avec un agrandissement de X5

C'est une bonne chose pour la qualité de la soudure, car généralement lors d'un effort, c'est cette zone qui fissure en premier.

La Figure 1.5 présente la microstructure de la zone soudée au laser pour neuf échantillons de (a) à (i). On peut observer la croissance des branches de ferrite le long du centre de la zone soudée. À mesure que la solidification progresse vers la ligne centrale de la soudure, une croissance dendritique se produit dans la zone de fusion. La différence entre les zones soudées, de (a) à (i), qui peut être observée, réside dans la profondeur de pénétration de la zone soudée.

La figure 1.6j montre que tout d'abord la structure du 301LN qui est principalement composé de martensite α' (en foncé) et d'austénite γ . La figure 1.5 montre que les grains se sont orientés dans le sens de la diffusion de température, cela est dû à une solidification très rapide du métal. Dans la région du cordon de soudure de la δ -ferrite est observé, ce qui suggère un changement allotropique de la ferrite en austénite suivant la transformation primaire de la ferrite; mode F, en effet le rapport $\frac{C_{req}}{N_{req}} > 1.95$. Également de la δ -ferrite squelettique est aussi observé proche des lignes de fusion. Cette morphologie est très courante dans le cas du soudage avec un refroidissement rapide. Également lorsque la vitesse augmente l'épaisseur de la structure en arborescence diminue, cela est dû à une augmentation de la solidification et de la vitesse de refroidissement principalement à la diminution de l'apport de chaleur dû de la vitesse élevée. Le même raisonnement peut être appliqué avec la puissance.

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

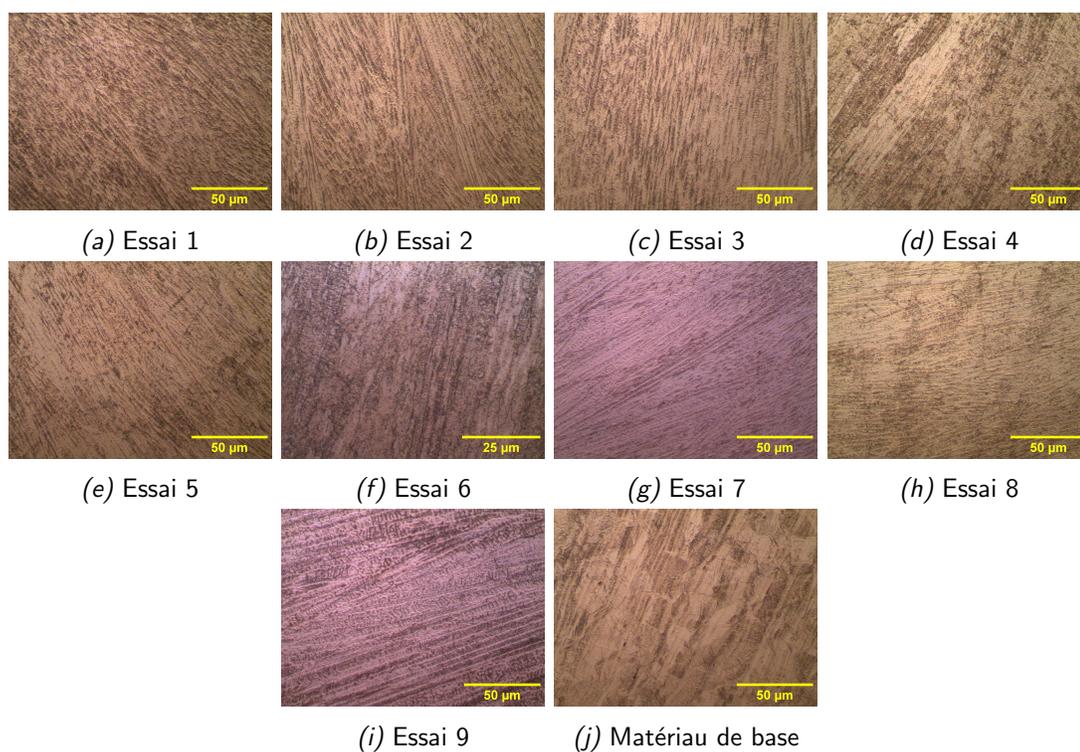


Figure 1.6 – Microstructure de la soudure

La figure 1.6 permet de mesurer le ratio de ferrite et d'austénite pour chacune des soudures. Pour cela le logiciel image J est utilisé. Les résultats sont consignés dans la table 1.5. Les valeurs de ferrite sont comprises entre 19 et 26%. Ce qui donne un écart de 7%.

Table 1.5 – Valeur du ratio d'austénite et de ferrite pour chaque soudure

Soudure	Ferrite (%)	Austénite (%)
1	20%	80%
2	22%	78%
3	19%	81%
4	22%	78%
5	26%	74%
6	23%	77%
7	26%	74%
8	25%	75%
9	24%	76%

La variation des paramètres opératoires semble avoir un faible effet sur le rapport austénite ferrite. Également les valeurs obtenues sont sensibles aux erreurs de mesure.

3.2 Pénétration

De plus, avec les photos de la microstructure générale, il est possible de mesurer précisément la pénétration de la soudure. Les résultats sont alors consignés dans le tableau 1.6.

Table 1.6 – Valeur de la pénétration de chaque cordon de soudure

Essais	Diamètres focales (mm)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	Puissance (kW)	Amplitude (mm)	Pénétration (mm)
1	0,25	3,5	2,6	1,25	1.33
2	0,25	4.0	2,7	1,50	1.42
3	0,25	4,5	2.8	1,75	1.02
4	0,30	3,5	2,7	1,75	1.41
5	0,30	4.0	2.8	1,25	1.21
6	0,30	4,5	2,6	1,50	1.68
7	0,35	3,5	2.8	1,50	1.52
8	0,35	4.0	2,6	1,75	1.24
9	0,35	4,5	2,7	1,25	0.86

D'après El-Batahgy [23] afin d'avoir une soudure de bonne qualité il est nécessaire de minimiser la chaleur apportée par le laser défini par $H = \frac{P}{v}$. En effet la soudure ayant la plus grande pénétration est la 6 avec une énergie transmise de $34.67 J.mm^{-1}$. Durant la soudure deux grandes forces s'opposent dans le cordon de soudure ; la force électromagnétique engendrée par le laser et la force de tension superficielle du métal liquide, et d'après El-Batahgy ces deux forces ont un effet sur le rapport $\frac{\text{pénétration}}{\text{Largeur}}$. Cette interaction est la raison permettant d'expliquer qu'une soudure de bonne qualité demande une faible énergie. Néanmoins la soudure 3 à une pénétration de 1.02 mm pour une énergie de $37.33 J.mm^{-1}$, la pénétration est faible or d'après les travaux de El-Batahgy la pénétration devrait avoir une valeur proche de la soudure 6. Néanmoins l'apport de chaleur n'est pas le seul facteur en jeu. À haute vitesse l'atténuation de l'énergie du laser par le plasma est plus faible que ce qui augmente la ration $\frac{\text{pénétration}}{\text{largeur}}$ mais aussi diminue la pénétration [23]. Également si l'énergie diminue trop, l'apport de chaleur sera trop faible pour faire fondre le métal et ainsi effectuer la soudure, ce qui explique la valeur de la pénétration plus faible. Dos Santos Paes et al [24] montrent que l'apport de chaleur H est une équation trop simple pour prédire avec précision la pénétration.

À l'aide du test F séquentiel et de l'étude d'analyse de variance (ANOVA), un modèle est développé. La table 1.7 résume les résultats de l'étude et dévoile des informations intéressantes comme le R^2 ajusté et prédit qui donnent la similarité de la modélisation avec les données. Dans ce cas, on a R^2_{ajust} égal à 86.28% et $R^2_{\text{prédit}}$ à pour valeur 45.62%. La table 1.8 donne la valeur p associée au modèle qui est de 0.033, ce qui est inférieur à 0.05 avec un niveau de confiance à 95%, ce qui signifie que le modèle est statistiquement satisfaisant. Afin de montrer quels sont les termes significatifs pour cette étude, il faut éliminer les autres

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

un à un en utilisant la méthode des tests F séquentiels. Ainsi, les paramètres retenus sont le diamètre focal (D), la vitesse du laser (V), la puissance (P), l'amplitude des oscillations (A), ainsi que le terme croisé entre la vitesse et la puissance (PV).

La méthode ANOVA permet de déterminer l'influence des facteurs sur le résultat final, ici la pénétration. Elle a été effectuée de façon séquentielle, c'est-à-dire en éliminant les facteurs non significatifs.

Le terme d'interaction entre la vitesse et la puissance est celui qui a le plus d'importance. En effet, il contribue à 67,92% du modèle, la vitesse est aussi non négligeable avec une contribution de 16,12%. Néanmoins, les autres facteurs ne semblent pas avoir une grande influence sur la valeur de la pénétration. Également, la contribution de l'erreur est faible, ce qui indique qu'aucun paramètre n'a été négligé.

Les résultats de l'étude ANOVA sont consignés dans la table 1.8. Si un facteur possède une valeur de F élevée et une valeur de $p < 0.05$, alors il peut être considéré comme significatif. Dans le cas de la pénétration, seuls les paramètres consignés dans la table 1.8 le sont. La valeur de R^2 , qui est de 93,14%, représente la variation du modèle en fonction des données. Cela montre l'adaptabilité du modèle ; ainsi, plus sa valeur est élevée, plus le modèle se rapproche de la réalité. Le R^2_{ajust} prend quant à lui en compte le nombre de prédicteurs. Finalement, le $R^2_{\text{prédit}}$ détermine comment le modèle réagira à de nouvelles observations. La valeur de S permet d'évaluer dans quelle mesure le modèle décrit la réponse ; plus la valeur de S est faible, plus le modèle décrit bien la réponse.

Table 1.7 – Estimateur statistique du modèle de la pénétration

S	R^2	R^2_{ajust}	SomCar-ErrPrév	$R^2_{\text{prédit}}$
0,0929	93.14%	86.28%	0,274003	45,62%

Ainsi avec les résultats obtenus il est alors possible de donner un modèle mathématique de la pénétration en fonction des facteurs décrits dans la table 1.8.

$$\text{pénétration (mm)} = -79.9 - 4.2.D + 21.23.V + 28.77.P - 7.40.PV \quad (1.2)$$

Où $D \in [0.25 \text{ mm}, 0.35 \text{ mm}]$, $V \in [3.5 \text{ m.min}^{-1}, 4.5 \text{ m.min}^{-1}]$ et $P \in [2.6 \text{ kW}, 2.8 \text{ kW}]$. Comme le montre la figure 1.7, le diamètre focal est inversement proportionnel à la pénétration, ce qui semble cohérent. En effet, plus le diamètre focal est petit, plus l'énergie transmise par la source de chaleur est élevée. Cependant, pour l'interprétation de la vitesse et de la puissance, il est nécessaire d'utiliser les graphiques des figures 1.7 et 1.8. En effet, ces deux facteurs sont couplés. Ainsi, pour avoir une grande pénétration, il est nécessaire de prendre une vitesse faible avec une puissance élevée.

À partir des résultats du test ANOVA il est possible de tracer les courbes de réponse pour montrer l'impact des facteurs sur la pénétration. La figure 1.7 montre que la pénétration est inversement proportionnelle au diamètre focal (D), cependant les paramètres : puissances (P) et vitesses (V) ne sont pas indépendants comme le montre la figure 1.8.

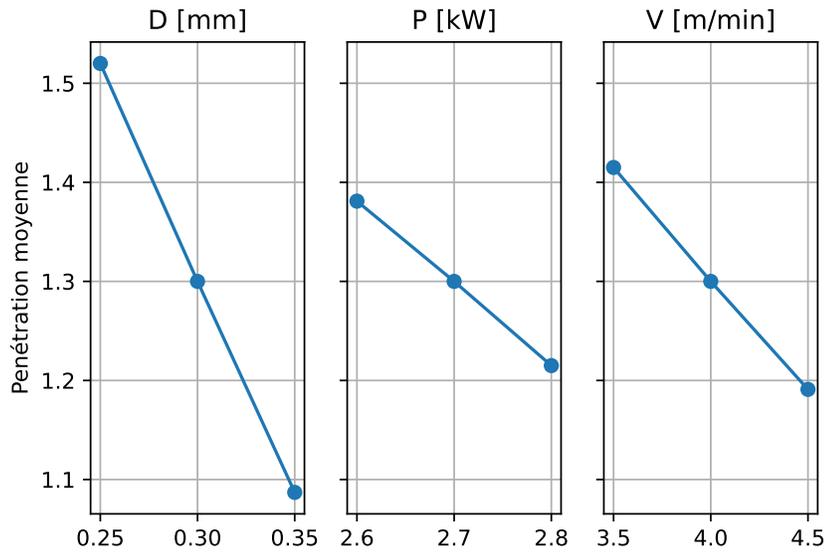


Figure 1.7 – Variation de la pénétration en fonction des paramètres opératoires

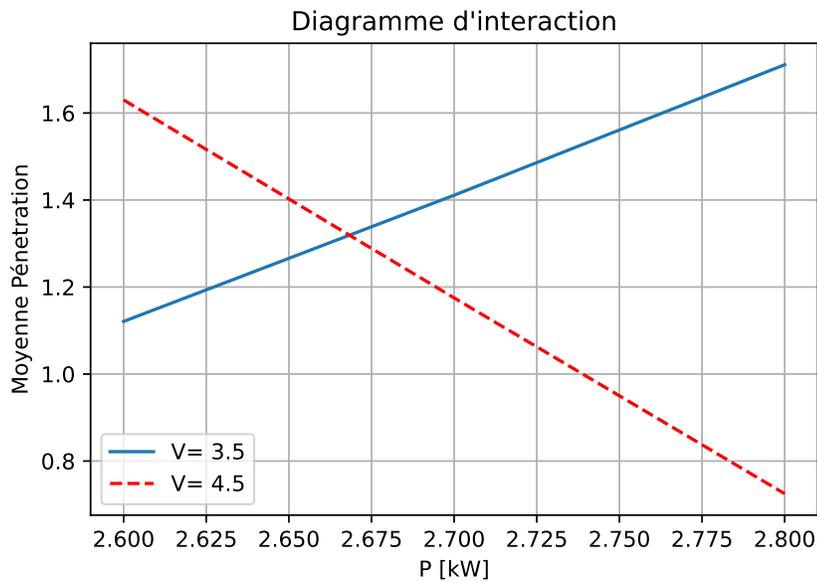


Figure 1.8 – Variation de la pénétration en fonction des paramètres opératoires

Kawahito et al [25] obtiennent un résultat similaire pour le diamètre focal ; il trouve que diminuer celui-ci augmente la pénétration. En effet diminué le diamètre focal augmente la densité surfacique de puissance. Lorsque la puissance diminue cela diminue l'énergie transmise et d'après El-Batahgy la pénétration augmente.

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

Table 1.8 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la pénétration

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	4	0,469333	93,14%	0,46933	0,117333	13,58	0,013
D	1	0,00375	0,74%	0,16538	0,165375	19,14	0,012
P	1	0,041667	8,27%	0,32116	0,32116	37,18	0,004
V	1	0,081667	16,21%	0,33468	0,334682	38,74	0,003
P.V	1	0,34225	67,92%	0,34225	0,34225	39,62	0,003
Erreur	4	0,034556	6,86%	0,03456	0,008639		
Total	8	0,503889	100,00%				

La vitesse fait augmenter l'énergie surfacique en diminuant, ce qui se traduit par une température plus élevée dans le bain, favorisant la diffusion de celle-ci dans le matériau. Cependant la diffusion de chaleur dans un matériau est un phénomène plutôt 'lent' ainsi pour des vitesses trop grandes que la chaleur n'a pas le temps de pénétrer dans le matériau. Cette caractéristique de la diffusion de chaleur est à l'origine du terme croisé PV. Lorsque la vitesse est de 3.5 m.min^{-1} , l'augmentation de la puissance augmente la pénétration, en effet avec une vitesse lente, la chaleur a plus de temps pour pénétrer dans la matière. Lorsque la vitesse est de 4.5 m.min^{-1} , l'augmentation de la puissance fait diminuer la pénétration car l'apport de chaleur H augmente.

L'ensemble des graphiques de la figure 1.9 confirme bien que le diamètre focal doit être faible, ce qui est cohérent avec les graphiques de la figure 1.7. Également, l'interaction entre la puissance et la vitesse est bien visible et confirme bien l'interprétation du graphique précédent. Finalement, ces graphiques nous indiquent que pour avoir une pénétration élevée, il est nécessaire d'avoir un faible diamètre focal, ce qui impose une faible vitesse qui elle-même impose une grande puissance.

3.3 Largeur des soudures

Comme la trajectoire du laser varie selon les essais, il est intéressant de mesurer que la largeur de la soudure est d'identifier les paramètres opératoires ayant une influence sur celle-ci. Ainsi de la même façon que pour la partie précédente les métallographies de la figure 1.5 sont utilisées afin de mesurer la largeur, les résultats sont consignés dans la table 1.9.

Les mesures montrent que la largeur de la soudure peut varier jusqu'à 31% ce qui est significatif. Cependant, cela n'est pas surprenant, en effet en augmentant l'amplitude et le diamètre focal, augmente la surface d'interaction entre le laser et la matière augmente, ce qui accroît la largeur de la soudure. Néanmoins avoir une grande surface de soudure réduit l'apport de chaleur provoquant une réduction de la température générale de la surface, ce qui réduira la largeur de la soudure finale. Également pour les essais 2,3,4 et 6 la largeur de la soudure est inférieure à la valeur de l'amplitude du laser. Cela signifie qu'une partie en contact avec le laser n'a pas fondu. En effet les valeurs d'énergie surfacique pour ces soudures sont respectivement 71 J.mm^{-2} , 68 J.mm^{-2} , 68.6 J.mm^{-2} et 55.7 J.mm^{-2} .

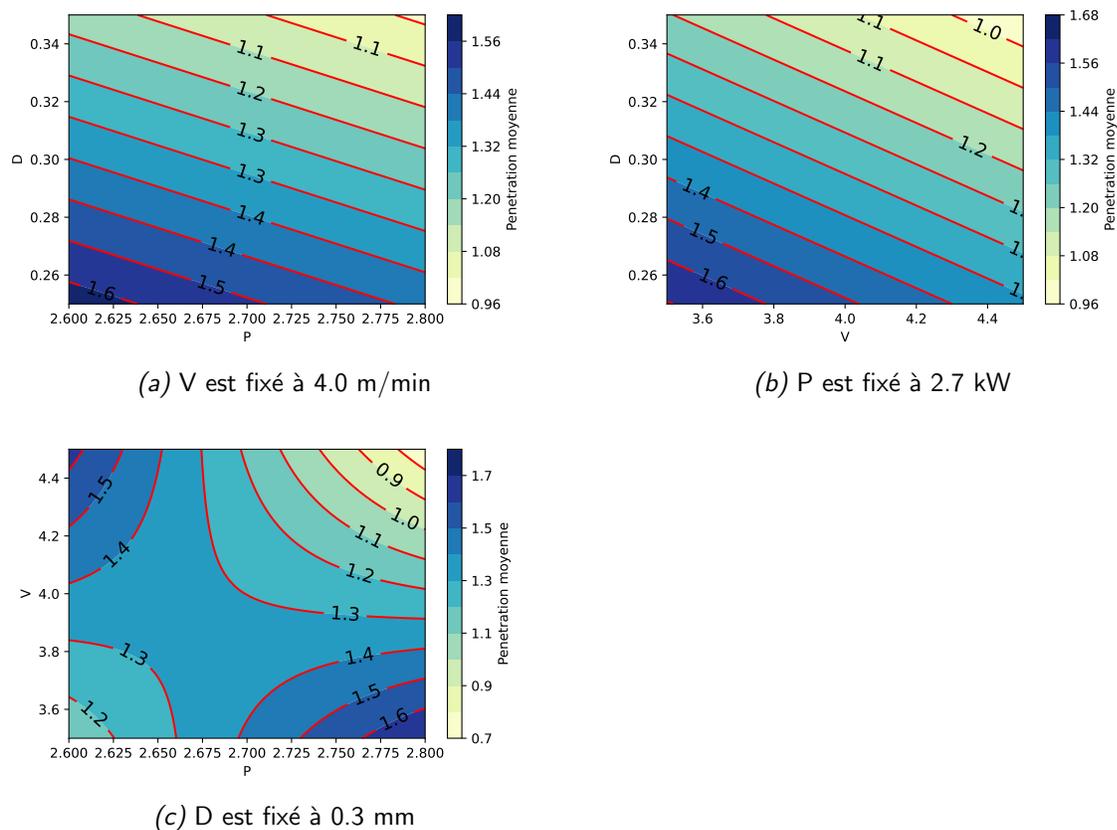


Figure 1.9 – Graphiques de contours pour la pénétration en fonction des paramètres opératoires

Table 1.9 – Valeur de la largeur des soudures

Essais	Diamètre focal (mm)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	Puissance (kW)	Amplitude (mm)	Largeur (mm)
1	0,25	3,5	2,6	1,25	1,59
2	0,25	4,0	2,7	1,50	1,28
3	0,25	4,5	2,8	1,75	1,66
4	0,30	3,5	2,7	1,75	1,57
5	0,30	4,0	2,8	1,25	1,46
6	0,30	4,5	2,6	1,50	1,27
7	0,35	3,5	2,8	1,50	1,58
8	0,35	4,0	2,6	1,75	1,79
9	0,35	4,5	2,7	1,25	1,86

Également pour les soudures ayant une valeur de la largeur supérieure à leurs amplitudes ont une énergie supérieure à celle de la soudure 2, à l'exception de la soudure 8 et 7. Néanmoins elles possèdent une largeur proche de leurs amplitudes. Si l'énergie dépasse une certaine

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

valeur proche de 70 J.mm^{-2} alors la largeur de soudure sera plus large que son amplitude, cela signifie qu'il y a une diffusion de la chaleur sur les extrémités du cordon de soudure. Également la géométrie utilisée influe beaucoup sur les résultats, en effet l'écoulement du bain de fusion de la plaque supérieure vers celle inférieure atténue la diffusion de chaleur dans celle-ci.

À l'aide du test F séquentiel et de l'étude d'analyse de variance (ANOVA), un modèle est développé. La table 1.7 résume les résultats de l'étude et dévoile des informations intéressantes comme le R^2 ajusté et prédit qui donnent la similarité de la modélisation avec les données. Dans ce cas, on a R^2_{ajust} égale à 91.81% et $R^2_{\text{prédit}}$ a pour valeur 79.27%. La table 1.10 donne la valeur p associée au modèle qui est de 0.005, ce qui est inférieur à 0.05 avec un niveau de confiance à 95%, ce qui signifie que le modèle est statistiquement satisfaisant. Également la contribution de l'erreur est de 4.09% ce qui est suffisamment faible pour affirmer qu'aucun paramètre opératoire n'a été négligé. Afin de montrer quels sont les termes significatifs pour cette étude, il faut éliminer les autres un à un en utilisant la méthode des tests F séquentiels. Cette étude montre que seulement la contribution du diamètre focal (D) et de l'amplitude (A) est à la fois mais aussi linéaire et quadratique. Ce n'est pas un résultat étonnant, en effet la largeur de la soudure est clairement dépendante de la surface de contact entre le laser et la matière ; les paramètres opératoires qui jouent le plus sur celle-ci sont bien l'amplitude et le diamètre focal.

Table 1.10 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la largeur de la soudures

Source	DL	SC seq	Contrib- ution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	4	0,313378	95,91%	0,31338	0,078344	23,43	0,005
A	1	0,002017	0,62%	0,15289	0,152889	45,71	0,002
D	1	0,081667	24,99%	0,06727	0,06727	20,11	0,011
A²	1	0,154939	47,42%	0,15494	0,154939	46,33	0,002
D²	1	0,074756	22,88%	0,07476	0,074756	22,35	0,009
Erreur	4	0,013378	4,09%	0,01338	0,003344		
Total	8	0,326756	100,00%				

La table 1.10 montre que la principale contribution de l'amplitude (A) est dans son terme quadratique avec 47.42% alors que pour le diamètre focal (D) son terme linéaire contribue à 24.99% d'alors que son terme quadratique contribue à 22.88%. Avec ces résultats est alors possible de modéliser la valeur de l'épaisseur de la soudure par l'équation 1.3.

$$\text{Largeur}(mm) = 17.42 - 13.29A - 44.07D + 4.453A^2 + 77.3D^2 \quad (1.3)$$

Où $D \in [0.25 \text{ mm}, 0.35 \text{ mm}]$, $A \in [1.25 \text{ mm}, 1.75 \text{ mm}]$

La figure 1.10 montre bien l'influence quadratique de l'amplitude, ainsi que le caractère quadratique et linéaire du diamètre focal sur la largeur.

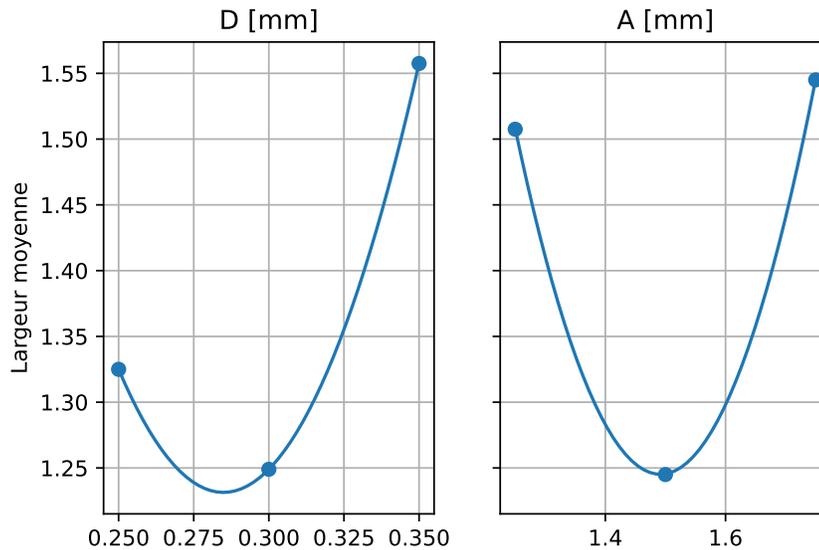


Figure 1.10 – Influence des paramètres de l'amplitude et du diamètre focal sur la largeur de la soudure

Également pour minimiser l'épaisseur il faut prendre les valeurs de l'inflexion de la courbe $W(A)$ et $W(D)$ qui est proche de 1.5 mm pour l'amplitude et 0.28 mm pour le diamètre focal. Lorsque l'amplitude diminue la largeur de la soudure augmente cela peut par être contre-intuitif cependant en diminuant l'amplitude on augmente grandement l'énergie transmise au matériau, ainsi la chaleur se diffuse à la fois vers l'intérieur de l'alliage mais aussi sur les bords du cordon de soudure, ce qui va augmenter la largeur de celui-ci. Pour une amplitude comprise entre 1.25 mm et 1.5 mm son augmentation réduira l'énergie surfacique et ainsi diminuera la largeur de la soudure cependant pour une valeur supérieure à 1.5 mm, le balayage de la source de laser devient prépondérant sur la diffusion de chaleur, ainsi la largeur se remet à augmenter. Pour le diamètre focal il est possible d'appliquer le même raisonnement et d'arriver à une conclusion similaire que pour l'amplitude. Également la valeur de l'amplitude est supérieure à celle de la largeur de la soudure ce qui peut sembler étonnant. Cependant cela peut s'expliquer par la mise en position, le long de la trajectoire du laser provoquée par les oscillations de celui-ci, modifier sa position focale réduisant la puissance transmise au matériau lorsqu'il s'éloigne du milieu de la jointure.

La figure 1.11 montre que la fonction décrite plus haut peut être modélisée par un ensemble d'ellipsoïdes et que plus les valeurs du couple (A, D) sont proches des centres de celle-ci plus la largeur est faible et inversement.

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

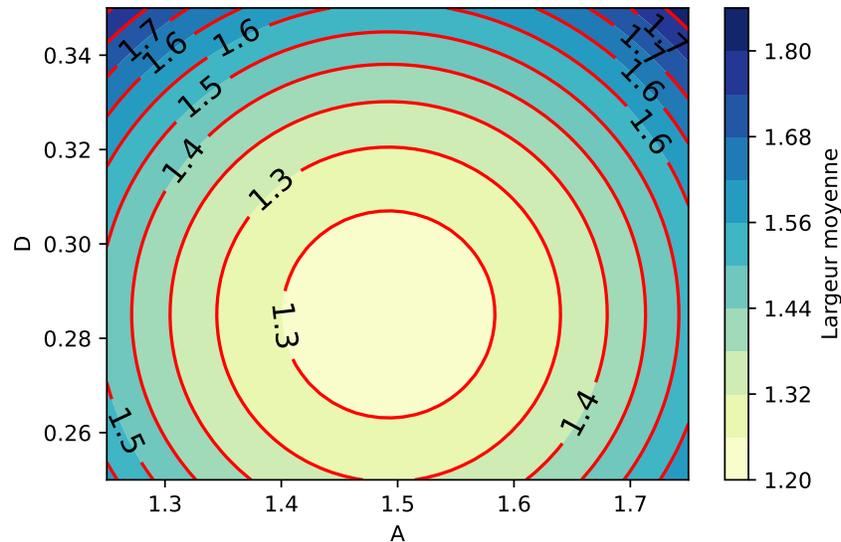


Figure 1.11 – Graphique de contour de l'amplitude et du diamètre focal pour l'épaisseur

3.4 Surface de la soudure

À partir des métallographies de la figure 1.6 il est possible de mesurer la surface de la zone de soudure se trouvant sur la plaque inférieure, supérieure ainsi que celle provenant de l'écoulement du liquide en fusion de la plaque supérieure vers celle inférieure. Pour cela le logiciel image J est utilisé.

Table 1.11 – Valeur des surfaces mesurées

Soudure	1	2	3	4	5	6	7	8
Plaque Inférieure (mm^2)	1.0	0,90	0,70	0,98	1,1	1,1	0,75	0,45
Plaque Supérieure (mm^2)	0,15	0,14	0,18	0,19	0,32	0,22	0,46	0,27
Écoulement (mm^2)	0,29	0,39	0,18	0,32	0,08	0,25	0,41	0,33
Total (mm^2)	1,44	1,44	1,06	1,49	1,49	1,62	1,59	1,08

Le résultat obtenu est alors consigné dans la table 1.11. Les résultats montrent une grande variation de la surface totale de la soudure. Pour les essais 3 et 8 la surface diminue grandement comparée aux autres soudures qui semblent stables. Les deux soudures ont été effectuées avec une amplitude de 1.75 mm ce qui a favorisé l'apparition d'un cordon de soudure large, en effet ce sont les deux plus larges. Cependant l'élargissement de la surface de contact entre le laser et la matière réduit la température du bain de fusion et limite donc sa diffusion dans le matériau ce qui limite la pénétration. En effet le rapport $\frac{\text{Pénétration}}{\text{Largeur}}$ est respectivement 0.614 et 0.693 pour les soudures 3 et 8 alors que la moyenne se trouve à 0.908. La raison de cette baisse de la surface est principalement due à une amplitude

élevée et une faible diffusion de la chaleur dans le matériau. Afin d'apporter des éléments de réponse sur le comportement de la surface du cordon de soudure, une analyse statistique ANOVA est effectuée.

Table 1.12 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la surface

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	6	0,320654	99,84%	0,320654	0,053442	105,56	0,074
P	1	0	0,00%	0,024743	0,024743	48,87	0,09
V	1	0,040007	12,46%	0,042168	0,042168	83,3	0,069
D	1	0,000428	0,13%	0,132839	0,132839	262,4	0,039
A	1	0,087091	27,12%	0,108679	0,108679	214,68	0,043
P²	1	0,06889	21,45%	0,026426	0,026426	52,2	0,088
D.A	1	0,124237	38,68%	0,124237	0,124237	245,41	0,041
Erreur	1	0,000506	0,16%	0,000506	0,000506		
Total	7	0,32116	100,00%				

Les résultats de l'étude sont montrés par le tableau 1.12. Tout d'abord la valeur de p du modèle est supérieure à 0.05 en effet il ne fut pas possible de trouver une combinaison de paramètres opératoires afin de descendre en dessous de cette valeur. Néanmoins il est possible de s'y rapprocher. Il est alors possible de remarquer tout de suite que l'ensemble de la contribution de la puissance se trouve dans son terme quadratique. L'intuition que l'amplitude possédait un rôle important dans la valeur de la surface de la soudure se confirme.

La figure 1.12 représente l'influence de chaque paramètre opératoire sur la valeur finale de la surface. La surface du cordon de soudure diminué de façon quadratique lorsque la puissance augmente, d'après les sections 3.2 et 3.3 la puissance n'influence pas la largeur de la soudure mais la pénétration diminue lorsque la puissance augmente ainsi lorsque la puissance augmente la surface diminue. Un raisonnement similaire est utilisé afin d'expliquer l'influence de la vitesse sur la surface. L'amplitude et le diamètre focal sont deux paramètres interconnectés, en effet les deux possèdent une influence majeure sur la largeur de la soudure. C'est cette influence qui explique leur interaction pour l'étude de la surface de la soudure. Lorsque l'amplitude est de 1.25 mm, l'augmentation du diamètre focale fait accroître la surface, en effet cela augmente légèrement la zone d'interaction laser en matière et ainsi la surface de la soudure. Cependant dans le cas où l'amplitude vaut 1.75 mm, l'augmentation fera diminuer la surface en effet, la variation du paramètre réduira la température globale du bain car la densité énergétique sera plus faible. Cette baisse de température réduira donc la propagation de la chaleur dans le matériau et ainsi réduite la surface finale.

Deuxième remarque qu'il est possible de faire en regardant la table 1.11, la différence de surface entre la plaque inférieure et supérieure. Afin de mieux d'analyser les résultats, les rapports $R_{Supp} = \frac{\text{Surface sur la plaque supérieur}}{\text{Surface total}}$, R_{inf} et R_{ec} sont consignés dans la table 1.13.

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

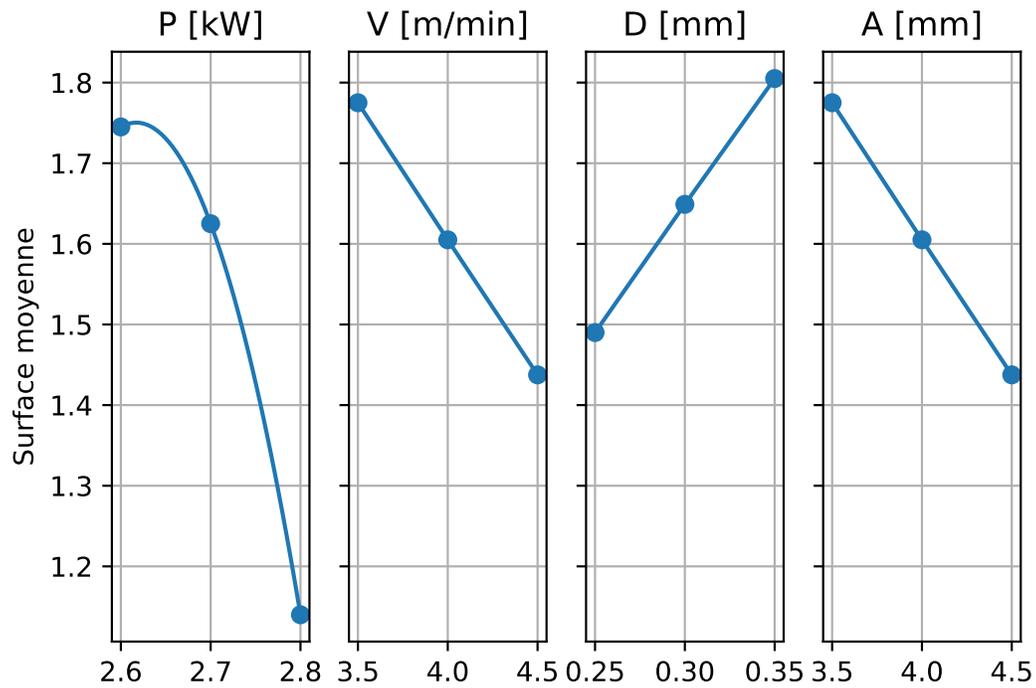


Figure 1.12 – Influence des paramètres sur la surface

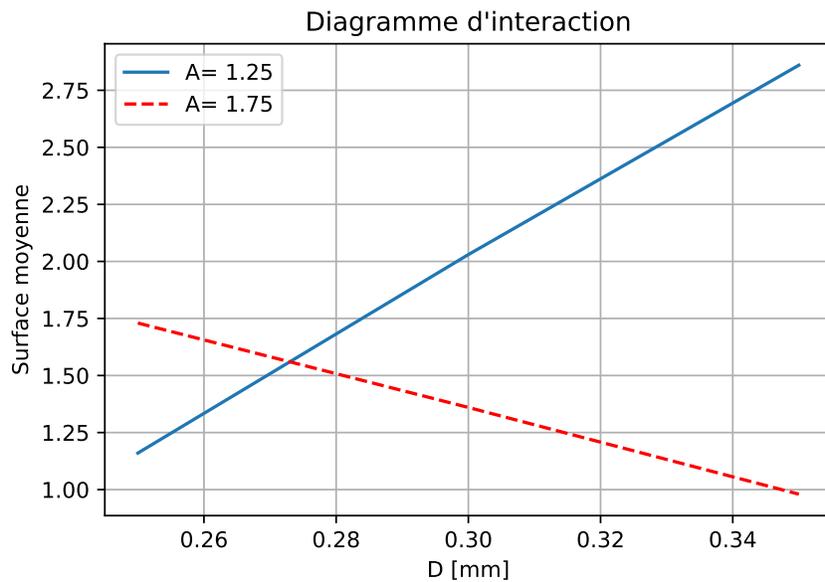


Figure 1.13 – Diagramme d'interaction de l'amplitude et du diamètre focale

Table 1.13 – Valeur des rapports

Soudure	1	2	3	4	5	6	7	8
R_{supp}	10%	10%	17%	13%	22%	14%	29%	25%
R_{inf}	69%	63%	66%	66%	73%	71%	46%	45%
R_{ec}	20%	27%	17%	22%	5%	15%	26%	30%

Les valeurs obtenues sont données par le tableau 1.13. Généralement sur une soudure l'égalité $R_{supp} \sim R_{inf}$ est respectée. Néanmoins dans le cas de cette étude cela n'est pas le cas. Cependant le système décrit par la mise en position utilisée possède une symétrie axiale le long de l'axe du laser cela signifie que théoriquement les paramètres opératoires ne devraient pas avoir d'influence sur les rapports R_{supp} et R_{inf} et devrait être toujours du même ordre de grandeur. Néanmoins cette symétrie est purement théorique et est brisée dès le moment où le centre du laser ne se trouve pas exactement sur la jointure. Dans la pratique il est impossible de positionner le centre du laser sur la jointure, en effet il existe des incertitudes de précision liées au robot mais aussi à l'œil humain. Ainsi les variations dans les rapports R_{supp} et R_{inf} sont dues à une imperfection dans le positionnement du laser lors de la création des échantillons.

3.5 Composition chimique

Afin d'observer comment les éléments chimiques évoluent durant le processus de soudage l'échantillon 1 est soumis à un test à diffraction aux rayons X le long de la soudure, commençant dans le matériau de base, passant par la ZAT et finissant par traverser le cordon de soudure.

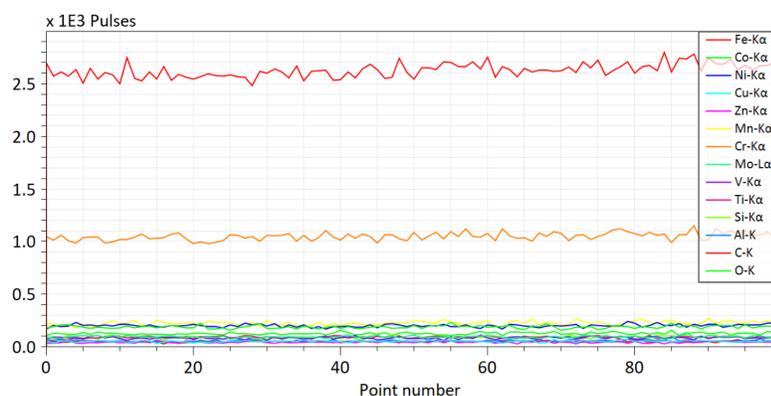


Figure 1.14 – Évolution des éléments chimiques le long de la ligne

La figure 1.14 montre que les différents éléments chimiques restent identiques peu importe la zone observée. Il ne semble pas avoir de diffusion d'atome pendant le procédé. Cela peut s'expliquer par la forte vitesse de refroidissement provoqué par le soudage laser empêchant les éléments de se diffuser dans la zone soudée.

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

3.6 Microdureté

La cartographie de l'essai 9 présent sur la figure 3.21 présente en annexe montre qu'il n'y a presque pas de cordon de soudure. En effet, les paramètres de cet essai étaient proches du minimum requis pour avoir une soudure, ainsi le cordon de soudure était de très faible qualité. Ces graphiques montrent que la zone soudée possède une dureté plus faible que le matériau de base, ce qui confirme les résultats obtenus par [19]. Cela peut être expliquer par la modification de la structure cristalline dans la région de la soudure. Également, les cartographies permettent d'observer la faible zone de transition entre le matériau et le cordon de soudure. La ZAT ne semble pas avoir une grande surface, à l'exception des essais 2, 4 et 6. Cela peut s'expliquer par les bonnes propriétés de soudabilité du matériau, mais aussi par la localité de la source de chaleur. Le laser permet d'échauffer le matériau dans une zone précise, ce qui réduit donc la ZAT. Ce phénomène est une bonne nouvelle pour les capacités mécaniques de la soudure. En effet, la zone où les fractures se forment dans le cas d'une soudure est la ZAT, ainsi la minimiser est une bonne chose. Cependant, il n'est pas évident de mesurer précisément la surface de la ZAT. Néanmoins, afin de mieux voir l'évolution de la dureté dans la ZAT, les courbes à x fixé ont été tracées pour l'essai 1 est représenté par la figure 1.15.

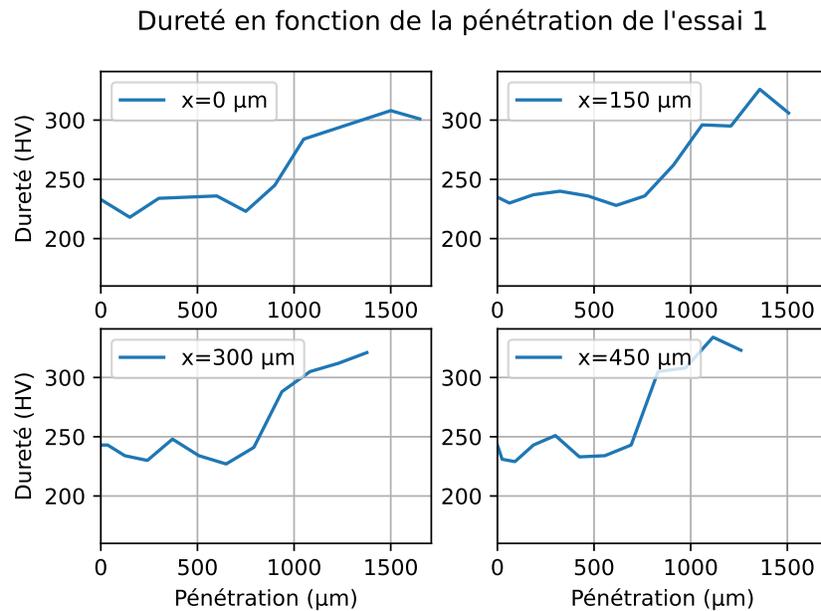


Figure 1.15 – Courbes pour l'essai 1

Ces courbes ne sont pas évidentes à interpréter, afin de mieux les comprendre, il sera intéressant de tracer la moyenne de ces quatre courbes. Cela ne pose pas de problème, en effet ces courbes sont du même ordre de grandeur et ont une tendance similaire. La courbe moyenne de la figure 1.16 ressemble bien aux courbes de la figure 1.15 et possède bien le même ordre de grandeur.

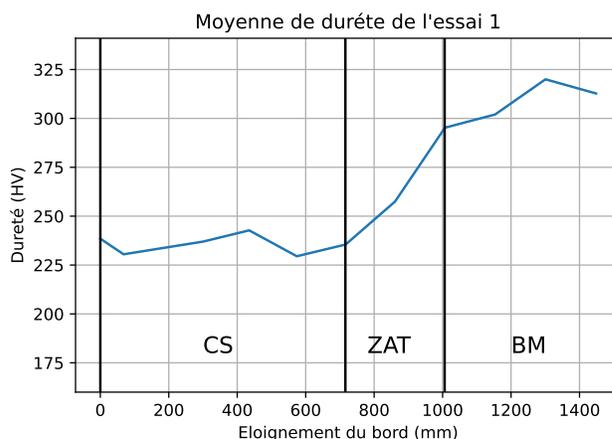


Figure 1.16 – Moyenne de la dureté en fonction de l'éloignement du bord de l'essai 1

Le même protocole est utilisé pour les autres courbes et se trouve en annexe. À l'exception de l'essai 9, les courbes ont une forme similaire. En effet, il y a un palier sur les premiers millimètres qui représente le cordon de soudure, suivi d'une zone de transition pouvant être modélisée par une droite reliant un second plateau qui représente le matériau de base. Cette zone de transition est en réalité la ZAT. On observe une différence de dureté entre le matériau de base et la soudure.

Dureté dans le cordon de soudure

Il est alors possible de mesurer la valeur moyenne de la dureté dans le cordon de soudure. En effet, cela est important à connaître, car il serait intéressant d'avoir une valeur de dureté le plus proche possible de la dureté du matériau de base afin de minimiser les modifications du comportement mécanique. Les mesures ont été retranscrites dans la table 1.14.

Table 1.14 – Valeur mesurée de la dureté de chaque cordon de soudure

Essais	Diamètre fo- cal (mm)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	Puissance (kW)	Amplitude (mm)	Dureté (HV)
1	0,25	3,5	2,6	1,25	235
2	0,25	4,0	2,7	1,50	234
3	0,25	4,5	2,8	1,75	225
4	0,30	3,5	2,7	1,75	220
5	0,30	4,0	2,8	1,25	224
6	0,30	4,5	2,6	1,50	221
7	0,35	3,5	2,8	1,50	236
8	0,35	4,0	2,6	1,75	234
9	0,35	4,5	2,7	1,25	266

Pour les soudures 1 à 8 leurs duretés sont proches de 230 HV ce qui est inférieur à

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

celle du matériau de base. En effet le matériau de base est composé de martensite α' qui possède une dureté supérieure à la structure δ -ferrite qui est prépondérante dans le cordon de soudure. Également d'après la section 3.1 la taille des grains de δ -ferrite varie selon le paramètre opératoire ce qui modifie la dureté. La forme en arborescence de la structure δ -ferrite ainsi que la densité de celle-ci influence grandement la dureté [26]. En effet celle-ci permet de bloquer les diffusions des mouvements de dislocation provoquées par la mesure de la dureté.

Table 1.15 – Résultat de l'étude anova pour la modélisation de la valeur moyenne de la dureté dans le cordon de soudure

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	5	1389,78	97,04%	1389,78	277,96	19,65	0,017
D	1	266,67	18,62%	699,29	699,29	49,43	0,006
V	1	60,17	4,20%	226,64	226,64	16,02	0,028
A	1	322,67	22,53%	158,54	158,54	11,21	0,044
D²	1	533,56	37,25%	733,88	733,88	51,87	0,006
V.A	1	206,72	14,43%	206,72	206,72	14,61	0,032
Erreur	3	42,44	2,96%	42,44	14,15		
Total	8	1432,22	100,00%				

Table 1.16 – Estimateur statistique du modèle pour la valeur moyenne de la dureté

S	R^2	R^2_{ajust}	SomCar-ErrPrév	$R^2_{\text{prédit}}$
5.728	93.13%	81.67%	958.1	33.10

En utilisant la même méthode que pour la modélisation de la pénétration, les facteurs consignés dans la table 1.15 sont significatifs. Ainsi, le diamètre focal (D), la vitesse (V), l'amplitude (A), le carré du diamètre focal (D^2) et le terme croisé (V.A) sont des facteurs ayant une influence sur la dureté. Les autres facteurs ont été éliminés étape par étape afin d'obtenir le modèle le plus précis possible. La valeur de p est de 0.017 ce qui est inférieur à 0.05, le modèle est donc validé. Pour la contribution à la dureté, l'amplitude et le carré du diamètre focal contribuent le plus, respectivement 22.53% et 37.25%. Le diamètre focal et le terme croisé V.A ont une contribution équivalente, valant 18.62% et 14.43%. Finalement, la vitesse seule ne semble pas affectée beaucoup, avec seulement 4.20%. Les valeurs du R^2 classique et ajusté de la table 1.19 sont de 97.04% et 92.10%, ce qui permet d'affirmer que notre modèle semble assez proche des données. Également, la valeur du $R^2_{\text{prédit}}$ est la moins bonne de l'ensemble des trois études statistiques effectuées et vaut 34.77%. L'erreur est faible, ce qui montre qu'aucun facteur n'a été négligé.

Tout comme pour les autres études, une équation mathématique a été déterminée afin de prévoir la valeur de la dureté dans le cordon de soudure.

$$\text{Dureté (Hv)} = 510 - 5108.D + 128.3.V + 296.A + 8567.D^2 - 81.3.V.A \quad (1.4)$$

Où $D \in [0.25 \text{ mm}, 0.35 \text{ mm}]$, $V \in [3.5 \text{ m.min}^{-1}, 4.5 \text{ m.min}^{-1}]$, et $A \in [1.25 \text{ mm}, 1.75 \text{ mm}]$. L'influence de chaque paramètre sur la dureté est donnée par la figure 1.17.

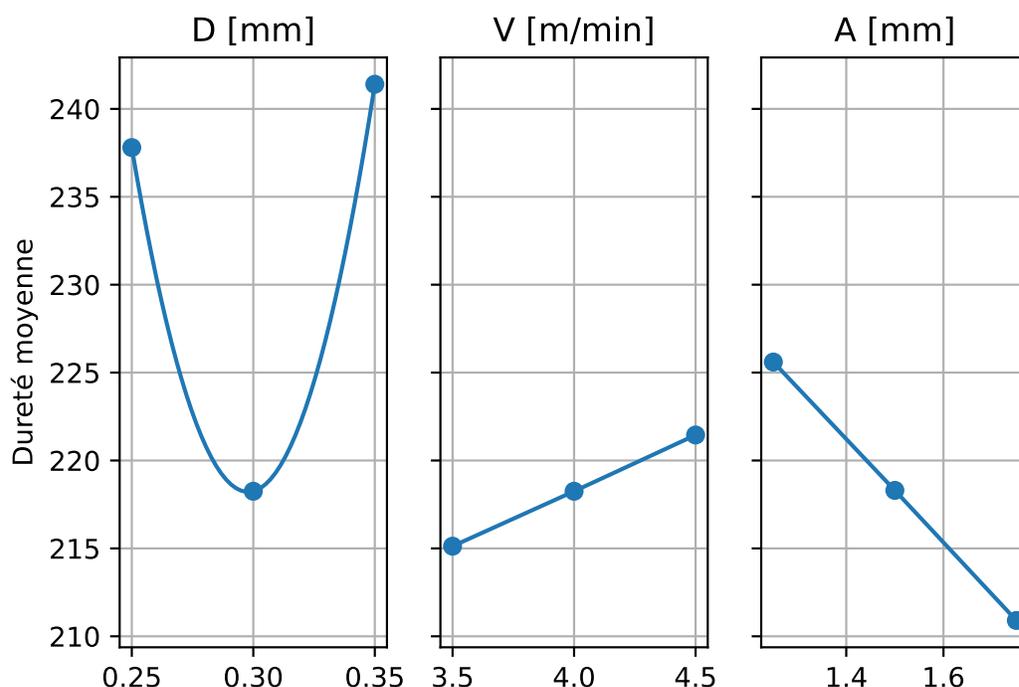


Figure 1.17 – Variation de la dureté en fonction des paramètres opératoires

La figure 1.17 montre l'influence des paramètres opératoire sur la dureté. Mahmoud et al [27] ont montré que pour un apport de chaleur faible (faible puissance et vitesse élevée) la largeur des arborescences diminue. Également la vitesse de refroidissement est aussi un paramètre majeur jouant sur leurs épaisseurs, en effet plus la structure se refroidit rapidement plus elles seront épaisse. La dureté est élevée lorsque les grains sont de petite taille [26]. Pour les valeurs de diamètre focal compris entre 0.25 mm et 0.30 mm le temps de refroidissement est réduit, en effet la surface augmente ; ce qui augmente le temps de refroidissement, engendrant des grains épais, faisant ainsi réduire la dureté. Lorsque le diamètre focal est compris entre 0.30 mm et 0.35 mm son augmentation accroît la dureté, cela est dû à la réduction de l'apport de chaleur, ce qui d'après Mahmoud et al réduirait la largeur des grains.

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

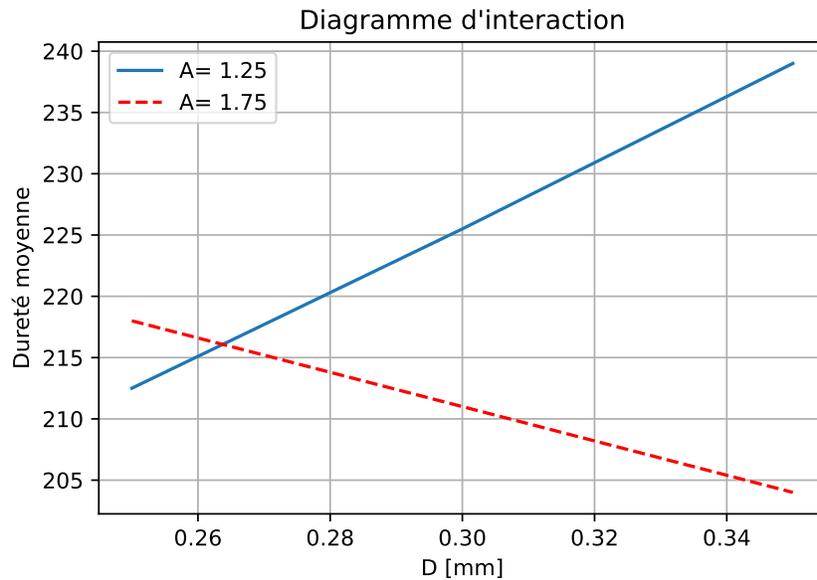


Figure 1.18 – Diagramme d'interaction pour la dureté

L'accroissement de la vitesse se traduit par une réduction de l'apport de chaleur et ainsi une réduction des grains de l'épaisseur des grains de δ -ferrite [23] et la dureté augmentera. Lorsque l'amplitude diminue, cela réduit la surface du cordon et ainsi réduit la quantité de métal en fusion, cela va réduire le temps de refroidissement de celui-ci et créer une microstructure épaisse. Celle-ci fera ainsi diminuer la dureté. La figure 1.18 montre l'interaction entre l'amplitude et la vitesse. Lorsque l'amplitude est de 1.25 mm, l'augmentation de la vitesse provoque une augmentation de dureté. En effet celle-ci augmente parce que l'apport de chaleur diminue. Lorsque l'amplitude est de 1.75 mm, l'augmentation de la vitesse provoque une diminution de la dureté, l'apport de chaleur est plus faible mais la surface aussi qui réduit le temps de refroidissement et augmenter ainsi la taille des grains.

L'idéal serait d'avoir une soudure ayant les mêmes propriétés que le matériau de base. Cependant, lors du procédé de soudage, la valeur de la dureté diminue grandement. Afin de se rapprocher du cas idéal, il faut maximiser la valeur de la dureté. Pour cela, il faut prendre une valeur faible de l'amplitude ainsi que le point d'inflexion de la puissance qui se trouve proche de 2.9 kW. Finalement, pour le diamètre focal, il faut prendre une valeur comprise entre 0.30 mm et 0.35 mm.

Afin de confirmer ces résultats, les graphiques de contours sont consignés dans la figure 1.21.

Afin de maximiser la dureté, il faut prendre une vitesse entre 3.0 m.min^{-1} et 3.50 m.min^{-1} , un diamètre focal de 0.34 mm et 0.35 mm et une amplitude entre 1.3mm et 1.5 mm.

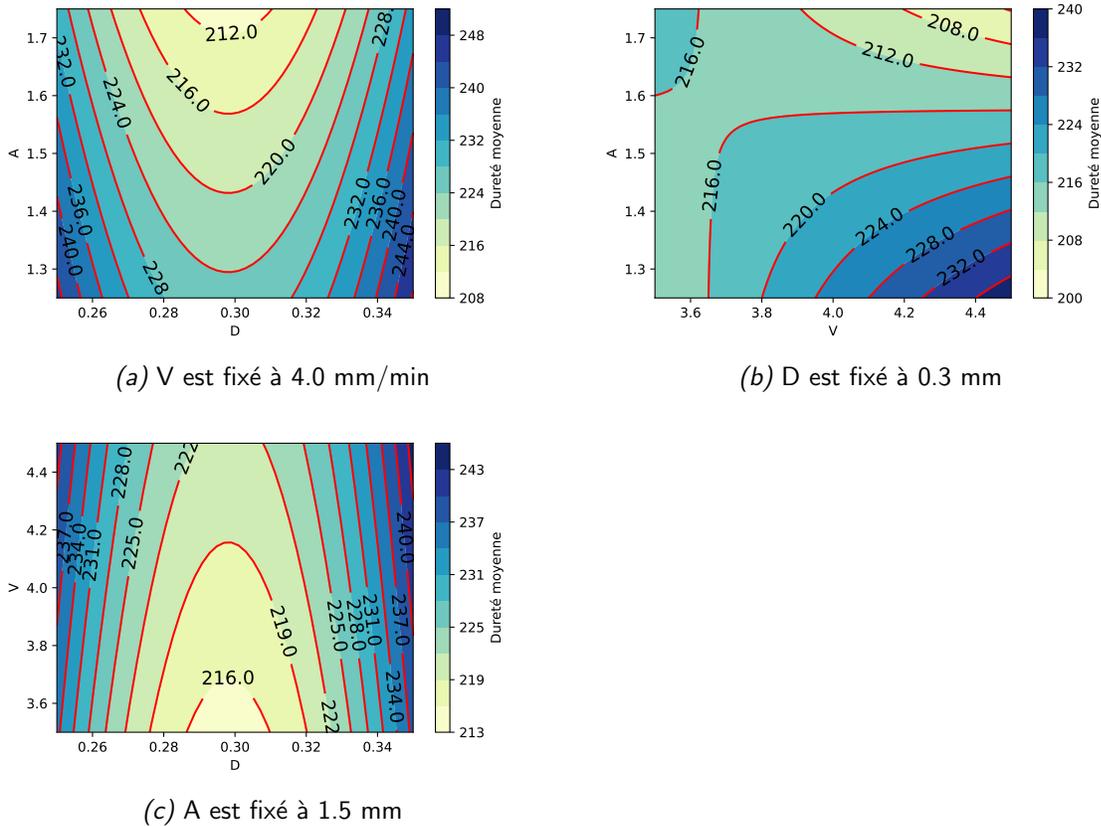


Figure 1.19 – Graphiques de contours pour la dureté en fonction des paramètres opératoires

Épaisseur ZAT

Ces graphiques permettent de montrer la variation de la taille de la ZAT. C'est une information important quant à la qualité de la soudure, car cette zone est la partie la plus fragile du procédé de soudage. Il est ainsi possible d'approximer l'épaisseur de la ZAT.

La table 1.17 consigne les mesures de l'épaisseur de la ZAT. Dans un premier temps, les valeurs de la taille de la ZAT peuvent être regroupées en deux groupes, l'un ayant des valeurs aux alentours de $280 \pm 150 \mu\text{m}$ et l'autre avec des valeurs autour de $430 \pm 150 \mu\text{m}$. Cette différence peut être expliquée par l'imprécision de la méthode de mesure. Comparé aux longueurs en jeu l'épaisseur de la ZAT pour l'ensemble des soudures est négligeable ce qui est du à la forte densité énergétique du procédé et la bonne conductivité thermique des aciers inoxydables austénitiques [28].

En utilisant la même méthode que pour la modélisation de la pénétration, les facteurs consignés dans la table 1.18 sont significatifs. Ainsi, le diamètre focal (D), la puissance (P), l'amplitude (A), mais aussi le carré du diamètre focal (D^2) ainsi que le carré de la puissance (P^2) sont des facteurs significatifs. Les autres facteurs ont été enlevés étape par étape afin d'avoir le modèle le plus précis possible.

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

Table 1.17 – Valeur mesurée de la taille de la ZAT de chaque cordon de soudure

Essais	Diamètre focal (mm)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	Puissance (kW)	Amplitude (mm)	Taille ZAT (μm)
1	0,25	3,5	2,6	1,25	290±150
2	0,25	4.0	2,7	1,50	289±150
3	0,25	4,5	2.8	1,75	426±150
4	0,30	3,5	2,7	1,75	432±150
5	0,30	4.0	2.8	1,25	426±150
6	0,30	4,5	2,6	1,50	436±150
7	0,35	3,5	2.8	1,50	292±150
8	0,35	4.0	2,6	1,75	283±150

Table 1.18 – Résultat de l'étude anova pour la modélisation de la taille de la ZAT

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	5	148491	95,87%	148491	29698	13,94	0,027
D	1	30817	19,90%	52385	52385	24,59	0,016
P	1	3038	1,96%	27898	27898	13,1	0,036
A	1	30104	19,44%	30104	30104	14,13	0,033
D²	1	56448	36,45%	56448	56448	26,5	0,014
P²	1	28084	18,13%	28084	28084	13,18	0,036
Erreur	3	6391	4,13%	6391	2130		
Total	8	154882	100,00%				

Table 1.19 – Récapitulatif du modèle de la taille de la ZAT

S	R carré	R carré (ajust)	SomCar-ErrPrév	R carrés (préd)
46.2	95.87%	89%	0,274003	60.34%

En effet, le modèle possède une valeur de $p < 0.05$. Les paramètres opératoires ont pour contribution ; 36.45% pour D^2 , 19.90% pour D , 19.44% pour A ainsi que 18.13% pour P^2 . Cependant, la puissance ne contribue qu'à 1.96%, ce qui signifie que la principale contribution de la puissance se trouve dans son terme quadratique. Les valeurs du R^2 classique et ajusté de la table 1.19 sont de 95.87% et 89%, ce qui permet d'affirmer que notre modèle semble assez proche des données. Également, la valeur du $R^2_{\text{prédit}}$ est meilleure que celle obtenue pour la pénétration et vaut 60.34%. L'erreur est faible, ce qui montre qu'aucun facteur n'a été négligé.

Il est alors possible de donner un modèle mathématique capable de prédire l'épaisseur

de la ZAT.

$$\text{Épaisseur de la ZAT (mm)} = 80.1 + 38.39D - 63.8P + 0.2833A - 67.2D^2 + 11.85P^2 \quad (1.5)$$

Où $D \in [0.25 \text{ mm}, 0.35 \text{ mm}]$, $P \in [2.6 \text{ kW}, 2.8 \text{ kW}]$ et $A \in [1.25 \text{ mm}, 1.75 \text{ mm}]$. Il est aussi possible de tracer l'influence de chaque paramètre sur l'épaisseur de la ZAT. Ces courbes sont représentées dans la figure 1.20.

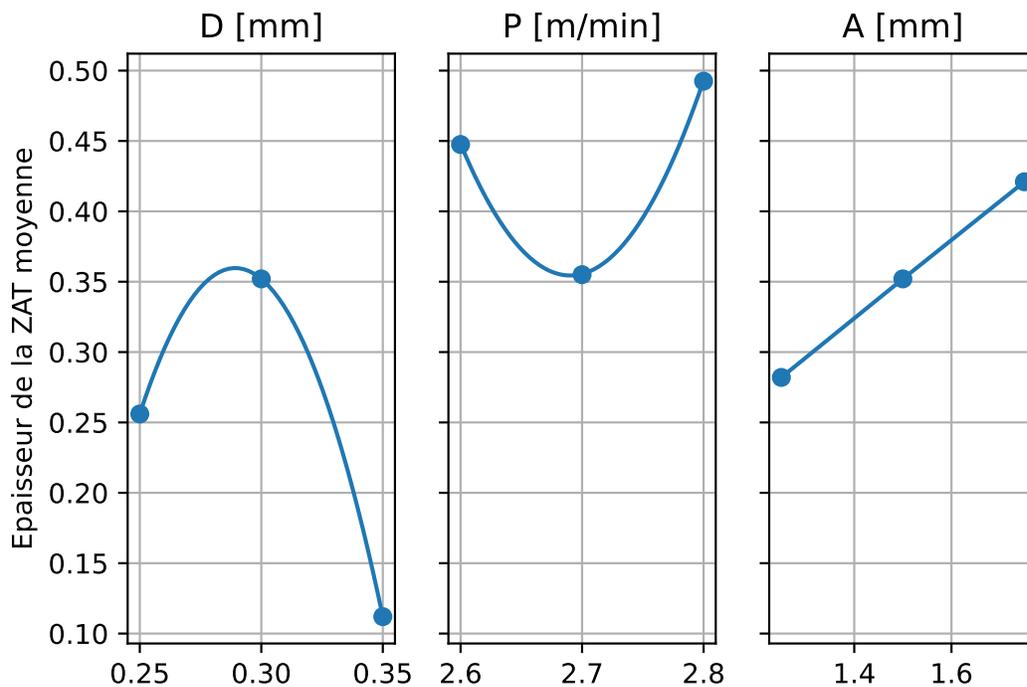


Figure 1.20 – Variation de l'épaisseur de la ZAT en fonction des paramètres opératoires

L'augmentation de l'amplitude se traduit par une diminution de la densité d'énergie et ainsi augmentée la taille de la ZAT [28]. De la même façon si la puissance diminue la densité énergétique cependant si la puissance devient trop élevée alors la température moyenne du bain de fusion se rapprochera de la température de fusion de l'acier et augmentera la diffusion de chaleur dans le métal de base ; augmentant la taille de ZAT. Pour des valeurs de diamètre focal compris entre 0.25mm et 0.30 mm, l'épaisseur augmenterait, en effet l'augmentation de ce paramètre diminuera la densité énergétique. Cependant à partir de 0.3 mm, l'augmentation du diamètre focale provoquera une diminution de l'épaisseur de la ZAT. Si celui-ci augmente, la densité énergétique diminue tout comme la température du bain de fusion, provoquant une réduction de la diffusion de chaleur dans le matériau de base. De la même façon si l'amplitude augmente, la densité d'énergie diminue en favorisant une ZAT épaisse. Afin de minimiser l'épaisseur de la ZAT, il faut prendre une valeur minimum de

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

l'amplitude et prendre la valeur de la puissance proche de son point d'inflexion, alors que pour le diamètre focal, il faut prendre une valeur élevée. Ces résultats semblent cohérents.

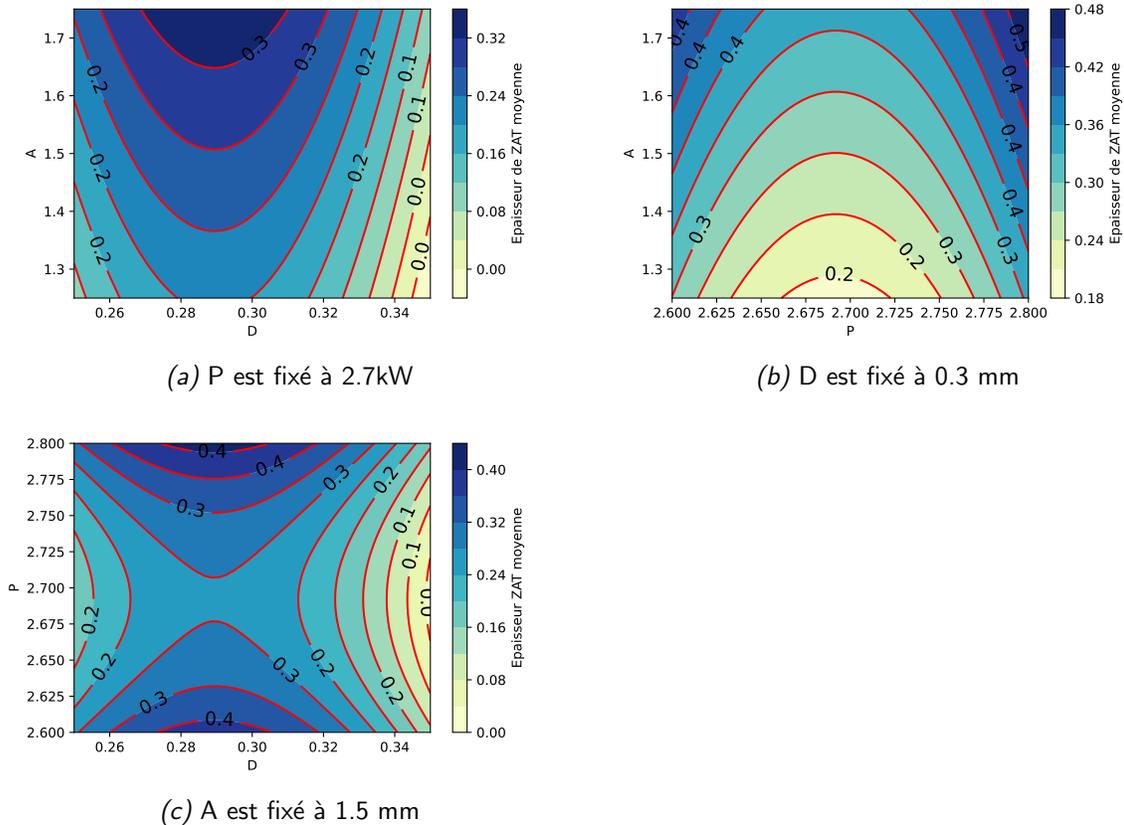


Figure 1.21 – Graphiques de contours pour l'épaisseur de la ZAT en fonction des paramètres opératoires

Afin d'augmenter la qualité de la soudure, il faut minimiser l'épaisseur de la ZAT. Au vu des graphiques de la figure ??, il faut d'abord choisir les valeurs de l'amplitude et de la puissance de sorte à être dans la zone bleue. Dans ce cas, il faut une puissance comprise entre 2.65 kW et 2.73 kW, ainsi qu'une valeur de l'amplitude inférieure à 1.3 mm. Finalement, il ne reste plus qu'à choisir une valeur du diamètre focal. D'après le graphique, il faut prendre une des deux valeurs extrêmes de l'intervalle du diamètre focal. Quant à la vitesse, étant donné qu'elle n'a pas un rôle significatif dans la modélisation de l'épaisseur de la ZAT, il suffit de prendre une valeur quelconque de l'intervalle. Néanmoins, ce facteur influence sûrement sur d'autres aspects physiques de la soudure.

Cependant, ces valeurs ne sont pas d'une haute précision, car elles dépendent de la distance entre deux mesures, soit théoriquement 150 μm dans notre cas. Cependant, il arrive que la machine de mesure fasse un léger écart entre la valeur consignée et la réalité. Les valeurs mesurées de la ZAT sont à prendre dans un intervalle de $\pm 150 \mu\text{m}$. De plus, la courbe sur laquelle on effectue des mesures est une moyenne, ce qui augmente aussi

l'incertitude de mesure. Néanmoins, cela peut donner un bon ordre de grandeur de la taille de la ZAT. Malheureusement, il n'est pas possible d'appliquer cette méthode pour avoir un ordre de grandeur de la pénétration. En effet, la première mesure ne se fait pas sur le bord même du cordon de soudure afin d'éviter des effets de plasticité liés au bord du matériau, mais aussi au fait que pour mesurer la pénétration, il est nécessaire d'obtenir avec précision une mesure au centre du cordon, ce qui n'est pas possible.

4 Conclusion

Cette étude avait pour objectif de déterminer des paramètres opératoires pour le soudage en angle de plaque d'acier AISI 301LN. Durant cette étude plusieurs résultats ont été trouvés :

- Dans le cordon de soudure, la structure cristalline δ -ferrite a été retrouvée ce qui suggère une transformation allotropique de la ferrite en austénite suivant le mode de solidification FA. Également les structures de δ -ferrite semblent suivre les lignes de fusion. Elle rétrécit plus elles se rapprochent du bord du cordon de soudure, jusqu'à disparaître dans la ZAT.
- À l'aide des métallographies obtenues il fut possible de mesurer la pénétration des différentes soudures. L'analyse ANOVA a permis de montrer que l'amplitude des oscillations du laser a une faible influence sur la pénétration et que le diamètre focal est inversement proportionnelle à celle-ci. Également il semblerait que la puissance et la vitesse du laser interagissent entre eux. Finalement afin de maximiser la pénétration l'étude statistique a montré qu'il faut paramétrer le diamètre focal sur 0.25 mm, prendre une vitesse de 3.5 m.min^{-1} et une puissance de 2.8 kW.
- De la même méthode que pour le point précédent il fut possible de mesurer la largeur de la soudure. L'analyse ANOVA a démontré que seulement le diamètre focal et l'amplitude avaient un rôle à jouer sur la largeur de la soudure. Également comme il fut possible d'exprimer la largeur comme une fonction de deux variables, A et D, il était facile de représenter celle-ci dans un graphique. Celui-ci montre que pour obtenir une grande valeur de l'épaisseur il fallait prendre des valeurs extrêmes pour A et D. Et pour minimiser la largeur il fallait prendre le point d'inflexion de la courbe $W(A)$ et $W(D)$ qui sont respectivement 1.50mm et 0.28 mm.
- La dernière mesure qui a été effectuée sur les métallographies est la surface de la soudure. La soudure a été séparée en trois parties, celle sur la plaque supérieure, celle sur la plaque inférieure et celle sur celui provoqué par l'écoulement du métal solide. Une analyse statistique ANOVA a été effectuée sur la surface totale cependant la valeur de p était supérieure à 0.05 ce qui rend le modèle non valide, néanmoins comme cette valeur est proche de 0.05, il sera considéré comme valide mais une étude ultérieure permettrait de confirmer les conclusions de celle-ci. La puissance et l'amplitude et le diamètre focal sont les paramètres ayant la plus grande influence sur la surface.
- À l'aide de la cartographie de la dureté du cordon de soudure il fut possible de mesurer approximativement l'épaisseur de la ZAT. L'analyse ANOVA a montré que

1. Étude paramétrique sur le soudage laser de l'acier inoxydable 301LN en configuration de joint à recouvrement.

le diamètre focal, la puissance ainsi que l'amplitude sont les paramètres opératoires ayant la plus grande influence. Afin de minimiser celle-ci il faut prendre une valeur de puissance entre 2.65 kW et 2.73 kW, une valeur d'amplitude de 1.3mm ainsi qu'un diamètre focal de 0.25mm ou de 0.35mm

- Finalement les mêmes cartographies on permit de mesurer la valeur de la dureté dans le cordon de soudure. L'analyse ANOVA à montré que les paramètres les plus influant sur cette propriété sont le diamètre focal et l'amplitude. Et afin de maximiser celle-ci il faut prendre une vitesse entre 3.0 m.min^{-1} et 3.50 m.min^{-1} , un diamètre focale de 0.34 mm et 0.35 mm et une amplitude entre 1.3mm et 1.5 mm

Bibliographie

- [1] M. S. Haque, K. Moeed, and M. Z. Zaka, "Laser welding of thermoplastics – A review," *Materials Today : Proceedings*, vol. 64, pp. 1479–1485, 2022.
- [2] G. Moskvitin, A. Polyakov, and E. Birger, "Application of laser welding methods in industrial production," *Welding International*, vol. 27, pp. 572–580, July 2013.
- [3] T. Lei, Y. Rong, J. Xu, and Y. Huang, "Experiment study and regression analysis of molten pool in laser welding," *Optics & Laser Technology*, vol. 108, pp. 534–541, Dec. 2018.
- [4] H. B. Cary, "Modern welding technology,"
- [5] B. Ma, X. Gao, Y. Huang, P. P. Gao, and Y. Zhang, "A review of laser welding for aluminium and copper dissimilar metals," *Optics & Laser Technology*, vol. 167, p. 109721, Dec. 2023.
- [6] M. J. Cieslak and P. W. Fuerschbach, "On the weldability, composition, and hardness of pulsed and continuous Nd :YAG laser welds in aluminum alloys 6061,5456, and 5086," *Metallurgical Transactions B*, vol. 19, pp. 319–329, Apr. 1988.
- [7] J. R. Berretta, W. De Rossi, M. David Martins Das Neves, I. Alves De Almeida, and N. Dias Vieira Junior, "Pulsed Nd :YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 45, pp. 960–966, Sept. 2007.
- [8] Y. Zhang, R. Kovacevic, and L. Li, "Characterization and real-time measurement of geometrical appearance of the weld pool," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, pp. 799–816, July 1996.
- [9] J. Fu, Y. Yang, and J. Guo, "Formation of a blocky ferrite in Fe–Cr–Ni alloy during directional solidification," *Journal of Crystal Growth*, vol. 311, pp. 3661–3666, July 2009.
- [10] T. Takalo, N. Suutala, and T. Moision, "Austenitic solidification mode in austenitic stainless steel welds," *Metallurgical Transactions A*, vol. 10, pp. 1173–1181, Aug. 1979.
- [11] N. Suutala, T. Takalo, and T. Moision, "Ferritic-austenitic solidification mode in austenitic stainless steel welds," *Metallurgical Transactions A*, vol. 11, pp. 717–725, May 1980.

- [12] A. Iltaf, N. Barka, and S. Dehghan, "Effect of Ag interlayer on the microstructural properties and nanocreep behavior of Ti6Al4V/AA7075 dissimilar laser weldments," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L : Journal of Materials : Design and Applications*, p. 14644207241243351, Mar. 2024.
- [13] A. Iltaf, S. Dehghan, N. Barka, and C. Belzile, "Laser butt welding of AA7075 aluminium alloy and Ti6Al4V titanium alloy using a Cu interlayer," *Materials Science and Technology*, p. 02670836241235847, Feb. 2024.
- [14] P. M. O. Silva, M. C. C. Filho, J. A. Da Cruz, A. J. M. Sales, A. S. B. Sombra, and J. M. R. S. Tavares, "Influence on Pitting Corrosion Resistance of AISI 301LN and 316L Stainless Steels Subjected to Cold-Induced Deformation," *Metals*, vol. 13, p. 443, Feb. 2023.
- [15] M. Rezayat, M. Morales, M. Moradi, and A. Mateo, "Laser wobbling surface texturing of AISI 301LN steel for enhancement of the corrosion resistance at high temperature," *Optics & Laser Technology*, vol. 171, p. 110375, Apr. 2024.
- [16] S. Gnanasekaran, S. Senthil Kumar, N. Venugopal, M. Upadhyaya, T. Manjunath, S. J. S. Chelladurai, and G. Padmanaban, "Effect of laser power on microstructure and tensile properties of pulsed Nd :YAG laser beam welded AISI 301 austenitic stainless steel joints," *Materials Today : Proceedings*, vol. 37, pp. 934–939, 2021.
- [17] P. Farhadipour, N. Omid, N. Barka, F. Nadeau, M. Idriss, and A. E. Ouafi, "Systematic approach to improve overlap laser welding of AA5052-H32 with dissimilar thickness by evaluation of mechanical performance, undercut, and welding penetration," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 130, pp. 3387–3399, Feb. 2024.
- [18] M. Rezayat, A. Mateo, and J. J. Roa, "Exploring the Effects of Laser Surface Modification on AISI 301LN Steel : A Micro-Mechanical Study," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, p. 191, Oct. 2023.
- [19] A. Järvenpää, M. Jaskari, M. Keskitalo, K. Mäntyjärvi, and P. Karjalainen, "Microstructure and mechanical properties of laser-welded high-strength AISI 301LN steel in reversion-treated and temper-rolled conditions," *Procedia Manufacturing*, vol. 36, pp. 216–223, 2019.
- [20] H. Wang, Y. Wang, X. Li, W. Wang, and X. Yang, "Influence of Assembly Gap Size on the Structure and Properties of SUS301L Stainless Steel Laser Welded Lap Joint," *Materials*, vol. 14, p. 996, Feb. 2021.
- [21] N. Barka and S. S. Karganroudi, "Étude des effets des paramètres de soudage laser fibre continu-application à l'acier AISI 304L soudé selon différentes configurations,"
- [22] M. Germa, "Initiation à l'analyse de variances," *Qualité et sécurité au laboratoire*, Apr. 2015.
- [23] A.-M. El-Batahgy, "Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels," *Materials Letters*, vol. 32, pp. 155–163, Aug. 1997.

- [24] L. E. Dos Santos Paes, M. Pereira, W. L. Weingaertner, A. Scotti, and T. Souza, "Comparison of methods to correlate input parameters with depth of penetration in LASER welding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, pp. 1157–1169, Apr. 2019.
- [25] Y. Kawahito, M. Mizutani, and S. Katayama, "Elucidation of high-power fibre laser welding phenomena of stainless steel and effect of factors on weld geometry," *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 40, pp. 5854–5859, Oct. 2007.
- [26] M. Rezayat, H. Besharatloo, and A. Mateo, "Investigating the Effect of Nanosecond Laser Surface Texturing on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 301LN," *Metals*, vol. 13, p. 2021, Dec. 2023.
- [27] E. R. I. Mahmoud, H. Almohamadi, A. Aljabri, and M. A. Elkotb, "A Study on the Fiber YAG Laser Welding of 304L Stainless Steel," *Metals*, vol. 11, p. 2022, Dec. 2021.
- [28] A. Kurc-Lisiecka and A. Lisiecki, "Laser welding of stainless steel," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 1, pp. 32–40, Jan. 2020.

Chapitre 2

Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

Résumé

Cette étude se concentre sur l'impact de la puissance et de la vitesse sur le comportement mécanique d'un assemblage soudée en angle de l'acier AISI 301LN. La méthode Taguchi a permis de réduire le nombre d'essais au minimum. Pour chaque couple de paramètres deux répétitions ont été effectuées. Les résultats ont été mesurés sur chaque courbe puis moyennés. L'analyse de courbe de traction montre que les paramètres opératoires exercent bien une influence. Une étude statistique ANOVA sur les propriétés mécaniques est effectuée afin de déterminer l'influence des paramètres opératoires. La pente à l'origine semble être légèrement impactée par ceux-ci. La vitesse joue un rôle majeur sur la limite élastique. Un modèle est développé afin de la décrire en fonction des paramètres opératoires avec une précision d'environ 93%. La limite en traction peut être maximisée en minimisant la puissance et la vitesse. L'allongement avant la rupture des assemblages est bien inférieur à celle du matériau de base, passant de 28% à moins de 2%. Un modèle a aussi été construit avec une précision supérieure à 99%. La vitesse est le paramètre ayant la plus grande influence sur l'énergie d'absorption, également comme pour l'allongement et la limite élastique un modèle mathématique est construit avec une précision de 97%. Pour améliorer le comportement mécanique de l'assemblage la puissance doit se rapprocher de 2.6kW et la vitesse doit être comprise entre 3.0 m.min^{-1} et 3.7 m.min^{-1} . Finalement le modèle de Ramberg-Osgood est utilisé pour modéliser le comportement mécanique avec une précision de 99.7% en moyenne. À l'aide de celui-ci l'énergie d'absorption est calculée analytiquement et comparée avec celle obtenue expérimentalement. Il s'avère que le modèle théorique donne une valeur inférieure à la réalité d'environ 10%. Cet écart s'explique par le fait que les équations ne modélisent pas la rupture.

Mot clé :

1 Introduction

L'acier inoxydable 301LN de type chrome-nickel possède une très bonne résistance mécanique à froid ainsi qu'une excellente résistance à la corrosion. Cela en fait un alliage polyvalent, qui est souvent utilisé dans des domaines tels que l'aéronautique, l'architecture ou bien l'infrastructure ferroviaire. Il est aussi connu pour ses bonnes propriétés de soudabilité avec les procédés classiques. Cependant il est nécessaire de prêter une attention particulière à la fissuration à chaud [1].

L'utilisation de la technologie du laser s'est vu trouver beaucoup d'application dans le secteur industriel. De récent développement de celle-ci, à permis d'utiliser le soudage laser sur des aciers fortement résistants, en effet celle-ci permet d'avoir une plus grande flexibilité, vitesse de soudure, une meilleure qualité du cordon de soudure, une faible zone affectée thermiquement (ZAT), une faible déformation thermique [2]. Néanmoins le faible rayon de la source laser impose de positionner avec précision les éléments à souder. Afin de limiter ce problème il est possible de rajouter un métal d'apport, cependant cela peut modifier grandement les propriétés mécaniques de la soudure. Sans le métal d'apport il est aussi possible d'utiliser un laser oscillant afin d'augmenter la surface de l'alliage échauffé [3]. Dans le cas du soudage laser d'acier inoxydable, sans oscillation de la source, un cratère a été observé [4].

Néanmoins la technologie du soudage laser n'est pas parfaite comme le montre Katayama [5] le refroidissement rapide de la soudure, est la principale source de fissuration à chaud dans le cadre du soudage d'acier inoxydable austénitique. La qualité de la soudure peut être améliorée en faisant osciller la source laser jusqu'à 200Hz [6]. Cela augmente la tolérance de l'écartement entre les deux plaques de 0.3mm et l'épaisseur de 25%. Néanmoins l'oscillation de la tête laser n'est pas parfaite. L'oscillation de la source laser à une fréquence comprise entre 100-200Hz rend le soudage des aciers instables car le métal liquide sera projeté en dehors du bain de fusion dû au mouvement rapide du faisceau laser [7]. Une légère oscillation de 5Hz de la source laser permet de réduire la fissuration des soudures d'alliage [8]. Également l'ajout de cette oscillation trouve aussi une utilité dans le monde industriel, en effet le coefficient de sécurité pourrait être accru grâce à l'élargissement de la soudure provoqué par l'oscillation de la tête laser [9]. Afin d'améliorer la qualité générale des soudures fabriquées avec ce procédé la réduction de la puissance ou l'augmentation de la vitesse du laser permettrait de stabiliser le bain de fusion afin de réduire le nombre d'éclaboussures [10]. Dans le cadre des études scientifiques du soudage laser de l'acier AISI 301LN, la plupart des études traitent seulement de la mise en position en bout à bout ou en superposition.

Les propriétés mécaniques d'un assemblage soudé dépend principalement aux propriétés du cordon de soudure et de la ZAT [11]. Il est également difficile d'utiliser la méthode de résolution par élément fini car celle-ci demande une connaissance précise de la réponse contrainte-déformation du cordon de soudure, ce qui n'est pas facile à déterminer. La limite en traction et élastique d'acier inoxydable austénitique est affectée par la quantité de grain de ferrite ainsi que sa ductilité. La composition chimique joue aussi un rôle sur les propriétés

physiques spécifiquement le soufre qui fait diminuer les propriétés mécaniques [12]. La présence de fissuration à chaud et microfissure sont à l'origine d'une diminution des propriétés mécaniques [13, 12]. Pour mieux comprendre la solidification dans le cordon de soudure, un modèle multiéchelle est développé, permettant de prédire la forme des microstructures [14]. Les paramètres opératoires ont une influence importante sur la qualité d'une soudure. La qualité du cordon de soudure peut être définie par sa géométrie, ces propriétés mécaniques ainsi que sa réponse aux contraintes [15]. Afin d'obtenir une soudure de bonne qualité, les propriétés mécaniques doivent être contrôlées. La géométrie du cordon de soudure joue un rôle important sur les propriétés mécaniques [16]. Des facteurs indirects aux paramètres opératoires tels que le taux de refroidissement affectent les propriétés mécaniques. Un refroidissement rapide favorise une faible microstructure et ce qui implique une amélioration des propriétés mécaniques [17].

Cependant dans le milieu industriel il est courant de trouver des soudures en angle qui sont rarement étudiées dans le cadre théorique. L'objectif de cet article est de déterminer les paramètres opératoires permettant d'obtenir des propriétés mécaniques similaires que le matériau de base. En effet généralement dans le cas du soudage, le cordon ou la zone affectée thermiquement (ZAT) sont les parties fragiles de l'assemblage. Ce qui donne des résultats plus faibles que le matériau de base dans le cas des tests mécaniques. Néanmoins les bonnes propriétés de soudabilité du 301LN additionner à la localité de la source de chaleur du soudage laser lui donne l'avantage d'avoir une faible épaisseur de la ZAT.

Seulement deux paramètres opératoires seront étudiés dans le cadre de cette étude ; la puissance du laser et la vitesse de déplacement. Chacun des paramètres opératoires possédera trois niveaux. À l'aide de la méthode d'expérimentation de Taguchi, une table $L_9(3^4)$ sera créée afin de minimiser le nombre de soudures à effectuer. Ainsi chaque couple de paramètres effectuera un test de résistance en traction afin d'obtenir une loi de comportement $\sigma(\epsilon)$. À l'aide de cette loi il sera alors possible de déterminer la zone d'élasticité et de plasticité de chaque soudure. Également une analyse statistique ANOVA sera effectuée afin de connaître l'influence des paramètres opératoires sur ces propriétés mécaniques. Il sera alors aussi possible de s'intéresser à d'autres propriétés telles que la limite en traction et l'allongement avant la rupture. L'énergie d'absorption sera aussi calculée à la fois numériquement et analytiquement à l'aide du modèle de Ramberg-Osgood. Pour l'analyse ANOVA, nous commencerons par déterminer les paramètres ayant une influence sur les données testées en utilisant la méthode séquentielle F ; les facteurs ayant une valeur p (probabilité que l'élément testé n'influence pas la donnée) trop élevée sont éliminés un à un jusqu'à obtenir une valeur de p inférieur à 0.05.

2 Méthodologie

Dans cette étude l'acier AISI 301LN est étudié. La composition chimique du constructeur est donnée par la table 2.1. Les propriétés mécaniques du matériau sont consignées dans la table 2.2. Un laser Nd :YAG équipé d'une source laser IPG Photonics YLS3000 avec un voltage de 600 V et une longueur d'onde de 1070 nm est utilisé pour effectuer les soudures. La puissance maximum du laser est de 3.0 kW.

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

Table 2.1 – Composition chimique à partir de la base de donnée MakeltFrom

Fe	Cr	Ni	Mn	Si	N	P	C	S
équilibre	16-18 %	6-8%	2	1%	0.07 -0.20%	0.05%	0.03	0.03

Table 2.2 – Propriétés mécaniques, [18]

Résistance en traction	Limite élastique	Élongation avant rupture
520 MPa	209 MPa	28%

La tête laser est montée sur un bras robotiser FANUC ayant une précision de 0.07 mm. Pour le processus de soudage, une fibre optique Nd :YAG, d'un diamètre de 200 μm est utilisé. La figure 2.1 montre le bras robotique qui est utilisé durant les essais.

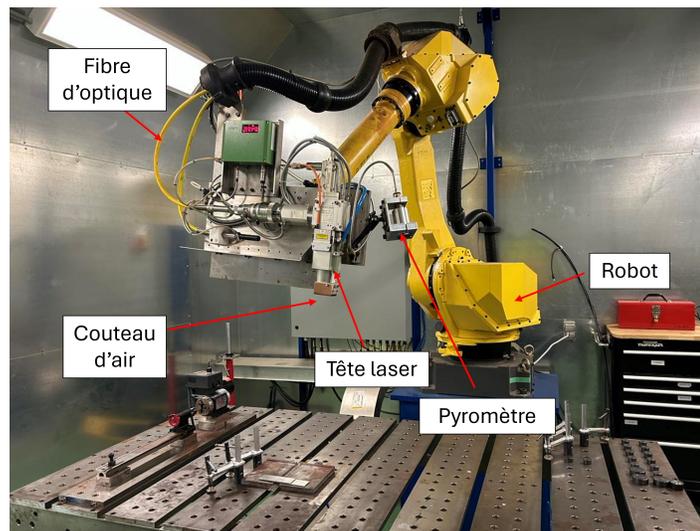


Figure 2.1 – Bras robotique utilisé durant les essais

Afin d'augmenter la surface d'interaction de laser-matière, le scanner DC ILV est installé sur la tête laser. C'est un appareil capable de faire osciller le faisceau laser. Dans cette étude les oscillations sont sinusoïdales, avec une fréquence de 150 Hz et une amplitude 1.5 mm. La mise en position utilisée est représentée sur la figure 2.2. Pour éviter des effets de bords et s'assurer que le faisceau laser atteigne sa puissance et vitesse nominale, celui-ci commencera sa trajectoire avant d'atteindre la jointure des deux plaques et finira après. Si cela n'est pas respecté, il se peut que sur les bords de la trajectoire du laser, des défauts de soudure tels qu'un manque de fusion ou de la porosité soient retrouvés dans la soudure. Ces défauts peuvent fragiliser le cordon et influencer son comportement mécanique. Les plaques qui sont soudées ont pour dimension 100X35 mm et une épaisseur de 2.0 mm.

Dans cette étude seulement l'influence de la puissance et de la vitesse sont étudiées. Pour chaque paramètre trois valeurs ont été retenues et sont consignées dans la table 2.3.

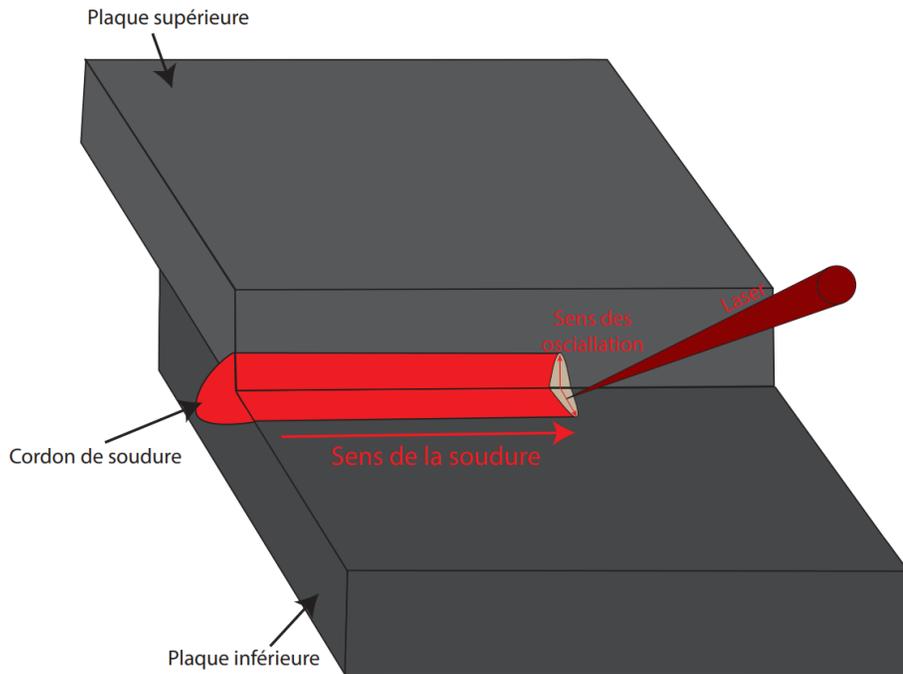


Figure 2.2 – Coupe de la mise en position

Table 2.3 – Paramètres opératoires

Paramètres	niveau 1	niveau 2	niveau 3
Vitesse	3.0 m.min^{-1}	4.0 m.min^{-1}	5.0 m.min^{-1}
Puissance	2.6 kW	2.8 kW	3.0 kW

Pour réduire le nombre d'essais, la méthode de désign d'expérience Taguci est utilisée. Dans ce cas la table qui convient le mieux est la $L_9(3^2)$, elle est représentée en table 2.4. Pour chaque couple de paramètres une énergie linéique H définit par le rapport de la puissance sur la vitesse.

La machine d'essai en traction MTS810 est utilisée afin d'effectuer des essais à température ambiante. L'étude présente la moyenne des deux mesures effectuées pour chaque couple de paramètres. Les essais sont effectués avec une vitesse de déformation de 0.004 s^{-1} [19]. Comme les contraintes (σ) sont localisées au niveau de la soudure. La section totale est utilisée pour calculer les contraintes. Les données ainsi transformées permettent de déterminer la résistance à la traction (f_u) ainsi que l'élongation avant rupture ($A\%$). Afin de modéliser le comportement mécanique du matériau de base et de la soudure, le modèle modifier de Ramberg-Osgood est utilisé. Afin de compléter la modélisation, pente à l'origine (E), la limite élastique (f_y) et la limite à 0.01% ($R_{0.01}$) doivent être déterminées à partir des courbes obtenues.

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

Table 2.4 – Paramètres des essais

Essais	Puissance (kW)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	H ($kJ.mm^{-1}$)
1	2.6	3	52.0
2	2.6	4	39.0
3	2.6	5	31.2
4	2.8	3	56.0
5	2.8	4	42.0
6	2.8	5	33.6
7	3.0	3	60.0
8	3.0	4	45.0
9	3.0	5	36.0

La dernière grandeur qui est calculée est l'énergie d'absorption U définie par l'équation 2.1.

$$U = \int_0^{\epsilon_{max}} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (2.1)$$

Ces grandeurs sont mesurées sur le graphique de l'essai en traction. Plus particulièrement pour l'énergie d'absorption un algorithme de calcul numérique d'intégrale à base de trapèze est utilisé. Le logiciel Minitab 18 est utilisé pour effectuer une analyse ANOVA afin de connaître l'influence des paramètres opératoire sur les propriétés déterminées précédemment. La méthode de F séquentielle est utilisée ; les facteurs ayant une valeur de p (probabilité que l'élément testé ne soit pas viable) trop élevée sont éliminés les uns après les autres jusqu'à obtenir une valeur de p du modèle inférieure à 0.05. Le modèle obtenu permet de connaître la contribution des paramètres opératoire sur la propriété analysée. Une équation peut alors être déduite des résultats permettant de connaître avec plus de détail l'influence des paramètres sur ladite propriété. À partir de cette équation un graphique et une cartographie de leur effet sont alors tracés.

3 Résultats et Discussion

3.1 Comportement générale des soudures

Les essais ont montré que la zone de rupture se trouve au niveau de la soudure. Comparé au matériau de base l'allongement avant la rupture est bien inférieur passant d'environ 28% à 1.8 % dans le pire des cas. Cela peut être expliqué par la mise en position empêchant un bon recouvrement de la soudure, fragilisant ainsi l'assemblage. Les courbes des essais en traction montrent que les paramètres opératoires ont une grande influence sur le comportement de la soudure. La figure 2.3 montre la différence du comportement mécanique en fonction des couples de paramètres utilisés pour les soudures. L'essai 1 est celui ayant une meilleure résistance contrairement à l'essai 3 qui lui est le plus faible.

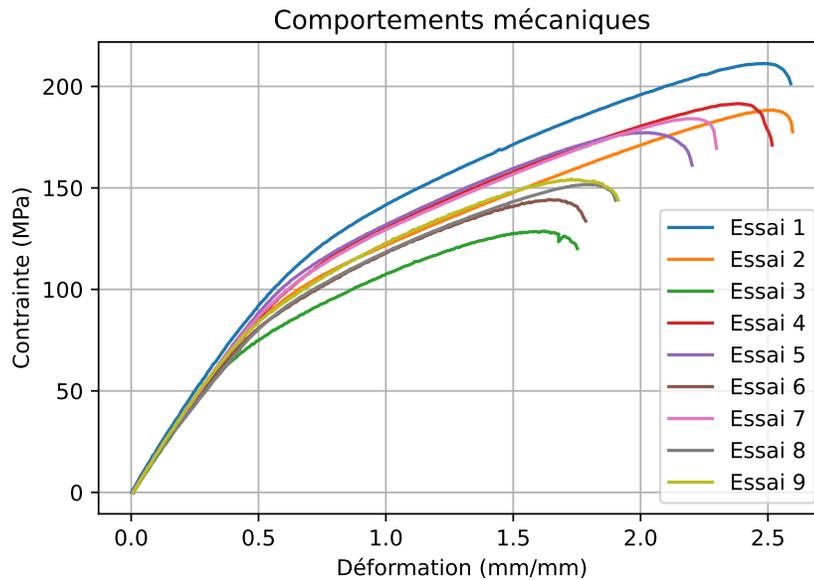


Figure 2.3 – Comparaison de la courbe moyenne des essais en traction

Trois autres groupes de comportement peuvent être distingués. Celui regroupant l'essai 6, 8 et 9, les essais 4,5 et 7 possède aussi un comportement similaire. Le comportement de l'essai 2 semble être différent des autres soudures. Il semblerait que plus l'apport de chaleur H soit faible et plus la soudure possède une bonne résistance. Köse et Topal [20] ont trouvé un résultat similaire mais pour l'acier inoxydable ferritique 401. La microstructure de la soudure est la principale raison pouvant expliquer ces écarts entre chaque couple de paramètres. Pour l'acier 301LN la microstructure dépend fortement de l'apport de chaleur H [21]. Plus H est faible, plus les grains sont de faible épaisseur augmentant la limite élastique.

3.2 Pente à l'origine

La pente à l'origine est mesurée sur les courbes de traction, en prenant celle de chaque essai, la moyenne est consignée dans la table 2.5. Les valeurs sont très faibles car elle dépend de la section, dans le cadre de cette étude la somme des sections des deux plaques a été choisie. Ce choix a tendance à sous-évaluer les valeurs des contraintes. Néanmoins ce qui est intéressant d'étudier est la variation de la pente à l'origine en fonction des couples de paramètres opératoires. Les mesures montrent un écart entre les valeurs, d'environ 5%. Il semblerait que l'apport de chaleur H est une influence sur le comportement général mais ne permet pas de décrire celui-ci en détail. Également l'épaisseur des grains ainsi que leurs formes [20] peuvent avoir une influence sur la loi de comportement mécanique [22].

Pour connaître l'influence de la puissance et de la vitesse sur la pente à l'origine, une étude ANOVA est effectuée. Les résultats sont consignés dans la table 2.6.

Ce modèle est développé à l'aide de la méthodologie des F séquentielle, cependant aucune combinaison des paramètres opératoires n'a permis d'obtenir une valeur de p inférieur à

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

Table 2.5 – Évaluation de la pente à l'origine pour chaque couple de paramètre

Essais	Puissance (kW)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	H ($kJ.mm^{-1}$)	Pente à l'origine (GPa)
1	2.6	3.0	52	18.6
2	2.6	4.0	39	18.5
3	2.6	5.0	31.2	17.7
4	2.8	3.0	56	18.4
5	2.8	4.0	42	18.0
6	2.8	5.0	33.6	18.3
7	3.0	3.0	60.0	18.4
8	3.0	4.0	45	17.8
9	3.0	5.0	36	18.0

Table 2.6 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation pour la pente à l'origine

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	6	74.175	92.85%	74.175	12.362	4.33	0.2
P	1	6	7.51%	14.282	14.282	5	0.155
V²	1	26.2533	32.86%	26.252	26.252	9.19	0.094
P²	1	1.3889	1.74%	16.595	16.595	5.81	0.138
P.V	1	0.3021	0.38%	21.864	21.864	7.65	0.11
V².P	1	16.3837	20.51%	27.951	27.951	9.78	0.089
P².V	1	12.2794	15.37%	23.847	23.847	8.35	0.102
V².P	1	27.9513	34.99%	27.951	27.951	9.78	0.089
Erreur	2	5.7139	7.15%	5.714	2.857		
Total	8	79.8889	100.00%				

0.05. Ce modèle ne peut pas être prédictif.

Table 2.7 – Estimateur statistique du modèle de la pente à l'origine

R^2	R^2_{ajust}	$R^2_{préd}$
92.85%	71.36%	0.00%

La table 2.7 consigne les résultats des estimateurs statistiques obtenus par l'étude ANOVA. La valeur de $R^2_{préd}$ est nulle, confirmant que le modèle ne peut pas être utilisé de façon prédictive, néanmoins les valeurs de R^2 et R^2_{ajust} sont de 92.85% et 71.36%, ce qui permet d'utiliser les résultats comme une bonne approximation sur l'influence des paramètres opératoires sur la pente à l'origine. Néanmoins des études plus approfondies devront être effectuées pour confirmer les résultats obtenus.

L'étude ANOVA de la table 2.6 montre que la puissance et la vitesse sont fortement liées entre eux. Ces résultats ne permettent pas de quantifier la contribution de ces deux paramètres opératoires. Pour plus de détail les graphiques d'interactions de ces paramètres sont tracés sur la figure 2.4a.

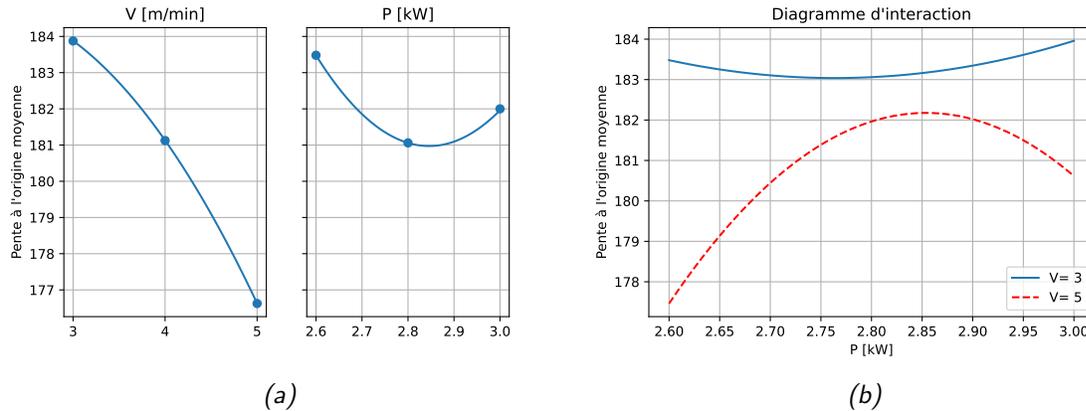


Figure 2.4 – a) Influence de la puissance et de la vitesse sur la pente à l'origine, b) Diagramme d'interaction entre la puissance et la vitesse

Individuellement la puissance fait diminuer grandement la pente à l'origine. Celle-ci augmentant l'apport de la chaleur H réduisant ainsi la pente à l'origine. Du point de vue microscopique la puissance augmente la vitesse de refroidissement augmentant la taille des grains ce qui réduit la pente à l'origine. Pour une vitesse comprise entre 3 m.min^{-1} et 4 m.min^{-1} , l'accroissement de la vitesse fait décroître la pente à l'origine. Ce qui s'explique par une diminution de la surface de la soudure. Cependant, pour une vitesse supérieure 4 m.min^{-1} la pente à l'origine augmente car la taille des grains diminue. Finalement afin de maximiser la pente à l'origine pour se rapprocher de celui du matériau de base, une faible vitesse et puissance semble être le meilleur couplage d'après la figure 2.4b. La figure 2.5 montre l'évolution de la pente à l'origine en fonction des couples de paramètres (P,V). Globalement plus le couple de paramètres est éloigné du bord gauche, plus la pente à l'origine est faible.

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

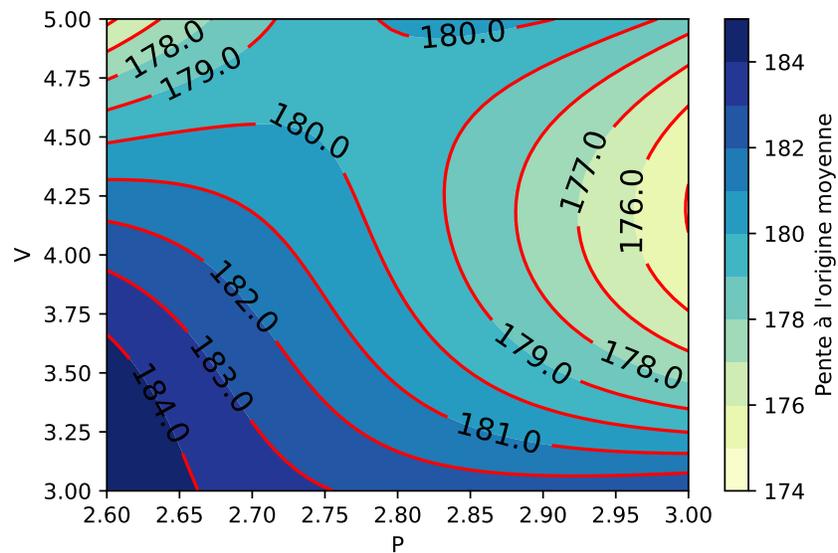


Figure 2.5 – Graphique de contour de la pente à l'origine en fonction de la puissance et de la vitesse

3.3 Limite élastique

De la même façon la limite élastique a été moyennée et consigné dans la table 2.8.

Table 2.8 – Évaluation de la limite élastique pour chaque couple de paramètre

Essais	Puissance (kW)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	H ($kJ.mm^{-1}$)	Limite élastique (f_y) (MPa)
1	2.6	3.0	52.0	140
2	2.6	4.0	39.0	113
3	2.6	5.0	31.2	96
4	2.8	3.0	56.0	118
5	2.8	4.0	42.0	122
6	2.8	5.0	33.6	103
7	3.0	3.0	60.0	117
8	3.0	4.0	45.0	106
9	3.0	5.0	36.0	108

Contrairement à la pente à l'origine, la limite élastique varie énormément en fonction des paramètres opératoires. Les mesures confirment l'observation de la figure 2.3, sur laquelle chaque courbe entre dans le domaine plastique à des valeurs bien différentes. Un écart de 32% est retrouvé. Également il semblerait que minimiser l'apport d'énergie H minimiserait la limite élastique et inversement. D'après la loi de Hall-Petch décrit par l'équation 2.2, la

limite élastique voit son origine dans la taille des grains.

$$f_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (2.2)$$

Où σ_0 est la limite avant la dislocation, k_y une constante dépendant de chaque matériau et de la taille des grains. Lorsque H diminue la taille des grains augmentent, réduisant la limite élastique.

L'étude ANOVA, dont les résultats sont donnés par la table 2.9 à permis de déterminer l'influence de la puissance et de la vitesse sur la limite élastique.

Table 2.9 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la limite élastique

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	3	1154.15	86.35%	1154.1	384.72	10.55	0.013
V	1	782.04	58.51%	374.3	374.35	10.26	0.024
P	1	57.04	4.27%	357.3	357.28	9.79	0.026
V.P	1	315.06	23.57%	315.1	315.06	8.64	0.032
Erreur	5	182.41	13.65%	182.4	36.48		
Total	8	1336.56	100.00%				

La valeur de p du modèle de la table 2.9 est inférieure à 0.05, permettant de conclure que le modèle est statiquement satisfaisant. Néanmoins l'erreur est de 13.65%, ce qui est trop élevé afin d'affirmer que les paramètres présents dans le modèle sont les seuls ayant une influence sur la limite élastique. Les valeurs de R^2 et de R_{ajust}^2 sont respectivement de 86.35% et de 78.16%. Ces valeurs sont suffisamment élevées afin de considérer le modèle comme une bonne approximation de la contribution des paramètres opératoires. Finalement la valeur $R_{prédit}^2$ est de 59.78% ce qui permet d'affirmer que le modèle est capable de donner un ordre de grandeur sur la limite élastique à partir des paramètres opératoires.

La table 2.9 montre que la vitesse est le paramètre le plus influent sur la limite élastique. Cela est tout à fait cohérent car c'est aussi le paramètre ayant le plus d'influence sur la taille des grains [21]. Le terme croisé VP possède une contribution de 23.57%. Comme le modèle est significatif, il est possible de modéliser la limite élastique en fonction de la puissance et de la vitesse. Cette modélisation est décrite par l'équation 2.3.

$$f_y [\text{MPa}] = 699 - 135.7.V[m.min^{-1}] - 192.9.P[\text{kW}] + 44.4.V[m.min^{-1}].P[\text{kW}] \quad (2.3)$$

Où $P \in [2.6 \text{ kW}, 3.0 \text{ kW}]$, $V \in [3 m.min^{-1}, 5 m.min^{-1}]$. La table 2.10 montre que l'équation 2.3 semble donner une valeur de la limite élastique avec un écart maximum de 7%. Cette équation permet donc de donner un ordre de grandeur de celle-ci.

Pour connaître avec plus de détail l'influence de la puissance et de la vitesse, les graphiques d'interactions sont tracés et données par la figure 2.6b.

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

Table 2.10 – Écart relatif entre le modèle ANOVA et les valeurs numériques pour f_y

Essais	f_{yExp} [MPa]	$f_{yThéorique}$ [MPa]	Ecart relative
1	140	137.46	2%
2	113	117.2	4%
3	96.0	96.94	2%
4	118	125.58	7%
5	122	114.2	6%
6	103	102.82	0%
7	117	113.7	2%
8	106	111.2	5%
9	108	108.7	1%

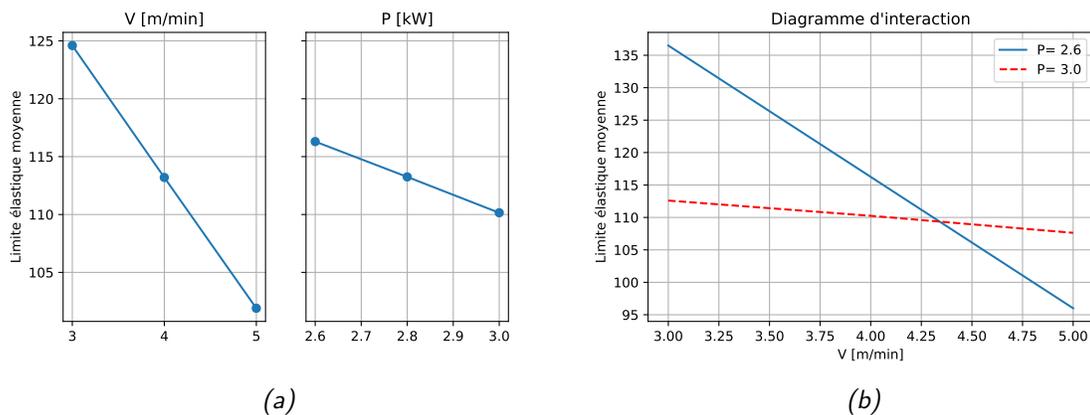


Figure 2.6 – a) Influence de la puissance et de la vitesse sur la limite élastique, b) Diagramme d'interaction pour la limite élastique

La figure 2.6b met en évidence que la puissance est inversement proportionnelle à la limite élastique. Du point de vue microscopique, l'augmentation de la puissance augmente la taille des grains faisant ainsi diminuer la limite élastique. Quand la vitesse augmente la grandeur H diminue ce qui fait diminuer la limite élastique. Ce qui peut expliquer que ce phénomène est la diminution de la surface de la soudure lorsque la vitesse augmente, fragilisant la jointure. Le second graphique montre que pour maximiser la limite élastique il est nécessaire de minimiser la puissance et la vitesse. Afin de mieux visualiser les effets de ces deux paramètres un graphique de contour est tracé à la figure 2.7.

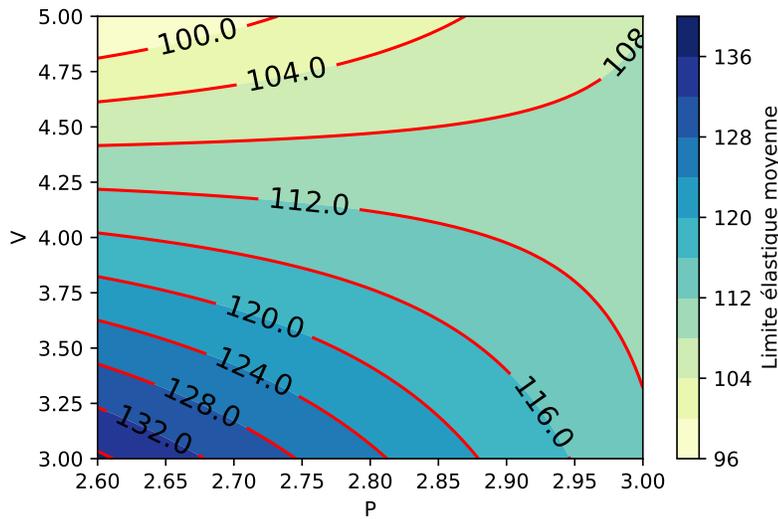


Figure 2.7 – Graphique de contour pour la limite élastique

3.4 Limite en traction

La limite en traction est mesurée en prenant les contraintes maximums de chaque courbe, la moyenne de chaque répétition est donnée par la table 2.11.

Table 2.11 – Évaluation de la limite en traction pour chaque couple de paramètre

Essais	Puissance (kW)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	H ($kJ.mm^{-1}$)	Limite en traction f_u (MPa)
1	2.6	3.0	52.0	208
2	2.6	4.0	39.0	162
3	2.6	5.0	31.2	168
4	2.8	3.0	56.0	170
5	2.8	4.0	42.0	163
6	2.8	5.0	33.6	168
7	3.0	3.0	60.0	165
8	3.0	4.0	45.0	153
9	3.0	5.0	36.0	148

Tout comme pour la limite élastique, la limite en traction diffère beaucoup entre les essais, allant jusqu'à l'écart de 29%. Cependant l'apport de chaleur H ne semble pas pouvoir expliquer la limite en traction f_u . Pour apporter plus d'éléments une étude statistique ANOVA est effectuée. Les résultats sont consignés dans la table 2.12. La valeur de p de la régression est supérieure à 0.05, ce qui rend le modèle non prédictif, ce qui est également confirmé par la valeur de $R^2_{\text{prédic}}$ qui est nulle. Néanmoins les valeurs de R^2 et R^2_{ajust} sont respectivement

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

de 81,75% et 63,49%. Ces valeurs sont suffisamment grandes afin de pouvoir se servir des résultats de l'étude ANOVA pour avoir une idée de l'influence des paramètres opératoires sur la limite en traction. Cependant au vu de la contribution de l'erreur, d'autres paramètres non quantifiés dans cette étude ont une influence. La puissance et la vitesse semblent avoir une contribution équivalente sur la limite en traction. Pour plus de détail les graphiques d'interactions sont tracés et représentés sur la figure 2.12b.

Table 2.12 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la limite en traction

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	4	1888.5	81.75%	1888.5	472.1	4.48	0.088
V	1	604	26.14%	434.8	434.8	4.12	0.112
P	1	859.2	37.19%	298.5	298.5	2.83	0.168
V²	1	289.6	12.54%	289.6	289.6	2.75	0.173
V.P	1	135.7	5.87%	135.7	135.7	1.29	0.32
Erreur	4	421.7	18.25%	421.7	105.4		
Total	8	2310.2	100.00%				

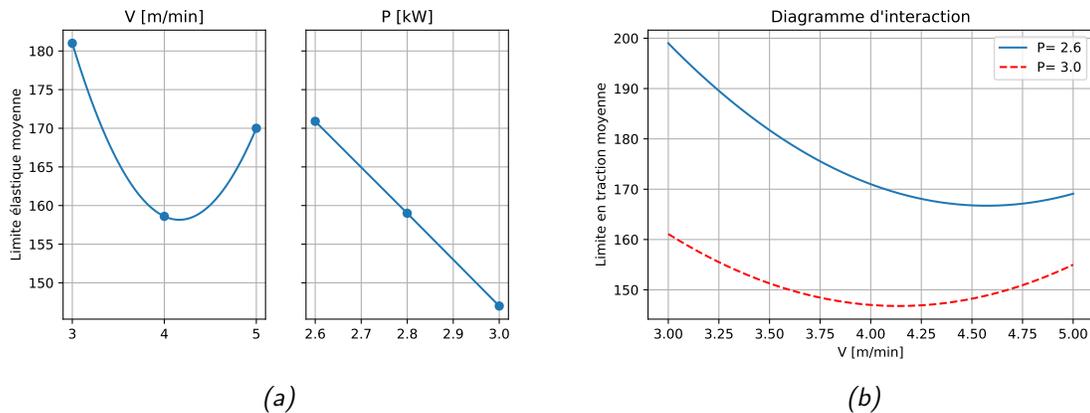


Figure 2.8 – a) Influence de la puissance et de la vitesse sur la limite en traction f_u , b) Diagramme d'interaction pour la limite en traction f_u

La puissance en augmentant fait diminuer la limite en traction. Du point de vue microscopique, lorsque la puissance augmente la taille des grains augmente, favorisant la propagation des dislocations réduisant la limite élastique. Pour la vitesse, deux modes rentrent en compte ; entre 3 m.min^{-1} et 4 m.min^{-1} l'augmentation de la vitesse réduit la surface de la soudure, diminuant grandement la limite en traction, cependant pour une vitesse supérieure à 4 m.min^{-1} , les grains sont devenus suffisamment fin pour limiter la propagation des dislocations afin de faire augmenter la limite en traction. Le second graphique permet d'affirmer qu'afin de maximiser la limite en traction il est nécessaire de prendre une vitesse

faible avec une faible puissance. La figure 2.9 montre l'évolution de la limite en traction en fonction de la puissance et de la vitesse.

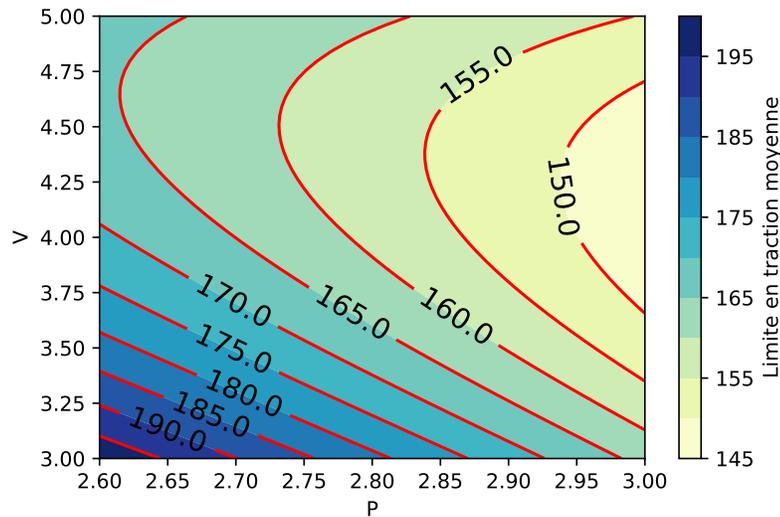


Figure 2.9 – Graphique de contour de la limite élastique en fonction de la puissance et de la vitesse

3.5 Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture est mesuré sur tous les essais avant qu'une moyenne soit effectuée pour chaque couple de paramètres. Les résultats sont alors consignés dans la table 2.13.

Table 2.13 – Évaluation de l'allongement à la rupture pour chaque couple de paramètre

Essais	Puissance (kW)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	H ($kJ.mm^{-1}$)	Allongement à la rupture A%
1	2.6	3.0	52.0	1.60
2	2.6	4.0	39.0	1.65
3	2.6	5.0	31.2	0.93
4	2.8	3.0	56.0	1.36
5	2.8	4.0	42.0	1.31
6	2.8	5.0	33.6	1.02
7	3.0	3.0	60.0	1.39
8	3.0	4.0	45.0	1.07
9	3.0	5.0	36.0	1.06

L'allongement à la rupture des soudures sont très faible se qui permet de les catégoriser comme fragile. Également les paramètres opératoires semblent avoir des effets sur l'allon-

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

gement à la rupture, en effet celle-ci varie de 44%. Tout comme pour les autres propriétés mécaniques, une étude statistique ANOVA est effectuée afin de déterminer l'influence de la puissance et de la vitesse sur l'allongement de la rupture. Les résultats sont consignés dans la table 2.14.

Table 2.14 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de l'allongement avant rupture

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	6	0.537625	99.99%	0.537625	0.089604	2397.77	0
P	1	0.070417	13.10%	0.061979	0.061979	1658.52	0.001
V	1	0.301504	56.07%	0.105427	0.105427	2821.18	0
P²	1	0.005	0.93%	0.085612	0.085612	2290.94	0
V²	1	0.027613	5.14%	0.111935	0.111935	2995.32	0
P².V	1	0.0274	5.10%	0.097218	0.097218	2601.52	0
V².P	1	0.105692	19.66%	0.105692	0.105692	2828.26	0
Erreur	2	0.000075	0.01%	0.000075	0.000037		
Total	8	0.5377	100.00%				

La première remarque à faire est la valeur de p de la régression qui est très inférieure à 0.05, ce qui valide statistiquement le modèle. Également la valeur de $R^2_{\text{prédi}}$ est de 99.52%. Ce qui permet d'affirmer que le modèle a une grande chance d'être prédictif. Également l'erreur est de 0.01%; aucun paramètre n'a donc été négligé. Les valeurs de R^2 et de R^2_{ajust} sont de 99.99% et 99.94%.

La vitesse est le paramètre ayant le plus de contribution sur l'allongement avant la rupture avec une valeur de 56.07%. Le modèle obtenu est complexe, en effet il fait apparaître des termes quadratiques couplés. Avec les résultats de l'étude ANOVA, un modèle mathématique est construit et donné par l'équation 2.4.

$$A\% = 16.313 - 30.102.P + 15.340V + 8.686.P^2 - 3.9076.V^2 - 1.8590.V.P^2 + 1.3536P.V^2 \quad (2.4)$$

Où $P \in [2.6\text{kW}, 3.0\text{kW}]$, $V \in [3\text{ m.min}^{-1}, 5\text{ m.min}^{-1}]$. La table 2.15 montre que la modélisation décrite par l'équation 2.4 semble prédire avec précision l'allongement à la rupture avec une erreur inférieure à 0.5%. Néanmoins une étude avec d'autres paramètres opératoires mais dans le même intervalle est nécessaire afin de confirmer la robustesse du modèle. Pour mieux visualiser l'influence des paramètres opératoires les graphiques d'interactions sont alors tracés et représentés sur la figure 2.10. Lorsque la puissance augmente la taille des grains augmente, facilitant la propagation des dislocations faisant diminuer l'allongement avant la rupture. Pour une vitesse comprise entre 3 m.min^{-1} et 3.5 m.min^{-1} , elle ne semble pas influencer sur l'allongement, cependant pour une vitesse supérieure à 3.5 m.min^{-1} , l'allongement diminue avec la vitesse. Ce phénomène s'explique par la diminution de la surface de la soudure, fragilisant ainsi l'assemblage.

Table 2.15 – Écart relatif entre le modèle ANOVA et les valeurs numériques pour A%

Essais	$A_{Exp}\%$	$A_{Théorique}\%$	Écart relative
1	1.60	1.59048	0.3%
2	1.65	1.64596	0.1%
3	0.93	0.92496	0.0%
4	1.36	1.36428	0.3%
5	1.31	1.30708	0.2%
6	1.02	1.01484	0.5%
7	1.39	1.3868	0.2%
8	1.07	1.0682	0.2%
9	1.06	1.056	0.1%

Pour améliorer la qualité de la soudure ; un grand allongement à la rupture est nécessaire. Pour y arriver d'après la figure 2.11 il est nécessaire de prendre une valeur de la puissance proche de 2.6kW et une vitesse comprise entre 3.0 $m.min^{-1}$ et 4.1 $m.min^{-1}$.

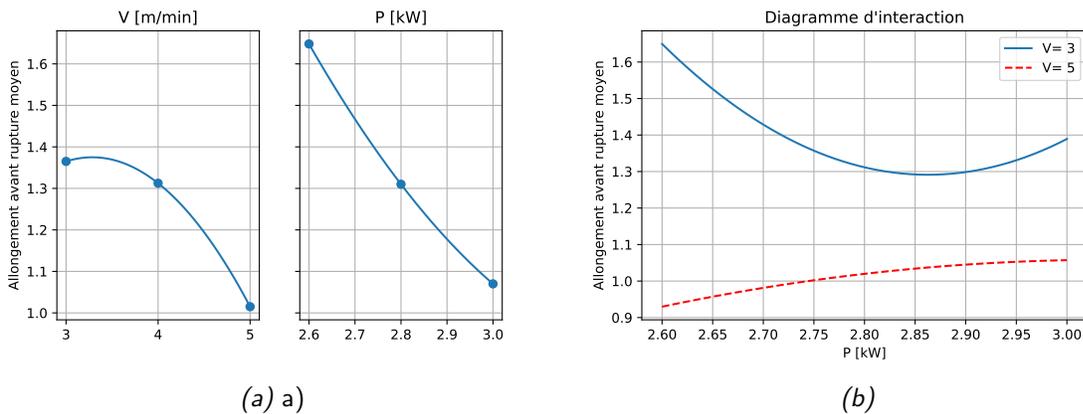


Figure 2.10 – a) Influence de la puissance et de la vitesse sur l'allongement avant la rupture , b) Diagramme d'interaction pour l'allongement avant la rupture

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

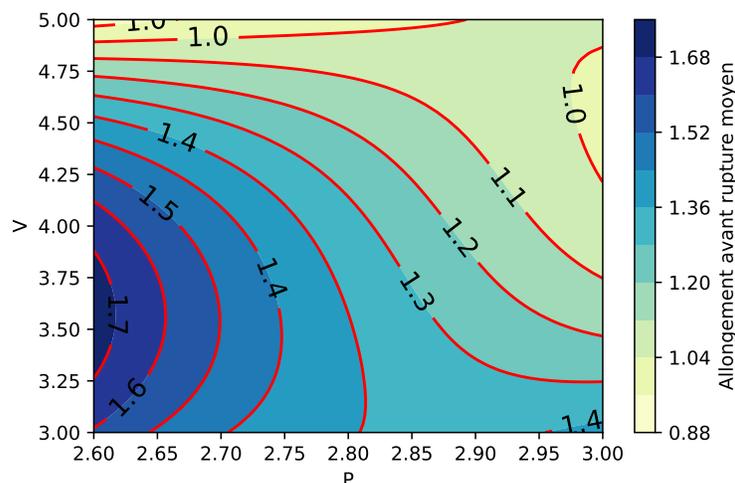


Figure 2.11 – Graphique de contours pour l'allongement avant rupture en fonction de la puissance et de la vitesse

3.6 Énergie d'absorption

L'énergie d'absorption est calculée à partir des courbes et une moyenne est effectuée pour chaque couple de paramètres. Les résultats sont consignés dans la table 2.16.

Table 2.16 – Évaluation de l'énergie d'absorption pour chaque couple de paramètre

Essais	Puissance (kW)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	H ($kJ.mm^{-1}$)	Énergie d'absorption U (J)
1	2,6	3,0	52,0	368,00
2	2,6	4,0	39,0	324,00
3	2,6	5,0	31,2	142,50
4	2,8	3,0	56,0	263,50
5	2,8	4,0	42,0	241,50
6	2,8	5,0	33,6	171,00
7	3,0	3,0	60,0	273,00
8	3,0	4,0	45,0	179,00
9	3,0	5,0	36,0	171,00

La table 2.16 montre que l'énergie d'absorption varie avec les paramètres opératoires. En effet durant les mesures l'énergie d'absorption a varié de 61%. La grandeur U peut être visualisée sur les courbes en traction en prenant la surface engendrée par celle-ci. Ces variations sont principalement liées aux variations de la limite en traction et de l'allongement avant la rupture. Cependant il reste intéressant de connaître plus spécifiquement l'influence de la puissance et de la vitesse. Pour cela une étude ANOVA est effectuée.

Table 2.17 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de l'énergie d'absorption

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	6	47667,2	99,82%	47667,2	7944,53	181,52	0,005
P	1	7455,4	15,61%	6176,2	6176,2	141,12	0,007
P²	1	618,3	1,29%	5914,3	5914,26	135,13	0,007
V²	1	29830,9	62,47%	6239,1	6239,15	142,55	0,007
P.V	1	2261	4,73%	5367,8	5367,76	122,64	0,008
P².V	1	1497,9	3,14%	5317	5316,99	121,48	0,008
V²V	1	6003,7	12,57%	6003,7	6003,72	137,17	0,007
Erreur	2	87,5	0,18%	87,5	43,77		
Total	8	47754,7	100,00%				

Les résultats de l'étude ANOVA sont consignés dans la table 2.17. La valeur p de la régression est inférieure à 0.005, rendant le modèle satisfaisant, ce qui est également confirmé par la valeur de $R^2_{\text{prédit}}$ qui est de 92.29%. L'erreur est de 0.18% permettant d'affirmer qu'aucun paramètre n'a été négligé. Les valeurs de R^2 et R^2_{ajust} sont tous les deux supérieurs à 99%, ce qui rend le modèle suffisamment fiable sur l'influence des paramètres opératoires sur U. La vitesse semblerait être le paramètre avec la plus grande contribution. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus dans les parties précédentes, en effet ce paramètre a aussi été le plus influent pour la plupart des propriétés traitées précédemment. Pour affiner ces résultats une modélisation mathématique est construite et donnée par l'équation 2.5.

$$U \text{ [J]} = 18033 - 16436.P + 3591.P^2 - 832.V^2 + 2236.P.V - 787.8.P^2.V + 291.2.V^2.P \quad (2.5)$$

Où $P \in [2.6 \text{ kW}, 3.0 \text{ kW}]$, $V \in [3 \text{ m.min}^{-1}, 5 \text{ m.min}^{-1}]$. Afin de quantifier l'erreur du modèle, le résultat obtenus par l'équation 2.5 est comparé à ceux expérimentaux. Ceci est consigné dans la table 2.18. Un écart maximum de 2.2% est observé, ce qui est acceptable.

Pour connaître un peu plus de détail sur l'influence de la puissance et de la vitesse sur l'énergie d'absorption ; les graphiques d'interactions sont tracés et donnés par la figure ???. Cette figure montre que U diminue lorsque la puissance augmente. Cela peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de la puissance fait aussi diminuer l'ensemble des autres propriétés étudiées. La vitesse a une forme similaire à celle obtenue durant l'étude de l'allongement avant la rupture. Ce résultat n'est pas surprenant car cette propriété possède la plus grande influence sur la surface de la courbe. Également le graphique de contour présenté sur la figure 2.13 est très similaire de celui de l'allongement avant rupture de la figure 2.11. Ce graphique permet aussi d'affirmer que pour maximiser l'énergie d'absorption, il est nécessaire de minimiser la puissance et de prendre une vitesse comprise entre 3 m.min^{-1} et 3.7 m.min^{-1} .

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

Table 2.18 – Écart relatif entre le modèle ANOVA et les valeurs numériques pour U

Essais	U_{Exp}	$U_{Théorique}$	Écart relative
1	368.0	364.9	0.9%
2	324.0	328.8	1.5%
3	142.5	142.9	0.3%
4	263.5	269.2	2.2%
5	241.5	237.2	1.8%
6	171.0	171.9	0.5%
7	273.0	271.8	0.4%
8	179.0	180.8	1.0%
9	171.0	173.0	1.2%

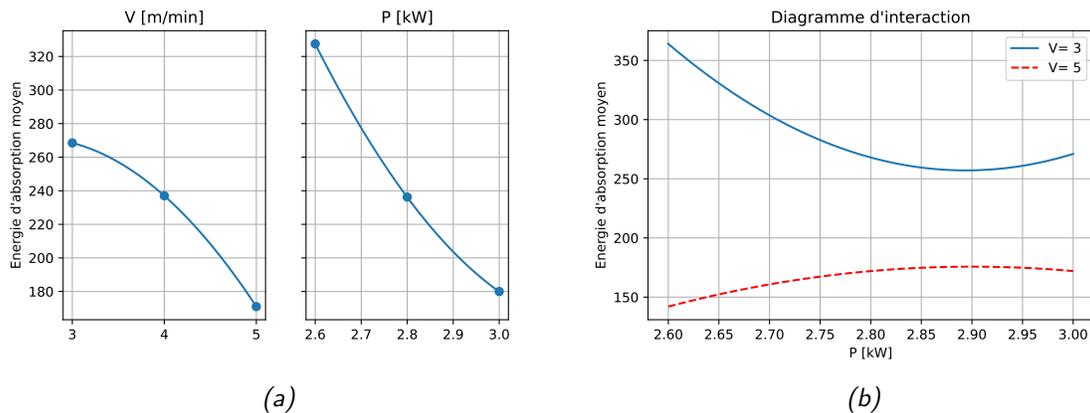


Figure 2.12 – a) Influence de la puissance et de la vitesse sur l'allongement avant la rupture , b) Diagramme d'interaction pour l'allongement avant la rupture

3.7 Modèle de Ramberg Osgood

Dans cette section une modélisation du comportement des soudures est effectuée en utilisant le modèle de Ramberg-Osgood décrit par l'équation 2.6.

$$\epsilon(\sigma) = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma}{f_y}\right)^n & \text{pour } \sigma \leq f_y \\ 0.002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_t} + \epsilon_u \cdot \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y}\right)^m & \text{pour } f_y < \sigma < f_u \end{cases} \quad (2.6)$$

Où

- f_y est la limite élastique à une elongation de 0.2%
- E est le module d'Young
- n est un coefficient permettant de définir le caractère non linéaire du matériau, il peut être calculé de la façon suivante : $n = \frac{\log(0.05)}{\log\left(\frac{R_{0.01}}{f_y}\right)} = \frac{\log(20)}{\log\left(\frac{f_y}{R_{0.01}}\right)}$
- E_t est le module de la tangente de la courbe à la limite élastique et est définie par

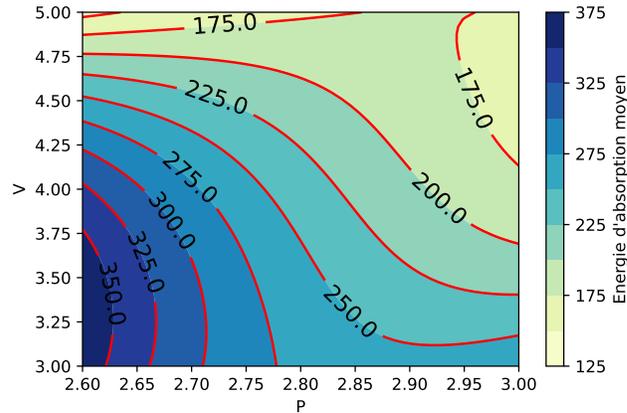


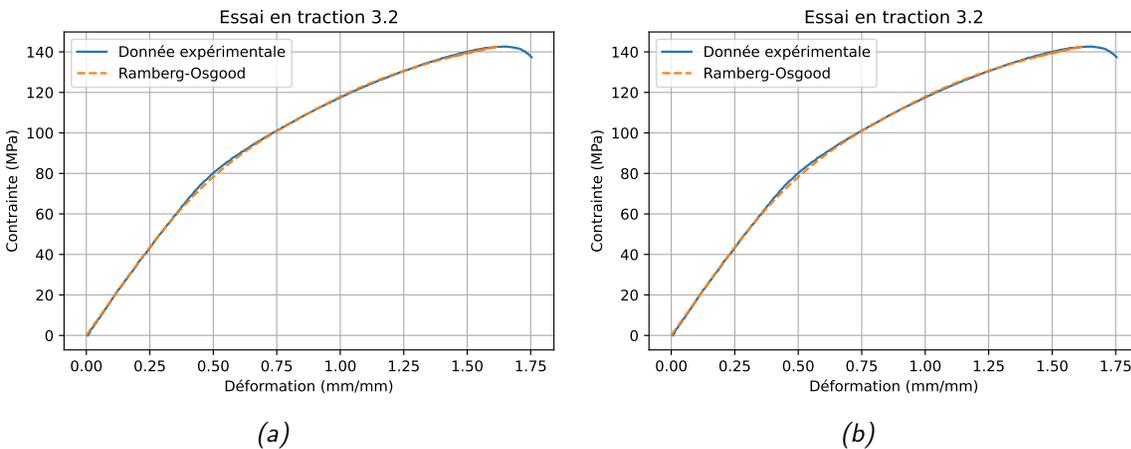
Figure 2.13 – Graphique de contour de l'énergie d'absorption en fonction de la puissance et de la vitesse

$$E_t = \frac{E}{1+0.002 \cdot n \frac{E}{f_y}}$$

— ϵ_u est l'élongation correspondante à la résistance maximum f_u et peut être approximé par $\epsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u}$

— m est un coefficient qui est défini par $m = 1 + 3.5 \frac{f_y}{f_u}$

Ces différents coefficients ont été mesurés durant les sections précédentes et sont utilisés pour modéliser le comportement mécanique des soudures.



(a)

(b)

Figure 2.14 – a) Modélisation de l'essai 3.2, b) 4.1

La figure 2.14 montre que le modèle de Ramberg-Osgood semble fonctionner. Les valeurs des coefficients de Pearson sont consignées dans la table 2.19. La valeur moyenne de ce coefficient sur l'ensemble des modélisations est de 0.997, ce qui est suffisamment élevé pour valider le modèle.

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

Également l'énergie d'absorption de l'échantillon calculé par $U = \int_0^{\epsilon_{max}} \sigma(\epsilon) d\epsilon$ peut être calculée analytiquement à l'aide du modèle de Ramberg-Osgood. Le résultat est comparé par la valeur expérimentale. Pour le calcul analytique il va falloir montrer d'abord que la fonction définie par l'équation 2.6 est bien bijective. Commençons par montrer sa continuité :

$$\lim_{x \rightarrow f_y^-} \epsilon(\sigma) = 0.002 + \frac{f_y}{E} \quad (2.7)$$

$$\lim_{x \rightarrow f_y^+} \epsilon(\sigma) = 0.002 + \frac{f_y}{E} \quad (2.8)$$

Les équations 2.7 et 2.8 montrent que la fonction ϵ est bien continue, elle est également dérivable sur l'intervalle $[0, f_y[\cup]f_y, f_u]$, par dérivation de fonction polynomiale.

$$\frac{d\epsilon}{d\sigma}(\sigma) = \begin{cases} \frac{1}{E} + \frac{0.002 \cdot n}{f_y} \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^{n-1} & \text{pour } \sigma < f_y \\ \frac{1}{E_t} + \frac{\epsilon_u \cdot m}{f_u - f_y} \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right)^{m-1} & \text{pour } f_y < \sigma < f_u \end{cases} \quad (2.9)$$

La fonction $\frac{d\epsilon}{d\sigma}$ est bien continue sur $[0, f_y[\cup]f_y, f_u]$, vérifions qu'elle l'est sur $[0, f_u]$.

$$\lim_{x \rightarrow f_y^-} \frac{d\epsilon}{d\sigma}(\sigma) = \frac{1}{E} + \frac{0.002 \cdot n}{f_y} \quad (2.10)$$

$$\lim_{x \rightarrow f_y^+} \frac{d\epsilon}{d\sigma}(\sigma) = \frac{1}{E_t} = \frac{1}{E} + \frac{0.002 \cdot n}{f_y} \quad (2.11)$$

Les limites calculées en 2.10 et 2.11 permettent d'effectuer un raccordement par continuité de la fonction $\frac{d\epsilon}{d\sigma}$, et ainsi $\epsilon \in C^1$. Finalement d'après l'équation 2.9, $\forall \sigma \in [0, f_u]$, $\frac{d\epsilon}{d\sigma}(\sigma) > 0$, donc ϵ est strictement croissant sur $[0, f_u]$, elle est bijective de $[0, f_u]$ à $[0, \epsilon_u]$. Sa fonction réciproque existe et sera noté σ , néanmoins elle n'est pas exprimable facilement. Afin de calculer U, la formule du calcul intégral d'une fonction réciproque est introduite.

$$\int f^{-1}(y) dy = y \cdot f^{-1}(y) - \int_0^{f^{-1}(y)} f(y) dy + C \quad (2.12)$$

Finalement lorsqu'on applique la formule de l'équation 2.12 à σ , on obtient :

$$U = \int_0^{\epsilon_{max}} \sigma(\epsilon) d\epsilon = \left[\epsilon \sigma(\epsilon) - \int_0^{\sigma(\epsilon)} \epsilon(\sigma) d\sigma \right]_0^{\epsilon_{max}} = \epsilon_{max} \cdot f_u - \int_0^{f_u} \epsilon(\sigma) d\sigma \quad (2.13)$$

Notons $I = \int_0^{f_u} \epsilon(\sigma) d\sigma$ qui est la dernière intégrale à calculer afin d'obtenir une relation analytique de U. Cependant $I = \int_0^{f_y} \epsilon(\sigma) d\sigma + \int_{f_y}^{f_u} \epsilon(\sigma) d\sigma$

$$\int_0^{f_y} \epsilon(\sigma) d\sigma = \int_0^{f_y} \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n d\sigma = \frac{f_y^2}{2E} + \frac{0.002 \cdot f_y}{n+1} \quad (2.14)$$

$$\int_{f_y}^{f_u} \epsilon(\sigma) d\sigma = \left(0.002 + f_y \cdot \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E_t} \right) + \frac{\epsilon_u}{m+1} \right) \cdot (f_u - f_y) + \frac{f_u^2 - f_y^2}{2E_t} \quad (2.15)$$

Maintenant avec les équations 2.14 et 2.15, il est possible d'exprimer U

$$U = \epsilon_{max} \cdot f_u - \frac{f_u^2}{2E_t} - \frac{0.002 \cdot f_y}{n+1} + f_y^2 \left(\frac{1}{2E_t} - \frac{1}{2E} \right) - \left(0.002 + f_y \cdot \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E_t} \right) + \frac{\epsilon_u}{m+1} \right) \cdot (f_u - f_y) \quad (2.16)$$

Les valeurs théoriques et expérimentales sont consignées dans la table 2.19.

Table 2.19 – Écart relatif entre le modèle analytique et les valeurs numériques pour U

Essais	R^2	$U_{Théorique}$	U_{Exp}	Écart relative
1.1	0.999	337	380	11%
1.2	0.997	399	445	10%
2.1	0.999	317	334	5%
2.2	0.999	331	359	8%
3.1	0.993	133	157	15%
3.2	0.996	152	176	14%
4.1	0.996	303	338	10%
4.2	0.999	224	245	9%
5.1	0.994	229	267	14%
5.2	0.997	254	292	13%
6.1	0.996	156	179	13%
6.2	0.998	186	203	8%
7.1	0.999	255	281	9%
7.2	0.999	291	318	8%
8.1	0.998	179	200	11%
8.2	0.996	179	208	14%
9.1	0.995	178	207	14%
9.2	0.996	164	192	15%

Les résultats montrent que les valeurs théoriques sont toujours inférieures à la valeur expérimentale. L'écart relatif entre ces deux grandeurs est compris entre 5% et 15%. Cette différence s'explique facilement. Les équations de Ramberg-Osgodt ne modélisent pas la rupture. Néanmoins l'équation 2.16 permet de donner un ordre de grandeur de cette énergie d'absorption.

4 Conclusion

Cette étude avait pour objectif de déterminer l'influence de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques d'une soudure d'angle mais aussi de vérifier si le modèle de

2. Effet de la puissance et de la vitesse sur les propriétés mécaniques des soudures laser d'angle de l'acier AISI 301LN

Ramberg-Osgood pouvait modéliser le comportement mécanique d'une soudure d'un acier inoxydable.

- Pour l'ensemble des soudures, la rupture se trouve au niveau du cordon de soudure. Malgré les différences de comportement entre les couples de paramètres, les soudures peuvent être qualifiées de fragiles. L'allongement avant la rupture de celle-ci est très largement inférieur à celle du matériau de base.
- Les valeurs obtenues pour la pente à l'origine sont très faibles, de l'ordre de 18 GPa. Cette valeur est dépendante de la section choisie pour le calcul des contraintes. L'étude ANOVA n'a pas permis de développer un modèle prédictif, néanmoins il fut possible de déterminer l'influence de la puissance et de la vitesse sur la pente à l'origine. Pour la maximiser la puissance doit être comprise entre 2.6kW et 2.7kW et la vitesse entre 3.0 m.min^{-1} et 4.0 m.min^{-1} .
- L'étude statistique a montré que la vitesse est le paramètre le plus influent sur la limite élastique. Elle a aussi permis de développer un modèle mathématique permettant de prédire la limite élastique avec une marge d'erreur de 7%. Ce qui permet de donner un ordre de grandeur de celle-ci. Pour la maximiser, il est nécessaire de minimiser la puissance et la vitesse.
- Les deux paramètres opératoires testés semblent avoir une influence équivalente sur la limite en traction. Pour la maximiser, la puissance et la vitesse doivent être minimisées.
- L'allongement à la rupture des soudures est bien inférieur à celle du matériau de base, pouvant être expliqué par la mise à une position limitant le recouvrement des deux plaques par la soudure. L'étude ANOVA montre que la vitesse est le paramètre ayant le plus d'influence sur cette propriété. À partir de ces résultats une équation a été construite, capable de prédire l'allongement à la rupture avec une erreur inférieur au pour cent. Le graphique de contour montre que pour maximiser l'allongement il faut prendre une vitesse entre 3.0 m.min^{-1} et 4.0 m.min^{-1} ainsi qu'une puissance proche 2.6kW.
- L'énergie d'absorption calculer à partir des graphiques d'essai en traction est principalement influé par la vitesse avec une contribution supérieure à 62.74%. Un modèle statistique est développé afin de prédire l'énergie d'absorption avec une erreur de 2.2%. Pour maximiser l'énergie une puissance proche 2.6kW et une vitesse comprises entre 3.0 m.min^{-1} et 3.7 m.min^{-1} sont recommandés.
- Le modèle de Ramberg-Osgood peut être utilisé afin de décrire le comportement mécanique des soudures. À partir de ce modèle une formule analytique de l'énergie d'absorption est calculée et comparée avec l'énergie obtenue expérimentalement. Il existe une erreur d'environ 10%, qui s'explique par la non-modélisation de la zone de rupture.

Bibliographie

- [1] S. Gnanasekaran, S. Senthil Kumar, N. Venugopal, M. Upadhyaya, T. Manjunath, S. J. S. Chelladurai, and G. Padmanaban, "Effect of laser power on microstructure and tensile properties of pulsed Nd :YAG laser beam welded AISI 301 austenitic stainless steel joints," *Materials Today : Proceedings*, vol. 37, pp. 934–939, 2021.
- [2] A. Hamada, A. Järvenpää, E. Ahmed, P. Sahu, and A. Farahat, "Enhancement in grain-structure and mechanical properties of laser reversion treated metastable austenitic stainless steel," *Materials & Design*, vol. 94, pp. 345–352, Mar. 2016.
- [3] V. Schultz, "Process Stability during Laser Beam Welding with Beam Oscillation and Wire Feed," 2019.
- [4] P. Haglund, I. Eriksson, J. Powell, and A. Kaplan, "Surface tension stabilized laser welding (donut laser welding)—A new laser welding technique," 2014.
- [5] S. Katayama, *Fundamentals and Details of Laser Welding*. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering, Singapore : Springer Singapore, 2020.
- [6] K. Rubben, H. Mohrbacher, and E. Leirman, "Advantages of using an oscillating laser beam for the production of tailored blanks," (Munich, Germany), pp. 228–241, Aug. 1997.
- [7] R. Schedewy, D. Dittrich, J. Standfuß, and B. Brenner, "LBW of high stiffness light weight structures generated by scanned fiber laser beams," in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, (Temecula, California, USA), p. 609, Laser Institute of America, 2008.
- [8] K.-D. Choi, Y.-N. Ahn, and C. Kim, "WELD STRENGTH IMPROVEMENT FOR AL ALLOY BY USING LASER WEAVING METHOD," 2024.
- [9] M. Vänskä and A. Salminen, "Laser welding of stainless steel self-steering tube-to-tube joints with oscillating mirror," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, vol. 226, pp. 632–640, Apr. 2012.
- [10] M. Schweier, J. Heins, M. Haubold, and M. Zaeh, "Spatter Formation in Laser Welding with Beam Oscillation," *Physics Procedia*, vol. 41, pp. 20–30, 2013.
- [11] B. L. Boyce, P. L. Reu, and C. V. Robino, "The constitutive behavior of laser welds in 304L stainless steel determined by digital image correlation," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 37, pp. 2481–2492, Aug. 2006.

- [12] J. A. Brooks, "Weld Properties of a Free Machining Stainless Steel,"
- [13] Y. Cui and C. D. Lundin, "Effect of microfissures on mechanical properties of 308L austenitic stainless steel weld metals," *Journal of Materials Science*, vol. 40, pp. 1281–1283, Mar. 2005.
- [14] W. Tan and Y. C. Shin, "Multi-scale modeling of solidification and microstructure development in laser keyhole welding process for austenitic stainless steel," *Computational Materials Science*, vol. 98, pp. 446–458, Feb. 2015.
- [15] P. Sathiya, K. Panneerselvam, and R. Soundararajan, "Optimal design for laser beam butt welding process parameter using artificial neural networks and genetic algorithm for super austenitic stainless steel," *Optics & Laser Technology*, vol. 44, pp. 1905–1914, Sept. 2012.
- [16] Y. Zhang, R. Kovacevic, and L. Li, "Characterization and real-time measurement of geometrical appearance of the weld pool," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, pp. 799–816, July 1996.
- [17] J. R. Berretta, W. De Rossi, M. David Martins Das Neves, I. Alves De Almeida, and N. Dias Vieira Junior, "Pulsed Nd :YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 45, pp. 960–966, Sept. 2007.
- [18] P. Farhadipour, S. Dehghan, N. Barka, A. Iltaf, and P. Farhadipour, "A study on effect of laser overlay welding parameters of stainless steel 301 LN : tensile test, microstructure analysis and microhardness evaluation," *Welding International*, pp. 1–13, Apr. 2024.
- [19] V. Talyan, R. H. Wagoner, and J. K. Lee, "Formability of stainless steel," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 29, pp. 2161–2172, Aug. 1998.
- [20] C. Köse and C. Topal, "Laser welding of AISI 410S ferritic stainless steel," *Materials Research Express*, vol. 6, p. 0865g4, June 2019.
- [21] A.-M. El-Batahgy, "Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels," *Materials Letters*, vol. 32, pp. 155–163, Aug. 1997.
- [22] K. K. Singh, S. Sangal, and G. S. Murty, "Hall–Petch behaviour of 316L austenitic stainless steel at room temperature," *Materials Science and Technology*, vol. 18, pp. 165–172, Feb. 2002.

Chapitre 3

Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

Résumé

Dans cette étude, le développement détaillé du modèle de comportement thermique de l'acier inoxydable AISI 301LN est réalisé pour l'implémenter dans un logiciel de simulation numérique. Avec son aide, nous résoudrons l'équation de la chaleur pour simuler le champ de température du soudage laser dans le contexte d'un joint à recouvrement. Pour modéliser la source de chaleur, le modèle de cône gaussien est utilisé. Pour modéliser la transition de la phase solide à la phase liquide, l'option de modélisation des matériaux avec changement de phase est employée. Ainsi, le champ θ_l représentant les régions liquides est utilisé pour déterminer la géométrie finale du cordon de soudure. Une fois obtenues, des mesures de pénétration, de largeur et de surface sont prises pour les comparer avec des soudures réalisées en utilisant les mêmes paramètres opérationnels. Pour effectuer cette comparaison, cinq estimateurs statistiques sont utilisés : le coefficient de Pearson (R^2), MAE, MAPE, MRSE et RMRSE. Les estimateurs ont montré que le modèle n'est pas suffisamment robuste pour prédire avec précision la géométrie du cordon de soudure ; cependant, il fournit une bonne approximation de la forme générale du cordon de soudure. Enfin, l'influence des paramètres opérationnels sur la simulation est étudiée pour les comparer aux résultats expérimentaux. Les simulations ont révélé que le modèle manque de complexité pour prédire avec précision la morphologie du cordon de soudure. En effet, il tend à surestimer la pénétration et la surface, mais à sous-estimer la largeur. De plus, il accorde trop d'importance à l'amplitude par rapport à la réalité.

Mots clés : Soudage laser, AISI 301LN, joint par recouvrement, PARDISO, COMSOL.

1 Introduction

L'industrie automobile est un vecteur d'innovation de procédé toujours plus performant [1]. Aujourd'hui, l'industrie automobile utilise le procédé de rivetage sur mesure qui consiste à assembler un permanent différent plaque avant de les déformer plastiquement pour obtenir la pièce escomptée [1, 2]. Néanmoins, le nombre de soudures dans le domaine automobile a doublé en l'espace de quelques années, la résistance de celles-ci à de fortes contraintes reste une préoccupation majeure des bureaux d'étude [3]. La détermination et l'identification des paramètres opératoires du laser permettant de s'assurer des bonnes caractéristiques de soudage sont indispensables [4]. Afin d'éviter la traditionnelle méthodologie expérimentale, longue et fastidieuse, il faut utiliser des modèles prédictifs robustes [5]. L'acier inoxydable AISI 301LN se distingue parmi ses homologues par sa nature métastable austénitique, ce qui en fait un choix privilégié dans divers secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale et l'industrie médicale. Cette préférence découle de sa résistance exceptionnelle et de sa ductilité, principalement induites par l'effet de plasticité induite par transformation (TRIP) [6, 7]. La modélisation du soudage laser a commencé simplement avec la résolution de l'équation de chaleur et s'est améliorée jusqu'à prendre en compte l'ensemble des phénomènes physiques en jeu dans le soudage [8]. Un modèle prenant en compte la vaporisation due au fort apport de chaleur ainsi que le phénomène de 'Keyhole' a été développé [8]. Pour améliorer le modèle, la modélisation du mélange de gaz formé par la matière qui a été vaporisée et le gaz ambiant, ainsi que la diffusion de la chaleur dans celui-ci, est ajoutée à la modélisation [9]. Néanmoins, plus le modèle se rapproche de la réalité et se complexifie, plus le temps de calcul devient long, pouvant atteindre jusqu'à quelques mois. Pendant la modélisation multiphysique d'un phénomène, un seul maillage est utilisé pour l'ensemble des équations, cependant chaque modélisation demande une taille de maillage différente, le maillage le plus fin est retenu. Afin de réduire le temps de calcul, plusieurs maillages adaptés pour chaque équation sont utilisés. Les maillages coïncident par interpolation. Ce qui a permis de réduire le temps de calcul de 97% [10]. Les simulations numériques sont devenues essentielles pour comprendre les complexités des processus de soudage et les principes physiques sous-jacents. Cette approche permet de gagner du temps pour évaluer l'impact des paramètres de soudage sur la qualité des joints de soudure. Grâce à l'utilisation de simulations numériques, les chercheurs peuvent identifier et optimiser les paramètres clés nécessaires pour obtenir des résultats de soudage supérieurs [11]. La modélisation de la source de chaleur possède une grande influence sur la solution finale. Le premier modèle pour le soudage, modélise la source de chaleur comme un point se déplaçant le long d'une plaque semi-infinie [12]. C'est un modèle qui est encore utilisé aujourd'hui, en effet il permet de modéliser le soudage de plaque épaisse mais aussi le traitement thermique par laser. Le modèle de Rosenthal est souvent utilisé avec l'équation de Fridman pour prédire les résultats du soudage [12, 13]. Cependant, d'autres méthodes de modélisation existent, telles que l'approximation du modèle de Rosenthal et la définition du laser comme une source linéaire pour prédire la puissance nécessaire pour la fusion. La géométrie de la surface de contact entre le matériau et le laser est également un paramètre critique pouvant être ajusté [14]. Par exemple, le modèle double

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

elliptique peut simuler avec précision à la fois les processus de soudage à l'arc et de soudage par faisceau haute énergie [15, 16].

La température et la géométrie de la soudure est fortement corrélé avec l'absorption et la distribution d'énergie de la source [14]. Cependant la modélisation gaussienne reste la meilleure et la plus couramment utilisée [17]. En combinant la modélisation gaussienne avec celle cylindrique améliore la prédiction des déformations thermoplastiques ainsi que des contraintes résiduelles [18]. Une source circulaire pour l'apport de chaleur surfacique et une source gaussienne d'un polynôme pour la partie volumique est aussi un modèle utilisable [19]. Une source de chaleur d'un laser à impulsion pour le soudage de plaque de AISI 304 SS est modélisé afin de déterminer les paramètres opératoires optimums. Il utilise le modèle à trois dimensions conique et détermine les paramètres de celui-ci à l'aide des résultats expérimentaux [20]. Un modèle de source de chaleur en forme de gaussienne peut être utilisé afin de modéliser une soudure dans une mise en position en joins en T [21]. L'étude de l'influence de l'angle d'incidence avec une source de chaleur modéliser par une gaussienne avec une décroissance linéaire est étudié [22]. Néanmoins, afin d'obtenir de bons résultats lors d'une simulation il est nécessaire de bien définir les hypothèses de calculs afin de s'assurer de la convergence du modèle et de sa robustesse. Le phénomène de convection est le facteur le plus important dans le soudage pour la détermination de la géométrie du cordon de soudure [18]. Ce phénomène semblerait aussi être responsable de certains défauts comme une variation de la pénétration et un manque de fusion du matériau. Un modèle hydrodynamique prenant en compte de l'effet de la vapeur saturante de l'écoulement du métal en fusion et montre que la convection induite par celle-ci joue un rôle important dans l'absorption du laser est étudié [23]. L'évolution des propriétés du matériau en fonction de la température joue un rôle important sur le résultat final [24]. L'étude du soudage laser ne demande pas toujours des modèles complexes, en effet la résolution de l'équation de chaleur est souvent suffisante [17].

La méthode d'analyse par expérimentation est certes efficace mais cependant elle demande énormément de ressource et de temps afin d'aboutir à des résultats. Le développement de la simulation numérique a permis de remplacer cette phase de tâtonnement expérimentale par de la simulation qui est à la fois plus rapide et moins chère. Néanmoins il est d'abord nécessaire de développer des modèles mathématiques, qui seront par la suite résolus numériquement. Avec les connaissances obtenues à l'aide de recherche précédente, cette étude a pour objectif de modéliser le champ de température dans le cas du soudage laser en angle du 301LN afin d'essayer de prédire les caractéristiques géométriques de la zone de soudure telles que la pénétration et la largeur de la soudure. Pour cela, il est nécessaire de modéliser les propriétés physiques en fonction de la température du matériau utilisé. Afin d'y parvenir, les travaux de [25] sont utilisés. Une fois le matériau modélisé, il faut maintenant définir quelles sont les hypothèses qui seront utilisées pour la suite. Dans cette étude, seul le champ de température est étudié, la seule équation à résoudre est l'équation de diffusion de chaleur. Pour l'apport de chaleur, une modélisation gaussienne du laser sera utilisée. Pour finaliser la modélisation, il faut fixer les conditions aux limites. Une fois cela fait, une étude de convergence de maillage sera effectuée afin de minimiser le temps de cal-

cul sans perdre en précision. Pour valider le modèle, des soudures seront effectuées avec les mêmes paramètres opératoires et seront comparées. Pour l'analyse des résultats, seules les propriétés géométriques seront étudiées, en effet le modèle utilisé ne permet pas de prédire d'autres propriétés. La méthode de statistique ANOVA est utilisée afin de pouvoir comparer la contribution des paramètres opératoires pour comparer la contribution de la simulation et de l'expérimentation.

2 Modélisation

2.1 Description

Le modèle 2D du soudage laser en configuration d'angle consiste à simuler un faisceau à haute énergie sur l'angle de jointure entre les deux plaques d'acier 301LN d'épaisseur 2 mm, représentés sur la figure 3.1.

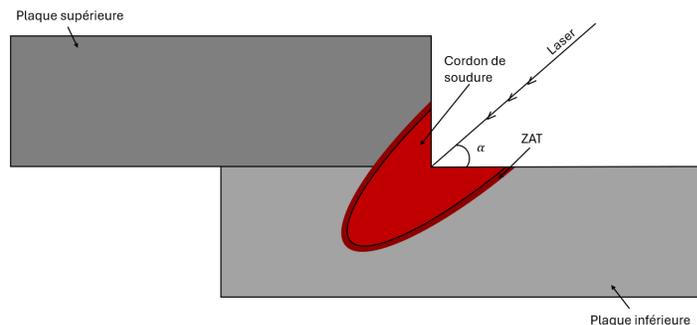


Figure 3.1 – Schéma de la mise en position

Le faisceau est dirigé vers la jointure avec un angle $\alpha = 45^\circ$, se déplaçant le long de cette jointure à une vitesse v . Cependant, afin de simplifier le modèle, certaines hypothèses sont faites :

- i. Le matériau est considéré comme isotrope et homogène.
- ii. La géométrie est considérée comme parfaite.
- iii. L'écoulement du métal liquide, l'effet Marangoni et la chaleur latente de fusion sont négligés.

Ces hypothèses sont faites afin d'éviter de longues simulations. Pour la résolution numérique la méthode Implicite BDF est utilisée afin de calculer le pas de temps. Quant au solveur spatial PARDISO directement implémenté dans COMSOL est aussi utilisé.

2.2 Matériau

Toute cette étude utilisera la méthode de calcul et les équations démontrées par [25] dans son ouvrage "Thermophysical Properties of Stainless Steel" de 1975, qui permettent de calculer les propriétés physiques du 304L, un acier ayant une composition proche du 301LN.

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

Informations générales

Le 301LN et le 304L sont tout les deux des aciers inoxydables austénitiques ayant la composition chimique référencée dans la table 3.2.

Table 3.1 – Propriété thermique d'après la base de donnée MakeltFrom

Propriétés	301LN	304L
Température de fusion (T_f)	1703.15K	1723.15K
Chaleur latente de fusion (L_f)	280 $J.g^{-1}$	290 $J.g^{-1}$

Table 3.2 – Composition chimique d'après la base de donnée MakeltFrom

Acier	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	N	P	C	S
301LN	équilibre	16-18 %	6-8%	2%	1%	0,07-0,20%	0,05%	0,03%	0,03%
304L	équilibre	18-20%	8-12%	2%	0.75%	0.10%	0.045%	0.03%	0.03%

Également leurs propriétés thermiques sont similaires et consignées dans la table 3.1.

Enthalpie, entropie et capacité thermique

Il n'existe pas de données expérimentales pour l'enthalpie de l'acier 301LN. Néanmoins, il est possible d'utiliser les équations déterminées pour l'acier 304L en tant qu'approximation.

$$\Delta H^\circ = H_T^\circ - H_{298.15}^\circ = -1.46 \cdot 10^5 + 469.7 \cdot T + 6.744 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 \quad (3.1)$$

L'entropie et la capacité thermique sont reliées par les équations 3.2 et 3.3

$$c_p^\circ = \frac{d}{dT}(H_T^\circ - H_{298.15}^\circ) \quad (3.2)$$

$$\Delta s^\circ = s_T^\circ - s_{298.15}^\circ = \int_{298.15}^T \frac{c_p^\circ}{T} dT \quad (3.3)$$

Après calcul on obtient l'équation 3.4

$$c_{ps}^\circ = 470 + 0.135 \cdot T \quad (3.4)$$

$$\Delta s_s^\circ = s_T^\circ - s_{298.15}^\circ = -2716 + 470 \ln(T) + 0.135 \cdot T \quad (3.5)$$

Les équations 3.4 et 3.5 et ne fonctionnent que dans la région solide. Pour déterminer la valeur de C_p dans la région liquide, il faut utiliser la règle d'additivité donnée par l'équation 3.6, en considérant le liquide composé de 17 % de Cr, 7 % de Ni et de 76 % de fer.

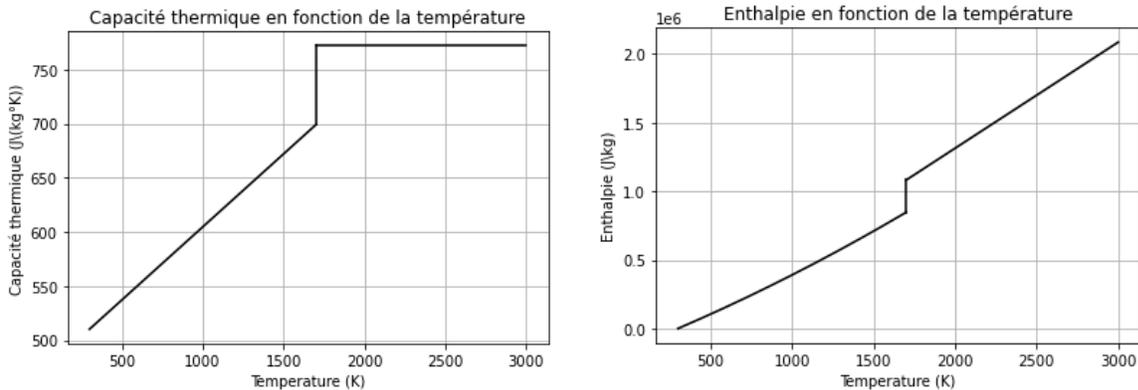
$$c_{pl} = \sum_i c_{psi} \cdot w_i \quad (3.6)$$

Où c_{ps_i} est la capacité thermique de l'élément i et w_i la fraction massique de l'élément i dans le fluide. La table 3.3 donne la valeur de la capacité thermique pour les éléments purs de fer, de chrome et de nickel.

Table 3.3 – Valeur de la capacité thermique pour le fer , le chrome et le nickel liquide [26]

Élément	$C_{pl}(J.kg^{-1}.K^{-1})$
Fe	787
Cr	757
Ni	656

Ce qui donne comme valeur de capacité thermique pour notre alliage liquide de $772 J.kg^{-1}.K^{-1}$.



(a) Évolution de la capacité thermique en fonction de la température (b) Évolution de l'enthalpie en fonction de la température

Figure 3.2 – Évolution de la capacité thermique et de l'enthalpie en fonction de la température

La capacité thermique de l'alliage en fonction de la température est représentée sur la figure 3.2a. En inversant l'équation 3.2 il est possible de déterminer une équation de l'enthalpie de la phase liquide. La variation de l'enthalpie en fonction de la température a été tracée sur la figure 3.2b. En reprenant l'équation 3.3,

$$\Delta s_j^o = -4399 + 772 \ln(T) \quad (3.7)$$

Finalement l'entropie en fonction de la température est tracée sur la figure 3.3.

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

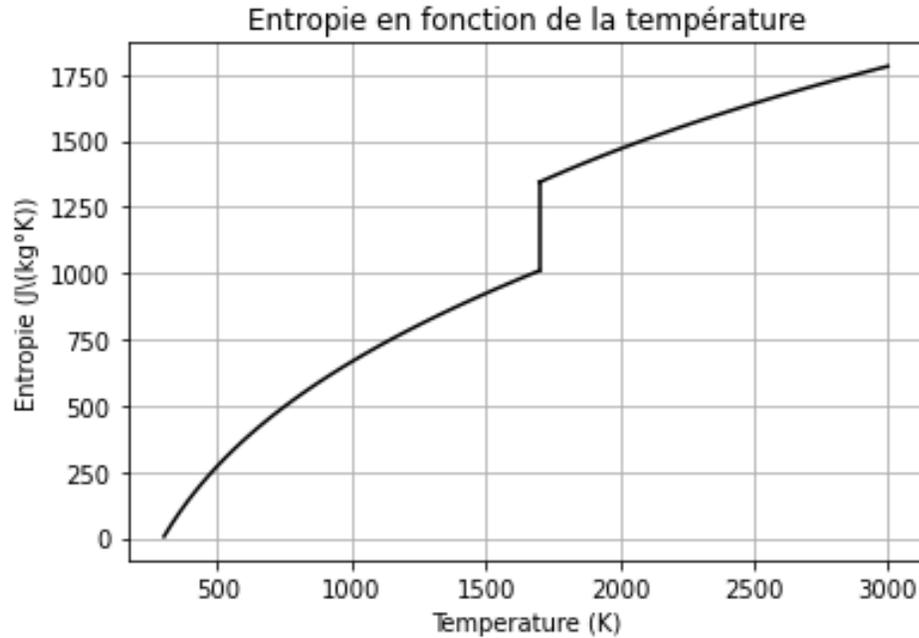


Figure 3.3 – Évolution de l'entropie en fonction de la température

Pression de vapeur saturante

Malheureusement, il n'existe pas de données expérimentales pour le 301LN permettant de déterminer la pression de vapeur saturante. Néanmoins, il est possible de considérer un fluide composé de 17 % de Cr, 7 % de Ni et finalement 76 % de fer, en négligeant la présence des autres éléments. Comme il est possible de connaître la vapeur saturante de chaque composant, cela permettra d'obtenir une estimation de la pression de vapeur saturante du fluide en utilisant l'équation 3.8.

$$P_{Tot}^{sat} = \sum_i P_i^{sat} \cdot \chi_i \quad (3.8)$$

Où i représente l'ensemble des composants du système et P_i^{sat} est la pression de vapeur saturante de l'élément i . La pression de vapeur saturante pour les éléments Fe, Cr et Ni sont consignés dans la table 3.4. En remplaçant dans l'équation 3.8, l'équation 3.9 est obtenue.

$$P_{Tot}^{sat}(T) = 0.760 \cdot P_{Fe}^{Sat}(T) + 0.170 \cdot P_{Cr}^{Sat}(T) + 0.070 \cdot P_{Ni}^{Sat}(T) \quad (3.9)$$

Afin d'obtenir une expression utilisable, une régression de la forme $\log(P_{Tot}^{Sat}) = A + \frac{B}{T}$ est utilisée où A et B sont des constantes.

$$\log(P_{Tot}^{Sat}) = 6.245 + \frac{19175}{T} \quad (3.10)$$

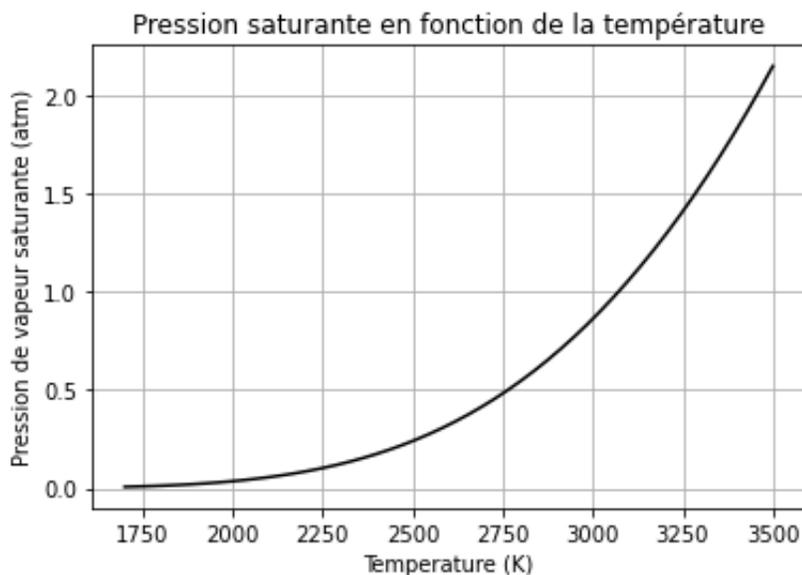


Figure 3.4 – Valeur de la pression saturante (atm) du 301Ln en fonction de la température (K)

L'évolution de la pression de vapeur saturante est donnée par le graphique 3.4.

Table 3.4 – Valeur de la pression saturante en fonction de la température pour le fer, le chrome et le nickel [26]

Température (K)	Pression de vapeur saturante (atm)		
	Fe	Cr	Ni
1700	6.37×10^{-6}	2.00×10^{-5}	2.63×10^{-6}
1800	2.99×10^{-5}	8.90×10^{-5}	1.28×10^{-5}
1900	$(1,13 \times 10^{-4})^a$	3.35×10^{-4}	5.20×10^{-5}
2000	(3.70×10^{-4})	1.09×10^{-3}	1.82×10^{-4}
2100	-	3.17×10^{-3}	5.60×10^{-4}
2200	(2.82×10^{-3})	8.03×10^{-3}	(1.55×10^{-3})
2300	-	1.86×10^{-2}	(3.92×10^{-3})
2400	(1.50×10^{-2})	3.99×10^{-2}	(9.11×10^{-3})
2500	-	(8.03×10^{-2})	(1.97×10^{-2})
2600	(6.04×10^{-2})	(0.154)	(4.00×10^{-2})
2700	-	(2.78×10^{-1})	(7.70×10^{-2})
2800	(0.198)	(4.82×10^{-1})	(1.41×10^{-1})
2900	-	(8.04×10^{-1})	(2.46×10^{-1})
3000	(0.546)	(1.30)	(4.14×10^{-1})
3100	-	-	-
3200	(1.31)	-	1.06

^a Les valeurs entre parenthèses sont des extrapolations

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

Masse volumique

Il n'existe pas de données expérimentales sur l'évolution de la masse volumique en fonction de la température du 301LN. Néanmoins, en connaissant les valeurs des masses volumiques des éléments constitutifs de l'acier, il est possible de déterminer celle du matériau en utilisant la formule de l'équation 3.11.

$$\rho = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{\rho_i}} \quad (3.11)$$

Où ρ est la masse volumique de l'alliage, ρ_i et x_i la masse volumique et la fraction massique de l'élément i . Les valeurs de la masse volumique en fonction de la température sont consignées dans le tableau 3.5. En utilisant une régression polynomiale l'équation 3.12 donne l'évolution de la masse volumique de la phase solide et l'équation 3.13 celle de la phase liquide.

$$\rho_s = 7.834 - 1.272 \times 10^{-4} \cdot T - 1.162 \times 10^{-7} \cdot T^2 \quad (3.12)$$

$$\rho_l = 9.813 - 1.825 \times 10^{-3} \cdot T + 1.726 \times 10^{-7} \cdot T^2 \quad (3.13)$$

Où ρ_s est la masse volumique de la phase solide alors que ρ_l est celui de la phase liquide. L'évolution de la masse volumique en fonction de la température a été tracée sur la figure 3.5.

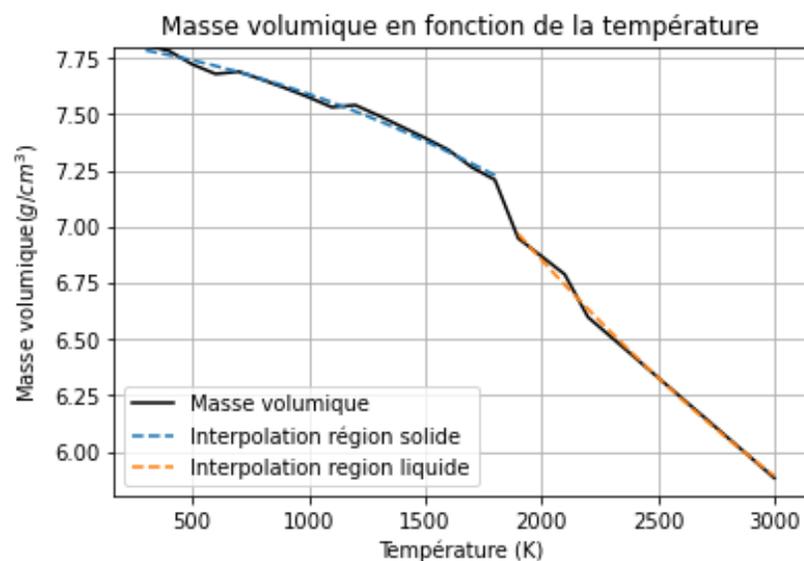


Figure 3.5 – Évolution de la masse volumique en fonction de la température

Table 3.5 – Valeur de la masse volumique en fonction de la température pour le fer , le chrome et le nickel [26]

Température (K)	Masse volumique ($g.cm^{-3}$)		
	Fe	Cr	Ni
300	7.865	7.21	8.901
400	7.836	7.2	8.87
500	7.808	7.15	8.36
600	7.715	7.16	8.8
700	7.739	7.13	8.761
800	7.7	7.11	8.72
900	7.658	7.09	8.677
1000	7.613	7.07	8,631
1100	7.565	7.04	8.582
1200	7.589	7.01	8.531
1300	7.539	6.98	8.477
1400	7.487	6.94	8.421
1500	7.433	6.91	8.362
1600	7.377	6.87	8.301
1700	7.29	6.83	8.237
1800	7.26	6.78	7.814
1900	6.935	6.74	7.696
2000	6.851	6.69	7.578
2100	6.768	6.63	7.46
2200	6.684	6.00	7.342
2300	6.601	(5.90) ^a	7.224
2400	6.517	(5.80)	7.106
2500	6.433	(5.70)	6.988
2600	(6.349)	(5.60)	6.87
2700	(6.266)	(5.50)	6.752
2800	(6.182)	(5.40)	6.634
2900	(6.098)	(5.30)	6.516
3000	(6.014)	(5.20)	(6.398)

^a Les valeurs entre parenthèses sont des extrapolations

Conductivité thermique

Comme il n'existe pas de données expérimentales pour la conductivité thermique de l'acier 301LN et aucun moyen de la calculer théoriquement, les équations obtenues pour l'acier 304L seront utilisés pour la suite.

$$k_s = 8.116 \times 10^{-2} + 1.641 \times 10^{-4} \cdot T \quad (3.14)$$

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

$$k_l = 1.229 \times 10^{-1} + 3.248 \times 10^{-5} \cdot T \quad (3.15)$$

Où k_s (respectivement k_l) est la conductivité thermique dans la région solide (région liquide). L'évolution de la conductivité thermique est tracée sur la figure 3.6.

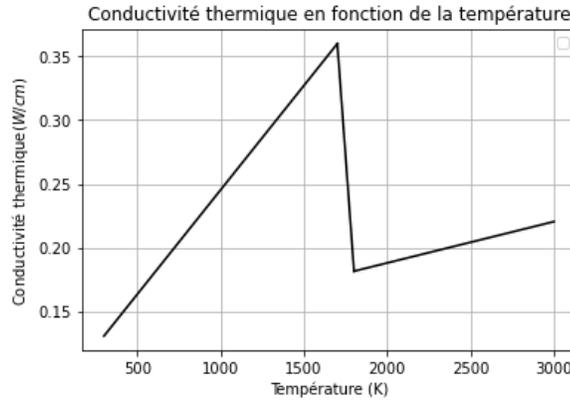


Figure 3.6 – Évolution de la conductivité thermique en fonction de la température

2.3 Physique

Équation de chaleur

Le modèle se base sur la résolution de l'équation de chaleur en 2 dimensions découlant de la seconde loi de Fourier. La résolution de l'équation 3.16 permet de trouver le champ de chaleur.

$$d_z \cdot \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = d_z \cdot k \nabla^2 T + Q(x, y, t) \quad (3.16)$$

Où ρ , C_p , k , Q et d_z sont respectivement la masse volumique, la capacité thermique, la conductivité thermique, la source de chaleur et la largeur de la plaque simulée. Le changement de phase est modélisé par la fonction de Heaviside, représentée sur le graphique 3.7. Où θ_s et θ_l représentent respectivement la proportion de la phase solide et liquide, et $\Delta T_{pc,s \rightarrow l}$ est la différence de température entre le liquide et le solidus. Dans cette région de température, le matériau respecte les propriétés décrites par les équations du système 3.17.

$$\begin{cases} \rho = \rho_{solid} \\ C_p = \theta_s C_{p,s} + \theta_l C_{p,l} + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \\ \alpha_m = \frac{1}{2} \frac{\theta_l - \theta_s}{\theta_s + \theta_l} \\ k = \theta_s k_s + \theta_l k_l \\ \theta_s + \theta_l = 1 \end{cases} \quad (3.17)$$

Où L_f est la chaleur latente de fusion

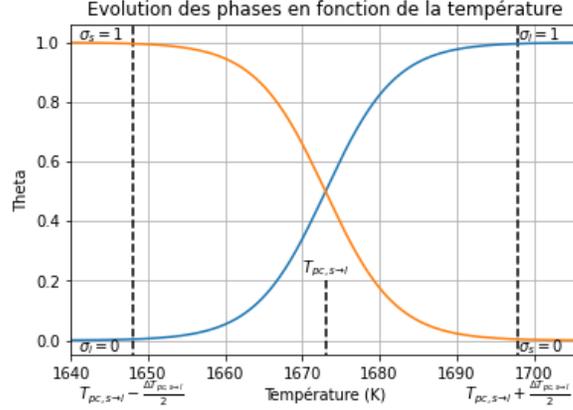


Figure 3.7 – Évolution des coefficients de présence de chaque phase en fonction de la température

Conditions aux limites

Il y a des échanges de chaleur entre les plaques et l'air ambiant, ce qui permet le refroidissement des plaques. Cette condition est appliquée sur la partie supérieure de la modélisation. La loi de Newton est utilisée pour la modélisation, décrite par l'équation 3.18.

$$Q_{conv} = h(T - T_0) \quad (3.18)$$

Où h est le coefficient de convection naturelle qui, dans ce cas, vaut environ $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, et T_0 est la température de la pièce fixée à 293.15 K . Il y a aussi un effet radiatif qui agit sur la partie supérieure du modèle et est décrit par la loi de Stefan-Boltzmann donné par l'équation 3.19.

$$Q_{rad} = \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) \quad (3.19)$$

Où σ est la constante de Boltzmann et ϵ est l'émissivité du matériau, qui dans le cas d'un acier inoxydable, vaut environ 0.6 . Et finalement, les plaques inférieures sont considérées comme thermiquement isolées et modélisées par l'équation 3.20.

$$-\vec{n} \cdot (k \nabla \vec{T}) = 0 \quad (3.20)$$

Où \vec{n} est un vecteur normal de la surface où la condition d'isolement thermique est appliquée.

Source de chaleur

Il faut maintenant identifier la source de chaleur. Dans la littérature, la source de chaleur liée au laser est souvent modélisée par une distribution gaussienne [3]. Le modèle est adapté pour la simulation en deux dimensions et décrit par l'équation 3.21.

$$Q(x, y, z, t) = \frac{Q_0 \cdot A_c \cdot \epsilon}{2\pi r^2} \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_l(t))^2}{2r^2} - \frac{(y - y_l(t))^2}{2r^2} - A_c \cdot |z_0 - z_l(t)|\right) \quad (3.21)$$

Où Q_0 , A_c , ϵ , r , A , f et v sont respectivement la puissance du laser, l'absorption du matériau, émissivité du matériau le rayon du laser, l'amplitude, la fréquence d'oscillation du

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

laser et la vitesse du laser. Où les fonctions $x_l(t)$, $y_l(t)$ et $z_l(t)$ décrites par les équations 3.22 représentent la position du laser à l'instant t .

$$\begin{cases} x_l(t) = \min(x_0, x_0 + \frac{A}{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)) \\ y_l(t) = v \cdot t \\ z_l(t) = \max(z_0, z_0 + \frac{A}{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \pi)) \end{cases} \quad (3.22)$$

x_0 et z_0 représentent la position de la jointure entre les deux plaques. Le sinus permet de modéliser l'oscillation du laser cependant au vu de la géométrie il est nécessaire d'ajouter le min ou le max en fonction des cas afin de bloquer la source de chaleur à l'extérieur du matériau. La distribution gaussienne est représentée sur la figure 3.8.

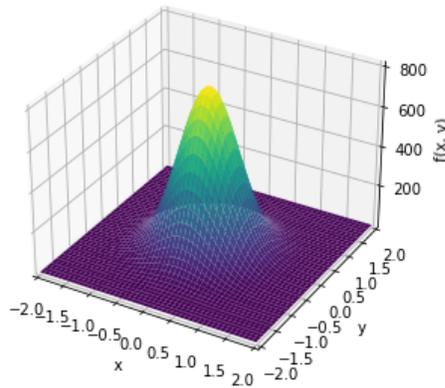


Figure 3.8 – Schéma de la distribution de puissance du laser

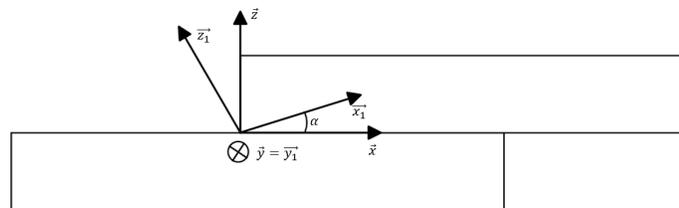


Figure 3.9 – Définition des repères

Comme le montre la figure 3.9 le système de coordonnées (x, y, z) où la source de chaleur est modélisée et le système (x_1, y_1, z_1) utilisé par COMSOL pour la résolution du calcul ne sont pas identiques. La relation entre ces deux systèmes de coordonnées est donnée par le

système d'équations 3.23.

$$\begin{cases} x = \cos(\alpha).x_1 + \sin(\alpha).z_1 \\ y = y_1 \\ z = -\sin(\alpha).x_1 + \cos(\alpha).z_1 \end{cases} \quad (3.23)$$

Il suffit donc de remplacer dans l'équation 3.21 afin de finaliser la modélisation.

Géométrie

Le maillage est fabriqué de sorte à avoir des éléments tétraédriques très fins au niveau de l'angle de jointure et plus gros pour le reste afin de réduire le temps de calcul. Pour déterminer les bons paramètres de maillage, une étude de convergence est effectuée avec les paramètres suivants : $P = 2500 \text{ W}$, $v = 3.5 \text{ m.min}^{-1}$, une amplitude d'oscillation du laser $A = 1.5 \text{ mm}$ et un diamètre focal $d = 0.3 \text{ mm}$. Une étude de convergence du maillage a été menée. En effet, la valeur maximale de température pour un point donné a été mesurée et mise en corrélation avec la densité surfacique des éléments du maillage. Dans le cas de cette étude les deux points se trouvant aux extrémités de la jointure sont utilisés. Les résultats sont donnés par le graphique 3.10.

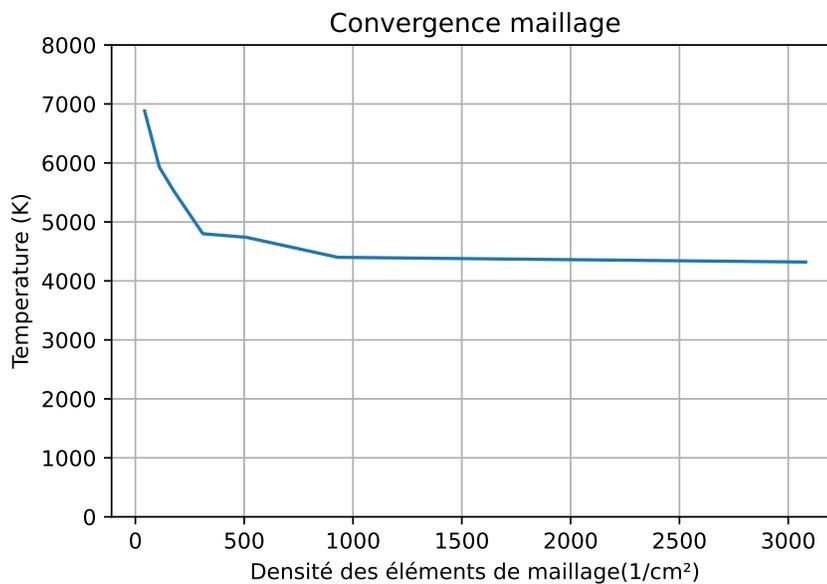


Figure 3.10 – Convergence du maillage

Le maillage est construit de façon à avoir le maillage le plus fin possible au niveau de l'angle de jointure. Ainsi ceux sont les éléments de cette zone qui varie durant l'étude de convergence du maillage dont les résultats sont donnés par le graphique 3.10. Afin d'avoir le maillage le plus précis possible le module de COMSOL 'Adaptative mesh' est utilisé, la figure 3.11 montre que les éléments les plus fins se trouvent sur la trajectoire du laser.

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

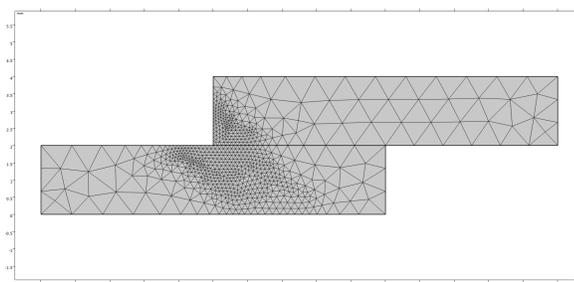


Figure 3.11 – Maillage final

Paramètres du laser et du modèle

Plusieurs simulations sont lancées en série avec chacun des paramètres opératoires différents afin de déterminer le rôle de cesdits paramètres dans les propriétés géométriques de la soudure. Les paramètres opératoires sont résumés dans la table 3.6. Ainsi, en utilisant la

Table 3.6 – Paramètres opératoires

Paramètres	niveau 1	niveau 2	niveau 3
Diamètre focal	0.25 mm	0.30 mm	0.35 mm
Vitesse	3.5 $m.min^{-1}$	4.0 $m.min^{-1}$	4.5 $m.min^{-1}$
Puissance	2.6 kW	2.7 kW	2.8 kW
Amplitude	1.25 mm	1.50 mm	1.75 mm

méthode de Taguchi et la table $L_9(3^4)$, la table 3.7 a été créée et regroupe l'ensemble des simulations qui seront effectuées.

Table 3.7 – Paramètres des essais

Essais	Diamètre focal (mm)	Vitesse ($m.min^{-1}$)	Puissance (kW)	Amplitude (mm)
1	0,25	3,5	2,6	1,25
2	0,25	4,0	2,7	1,50
3	0,25	4,5	2,8	1,75
4	0,3	3,5	2,7	1,75
5	0,3	4,0	2,8	1,25
6	0,3	4,5	2,6	1,50
7	0,35	3,5	2,8	1,50
8	0,35	4,0	2,6	1,75
9	0,35	4,5	2,7	1,25

La méthode de conception d'expérience (DOE) vise à définir les combinaisons possibles d'une expérience impliquant plusieurs facteurs afin de déterminer la meilleure combinaison.

Pour y parvenir, les facteurs et leurs niveaux sont identifiés. Elle permet également l'étude des interactions entre les facteurs, ce qui permet d'obtenir de meilleurs résultats plus rapidement. La méthode, lorsqu'elle est utilisée pour l'optimisation du DOE, utilise des tables orthogonales pour obtenir le nombre minimal de simulations à effectuer afin d'obtenir les meilleurs résultats. Le rapport signal/bruit (S/N) sert de fonction d'optimisation contribuant à l'analyse des données. La formule peut alors être définie par le ratio de l'équation 3.24.

$$\eta_i = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{Y_{ij}^2} \right] \quad (3.24)$$

Où i est le numéro de l'essai, Y_{ij} est la valeur du i -ème processus et de la j -ème expérience, et enfin n représente le nombre d'expériences. Enfin, si l'une des propriétés doit être maximisée, alors il faut maximiser ce ratio, et inversement.

Pour les simulations et les expériences, la pénétration et la largeur des soudures seront mesurées. Pour la simulation, le plan de coupe se situe au milieu de la soudure, c'est-à-dire à $t_{\text{coupe}} = \frac{L}{2v}$. Le temps total final de simulation est donné par $t_{\text{finale}} = \frac{L}{v}$ où L est la largeur de la plaque.

2.4 Estimateur statistique

Pour analyser les résultats cinq estimateurs statistiques seront utilisés : 3.25 le coefficient de corrélation de Pearson (R^2), 3.26 l'erreur moyenne absolue (MAE), 3.27 L'erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE), 3.28 L'erreur moyenne quadratique (MRSE) et 3.29 l'erreur moyenne relative quadratique (RMRSE).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.25)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3.26)$$

$$MAPE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \right) \cdot 100(\%) \quad (3.27)$$

$$MRSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.28)$$

$$RMRSE = \frac{MRSE}{\bar{y}} \cdot 100(\%) \quad (3.29)$$

Où respectivement y_i , \hat{y}_i et \bar{y} représentent la valeur de la simulation de l'essai i , la valeur expérimentale de l'essai i ainsi que la valeur moyenne des expériences.

2.5 Calcul de la morphologie du cordon

La simulation permet d'obtenir le champ de température $T(x, y, z, t)$ ainsi que le champ de représentant la fraction volumique de la phase liquide $\theta_l(x, y, z, t)$. Cependant ce dernier

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

n'est pas exploitable dans l'état comme il varie dans le temps et il est compliqué de déterminer une région de cordon de soudure. Pour cela le champ défini par l'équation 3.30 est utilisé. Pour la mesure de la largeur de la soudure simulée, la mesure s'effectue en partant du point en surface le plus éloigné de la jointure de la plaque inférieure jusqu'au point en surface le plus éloigné de la jointure de la plaque supérieure.

$$\Theta(x, y, z) = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} \theta_l(x, y, z, t) dt \quad (3.30)$$

Le champ $\Theta(x, y, z)$ est construit de sorte à s'annuler si le point étudié ne s'est pas liquéfié. Le champ obtenu permet de déterminer le cordon de soudure finale. Pour mesurer la pénétration à partir de la simulation, le champ Θ_2 est affiché et traité avec le logiciel ImageJ. La mesure s'effectue entre l'angle de la jointure entre les deux plaques jusqu'à l'élément le plus éloigné de celui-ci.

3 Résultat et discussion

3.1 Morphologie du cordon de soudure

Dans un premier temps la forme générale de la soudure est observée afin de déterminer si la simulation propose un résultat cohérent.

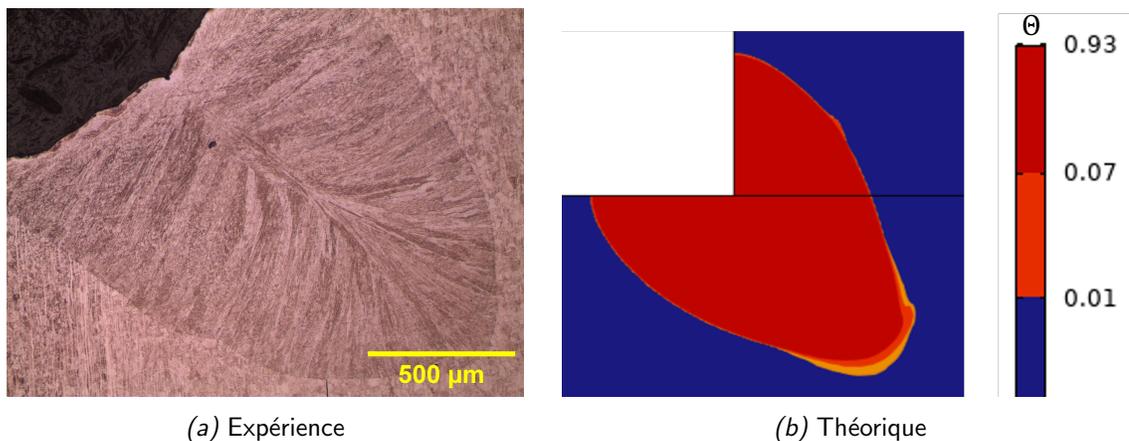


Figure 3.12 – Comparaison de la zone de soudure entre la simulation et l'expérience

La figure 3.12a montre la morphologie du cordon de soudure obtenue avec les paramètres de l'essai 7. La forme du cordon de soudure obtenue par simulation est donnée par la figure 3.12b, le parti en rouge correspond à la zone de l'acier qui a fondu, en orange seulement partiellement et en bleu l'acier est resté entièrement solide durant la simulation. En général la figure 3.12 montre que la forme générale de la zone de soudure est respectée. Néanmoins pour savoir si le modèle est prédictif il faut mesurer les propriétés géométriques de la soudure telles que la pénétration, la largeur de la soudure ainsi que cette surface. Une différence notable est la forme du cordon au niveau de la jointure entre les deux plaques. Pour la soudure expérimentale, le cordon prend une forme arrondie. Dans la simulation ce

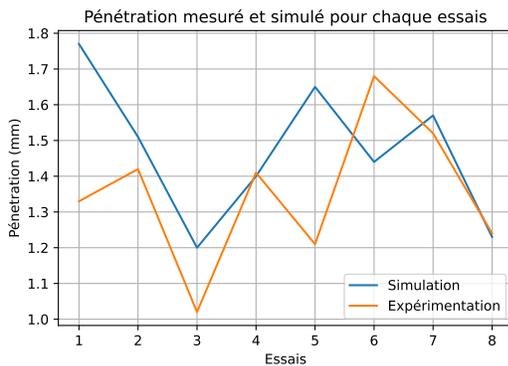
phénomène n'est pas reproduit, son origine provient de l'écoulement du métal en fusion de la plaque supérieur vers celle inférieure.

3.2 Pénétration

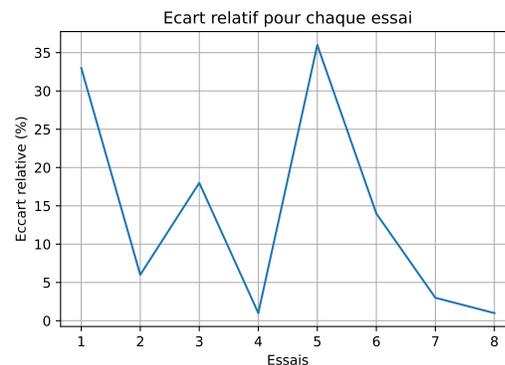
Les résultats théoriques et expérimentaux sont consignés dans le tableau 3.8. Les valeurs obtenues par simulation sont du même ordre de grandeur, néanmoins pour les essais 1, 3 et 5 et les mesures montrent une surestimation de la pénétration. Cependant pour les autres essais l'erreur entre la mesure et la simulation n'est pas très grande, en effet elle varie entre 1 et 16 %. Également la figure 3.13a montre la variation des valeurs de la pénétration.

Table 3.8 – Mesure de la pénétration

Essais	Pénétration théorique (mm)	Pénétration mesurée (mm)	Erreur (%)
1	1.77	1.33	33
2	1.51	1.42	6.0
3	1.2	1.02	18
4	1.4	1.41	1.0
5	1.65	1.21	36
6	1.44	1.68	14
7	1.57	1.52	3.0
8	1.23	1.24	1.0



(a) Évolution de la pénétration mesurée et simulée en fonction des essais



(b) Écart relatif de la pénétration

À l'exception des points 1, 5 et 6 la variation de la courbe théorique et expérimentale semble être similaire.

Cependant pour les points 1, 5 et 6, le modèle n'est pas suffisamment complet pour prédire les phénomènes qui se déroulent pendant les essais 1, 5 et 6. En effet celui-ci ne prend pas en compte l'écoulement de la phase liquide ainsi que la vaporisation due au fort apport de chaleur. Également à l'exception de l'essai 6, les valeurs calculées par simulation numérique sont supérieures à celle expérimentale. Le modèle surestime la pénétration. Cela peut être

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

expliqué par la négligence de certains phénomènes, lié au mouvement interne du fluide n'ayant pas été modélisé, cela peut en partie expliquer cette surestimation de la pénétration particulière dans les effets de la tension superficielle [17].

La figure 3.13b montre l'écart relatif de la pénétration calculée et celle mesurée expérimentalement. À l'exception des points 1 et 5 l'erreur relative est comprise entre 1% et 18% ce qui pour un modèle se basant que sur la diffusion de chaleur est correcte. Cependant pour les points 1 et 5 l'erreur est de l'ordre de 35% ce qui est élevé. La valeur commune entre ces deux points est l'amplitude qui vaut 1.25 mm, il est possible d'émettre l'hypothèse que le modèle est des difficultés à calculer le champ de température pour des valeurs plus faibles de l'amplitude. En effet dans ce cas la densité d'énergie est la plus élevée et ainsi négliger la vaporisation du métal et la réflexion du faisceau sur les bords de la soudure peut expliquer les difficultés du modèle à simuler les faibles amplitudes des oscillations du laser. Les estimateurs sont calculés pour la pénétration et consignés dans la table 3.9.

Table 3.9 – Résultat des estimateurs statistiques

Estimateur statistique	valeurs
R^2	0.322
MAE	0.162
MAPE	14.65
MRSE	0.087
RMRSE	6.45

Les estimateurs statistiques montrent que le modèle ne peut pas être utilisé pour prédire avec précision la pénétration néanmoins il permet d'en donner une valeur approchée, dans certains cas cela peut être intéressant.

Néanmoins, il est intéressant de regarder comment les paramètres opératoires influencent les résultats de la pénétration.

La figure 3.10 montre les résultats de l'étude statistique ANOVA, la valeur de p de la régression est bien inférieure à 0.05 ce qui confirme la validité du modèle, également la contribution de l'erreur est de 2.14% ce qui permet d'affirmer qu'aucun paramètre n'a été oublié. Avec cette étude statistique il est possible de déterminer l'influence des paramètres sur la pénétration. D'après la figure 3.14 les paramètres ayant le plus d'impact sur la pénétration simulé sont la vitesse (V) et l'amplitude (A). Cela est confirmé par les valeurs de contributions obtenues par l'analyse statistique qui sont respectivement 36.73% et 57.8%. Les quatre paramètres ont une influence linéaire sur la pénétration. Néanmoins la puissance (P) et le diamètre focal (D) ont une très faible pente, en effet, la pente est corrélée à la contribution trouvée pendant l'analyse ANOVA. Il est cependant étonnant de trouver que la puissance n'influence pas la pénétration alors que dans la littérature la pénétration est directement corrélée à la pénétration [27]. En effet d'après Dal et Fabbro [28] il existe de nombreuses modélisations du faisceau laser et chacune peut influencer le résultat final. Il est possible que la modélisation choisie soit à l'origine de cette faible influence de la pénétration.

Table 3.10 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la pénétration

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	4	0.264502	97.86%	0.264502	0.066125	34.29	0.008
D	1	0.008939	3.31%	0.001486	0.001486	0.77	0.445
V	1	0.099282	36.73%	0.033126	0.033126	17.18	0.026
P	1	0.000067	0.02%	0.000067	0.000067	0.03	0.864
A	1	0.156214	57.80%	0.156214	0.156214	81	0.003
Erreur	3	0.005786	2.14%	0.005786	0.001929		
Total	7	0.270288	100.00%				

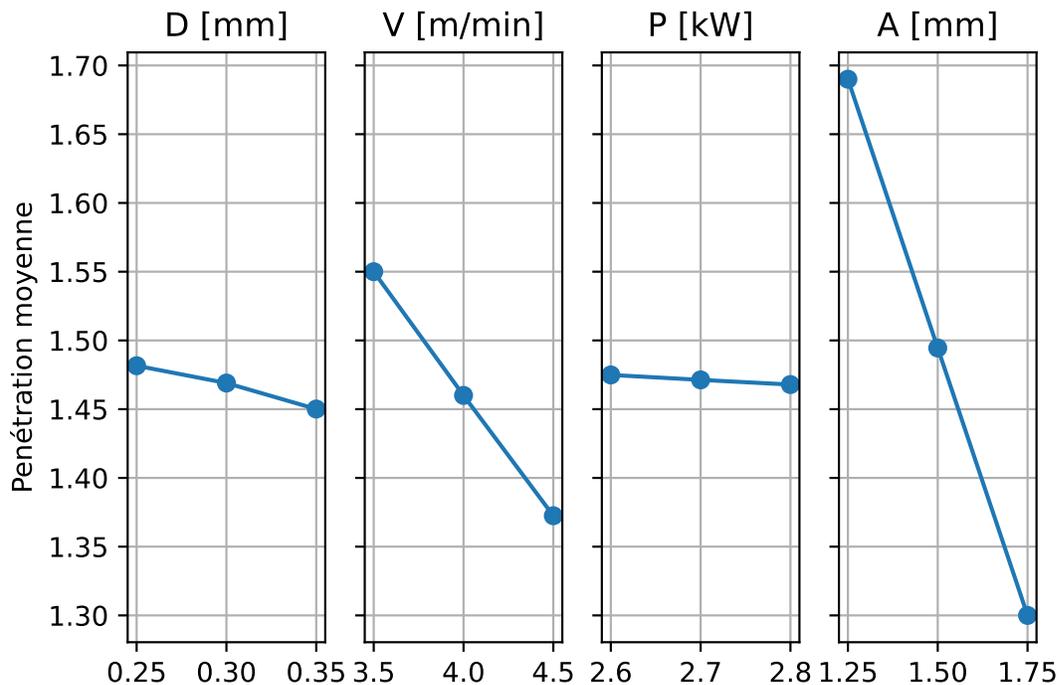


Figure 3.14 – Influence des paramètres opératoires sur la pénétration calculée

L'amplitude quant à elle semble être très influente sur la pénétration, certains phénomènes censés réduire l'influence de l'amplitude ne sont pas modélisés comme les turbulences dans le bain de fusion ou la tension surfacique. La figure 3.15 montre qu'il existe une grande différence de contribution des paramètres opératoires entre la simulation et l'expérience. En effet pour le cas de la puissance il y a un écart de 42%. Dans la simulation la puissance n'a presque aucune influence sur la pénétration contrairement à la réalité. La simulation numérique a donc des difficultés à transmettre l'énergie apportée par le laser vers l'intérieur

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

des plaques. Dans le modèle la vaporisation de métal est négligée, cependant ce phénomène possède une grande influence sur comment la chaleur se transmet en profondeur. Expliquant en partie la différence entre les valeurs expérimentale et simulée.

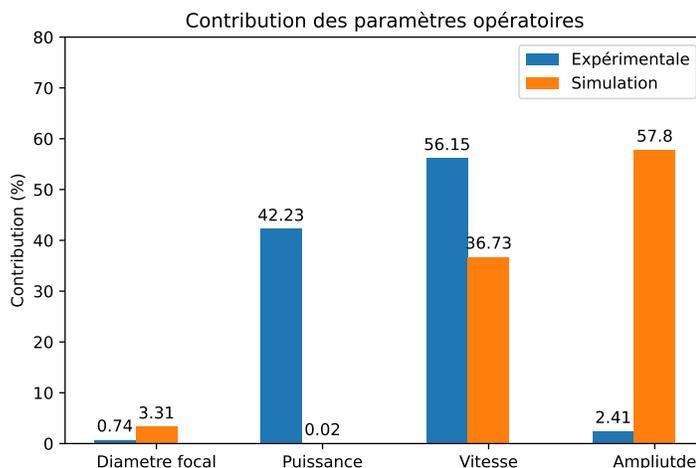


Figure 3.15 – Comparaison de la contribution des paramètres opératoires entre la simulation et l'expérience

3.3 Largeur de la soudure

Les résultats mesurés sont consignés dans le tableau 3.11. Les valeurs obtenues par la simulation sont du même ordre de grandeur que l'expérience néanmoins il y a une erreur comprise entre 1% et 22%. Cette fois le modèle semble globalement sous-estimer l'amplitude. Ce phénomène peut être expliqué par le manque d'inertie de la source laser, en effet dans la réalité lorsque le laser atteint les extrémités de ses oscillations il s'arrête un temps pour des raisons mécaniques, chose que n'est pas modéliser. La figure 3.16 compare la valeur de la

Table 3.11 – Mesure de la largeur de la soudure

Essais	Largeur simulés(mm)	Largeur expérimentale (mm)	Erreur (%)
1	1.25	1.59	21
2	1.37	1.28	7.0
3	1.5	1.66	10
4	1.58	1.57	1.0
5	1.26	1.46	14
6	1.35	1.27	6.0
7	1.46	1.58	8.0
8	1.55	1.79	13

largeur mesurée et simulée pour chaque essai. La variation de la largeur de la soudure sur la

simulation semble être principalement due à l'amplitude. Également la variation des valeurs expérimentales et théoriques semble être similaire. La figure 3.17 montre l'écart relatif de la largeur de la soudure entre la simulation et l'expérimentation pour chaque essai. Les valeurs de l'erreur relative sont comprises entre 1% et 21%. Cela permet de dire que le modèle n'est pas suffisamment proche de la réalité afin de prédire avec précision la largeur de la soudure, cependant cela peut donner un ordre de grandeur.

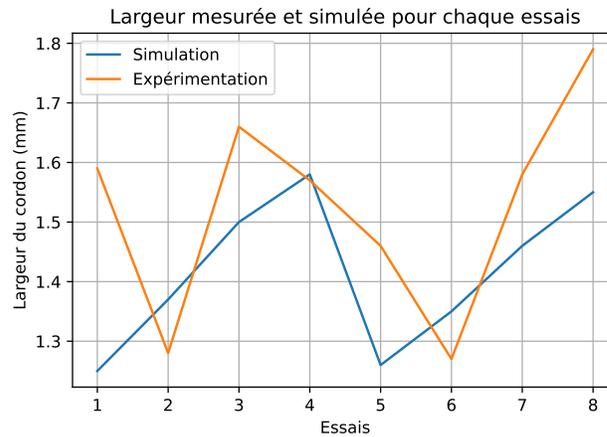


Figure 3.16 – Largeur de la soudure mesurée et simulée pour chaque essai

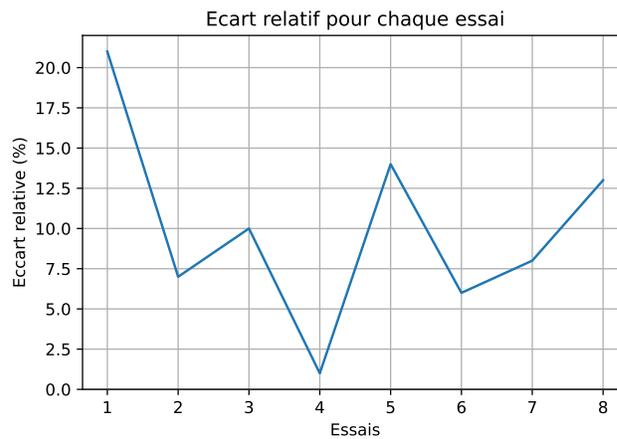


Figure 3.17 – Écart relatif de la largeur de la soudure pour chaque essai

Les mêmes estimateurs que la partie sur la pénétration sont utilisés et les résultats sont consignés dans la table 3.13 Les estimateurs statistiques montrent, que le modèle n'est pas précis néanmoins il permet d'avoir une approximation de la largeur de la soudure. La table 3.12 consigne les résultats de l'étude statistique Anova des valeurs simulées. La valeur p du modèle est inférieure à 0.025 ce qui confirme la validité du modèle statistique trouvé. Une particularité de celui-ci est ça avec simplicité en effet, il est linéaire pour chacun des

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

Table 3.12 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la largeur

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	4	0.111893	99.73%	0.111893	0.027973	273.52	0
D	1	0.019082	17.01%	0.003676	0.003676	35.94	0.009
S	1	0.002553	2.28%	0.004735	0.004735	46.3	0.006
P	1	0.000323	0.29%	0.000164	0.000164	1.6	0.295
A	1	0.089935	80.16%	0.089935	0.089935	879.37	0
Erreur	3	0.000307	0.27%	0.000307	0.000102		
Total	7	0.1122	100.00%				

paramètres. La figure 3.18 montre la contribution des paramètres opératoire sur la largeur de la soudure pour la simulation et l'expérimentation. Ce graphique confirme la forte importance de l'amplitude dans la simulation, en effet ce paramètre contribue pour 80.16%. Cependant il semblerait que le modèle surestime l'importance de l'amplitude par rapport au diamètre focal. Dans la réalité les contributions sont moins polarisées.

Comme ce modèle a été conçu en deux dimensions, le modèle de la source de chaleur ne doit pas représenter fidèlement le diamètre focal.

Table 3.13 – Résultat des estimateurs statistiques pour la largeur de la soudure

Estimateur statistique	valeurs
R^2	0.526
MAE	0.137
MAPE	9.96
MRSE	0.11
RMRSE	7.21

3.4 Surface de la zone de soudure

La dernière propriété géométrique qui peut être mesurée est la surface de la zone de soudure qui est assimilée aux champs θ_l dont la valeur vaut 1. Pour mesurer cette surface, le logiciel image J est utilisé et les résultats obtenus sont consignés dans la table 3.14. Le graphique 3.19 permet de mettre en évidence que la simulation donne en moyenne des valeurs supérieures à l'expérimentation d'environ 39%. Cette surestimation de la surface est liée à celle de la pénétration.

Également le modèle semble plus sensible aux variations des paramètres opératoires que les expériences. Afin de vérifier la validité du modèle les estimateurs habituels sont utilisés et leurs résultats sont consignés dans la table 3.15.

Les résultats obtenus montrent une très faible corrélation entre l'expérience et la simulation, en effet l'estimateur MAPE et RMRSE ont comme valeur respectivement 68% et 65% ce

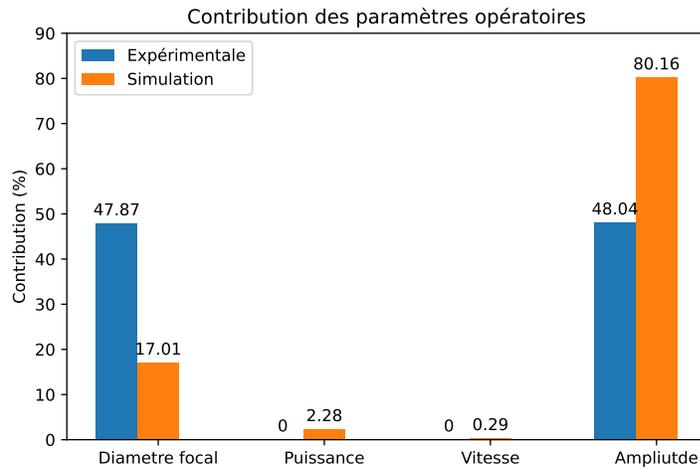


Figure 3.18 – Contribution des paramètres opératoires sur la largeur de la soudure

Table 3.14 – Valeur des surfaces mesurée

Soudure	Plaque Inf (mm^2)	Plaque sup (mm^2)	Total (mm^2)
1	1.983	0.566	3.549
2	1.693	0.56	4.253
3	1.487	0.585	5.072
4	1.89	0.707	6.597
5	1.821	0.536	7.357
6	1.458	0.487	7.945
7	1.987	0.682	9.669
8	1.52	0.601	10.121

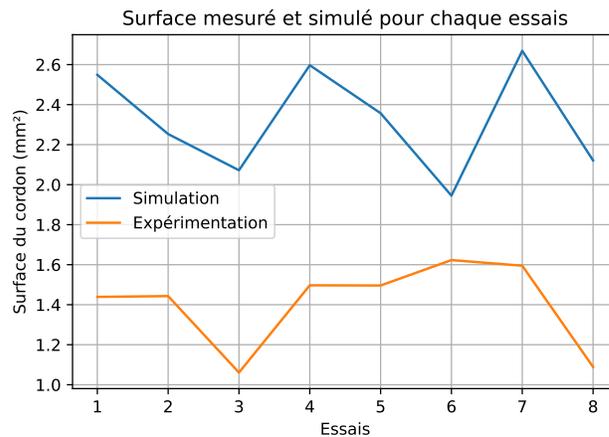


Figure 3.19 – Variation de la surface mesurée et simulée en fonction des essais

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

Table 3.15 – Résultat des estimateurs statistiques pour la surface de la soudure

Estimateur statistique	valeurs
R^2	0.416
MAE	0.81
MAPE	68%
MRSE	0.915
RMRSE	65%

Table 3.16 – Valeur des rapports

Soudure	1	2	3	4	5	6	7	8
R_{supp}	22%	25%	28%	27%	23%	25%	26%	28%

Table 3.17 – Résultat de l'étude ANOVA pour la modélisation de la surface

Source	DL	SC seq	Contribution	SC adj	Cm adj	Valeur de F	Valeur de p
Régression	4	0.471832	94.64%	0.471832	0.117958	13.24	0.03
D	1	0.011461	2.30%	0.011806	0.011806	1.33	0.333
S	1	0.424814	85.21%	0.369271	0.369271	41.45	0.008
P	1	0.003141	0.63%	0.003498	0.003498	0.39	0.575
A	1	0.032416	6.50%	0.032416	0.032416	3.64	0.152
Erreur	3	0.026726	5.36%	0.026726	0.008909		
Total	7	0.498558	100.00%				

qui indique que le modèle est globalement éloigné de l'expérience.

Néanmoins une étude statistique ANOVA permettrait de comparer la contribution des paramètres opératoires entre la simulation et l'expérience afin de vérifier si ceux-ci ont la même influence.

Le résultat de l'étude ANOVA est donné par le tableau 3.17. Tout comme pour la largeur de la soudure, le modèle trouvé par l'étude ANOVA est assez simple et dépend seulement linéairement des valeurs des paramètres opératoires. La figure 3.20 montre la différence de contribution des paramètres opératoires entre l'expérience et la simulation. Dans la simulation la vitesse est le paramètre ayant le plus d'influence alors que pour les expériences, cela est moins polarisé, en effet pour le diamètre focal, la vitesse et la puissance de leurs contributions sont similaires avec une valeur comprise entre 12% et 22% alors que l'amplitude quant à elle possède une valeur de 46%. Du point de vue mathématique la vitesse est directement liée au temps d'interaction entre le laser et la matière, cela peut expliquer pourquoi la vitesse aussi importante pour la surface d'après le modèle.

Finalement, une dernière grandeur peut être mesurée, le rapport de la surface de la soudure se trouvant sur la plaque supérieure par rapport à la surface totale, cette grandeur

sera notée R_{sup} par la suite.

La table 3.16 montre que globalement le rapport est constant. Ce résultat semble cohérent, en effet le problème traité est symétrique par rapport à l'axe central du faisceau laser, ce qui implique une conservation de du rapport R_{sup} . Néanmoins pour avoir une soudure le plus solide possible il est plus intéressant de faire tendre ce rapport vers 50%. Afin d'y arriver l'origine du laser doit être déplacée vers la plaque supérieure afin d'augmenter la densité d'énergie transmise au matériau.

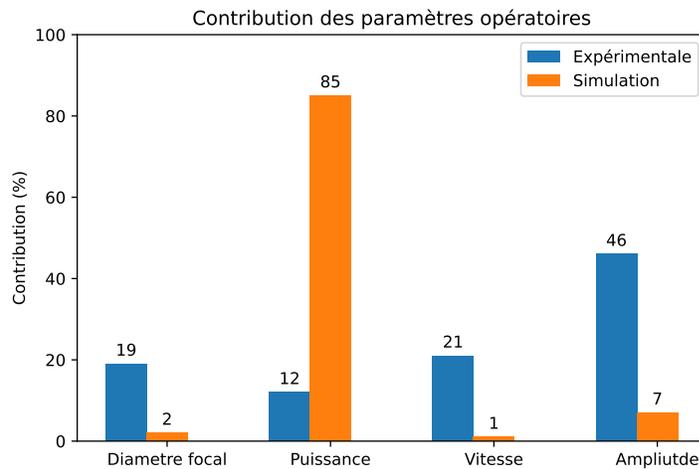


Figure 3.20 – Contribution des paramètres opératoires sur la surface de la soudure

4 Conclusion

Cette étude avait pour objectif de trouver le champ de température pour une soudure laser en angle pour l'acier AISI 301LN, afin de prédire la morphologie du cordon de soudure. Durant cette étude plusieurs résultats ont été trouvés :

- La mise en position utilisée durant cette simulation apporte une certaine difficulté comme l'apparition d'une singularité au centre de la jointure entre les deux plaques, qu'il est possible de résoudre en affinant le maillage ce qui augmente grandement le temps de calcul.
- Le modèle a permis de trouver une morphologie du cordon de soudure similaire à celle obtenue par expérimentation.
- Pour la pénétration, elle semble être surestimée par le modèle, cela est provoqué par un manque de complexité du modèle, en effet seulement l'équation de chaleur est résolue, cependant le soudage laser est bien trop compliqué pour résumé à cette simple équation. Également le modèle donne une trop grande importance à l'amplitude contrairement à l'expérimentation. Ainsi le modèle utilisé ne réagit pas à la modification des paramètres opératoire que la réalité.
- L'écart de la largeur de la soudure obtenue par simulation et l'expérimentation est plus faible que pour la pénétration, néanmoins elle est principalement influencée par l'amplitude

3. Modélisation de la morphologie du cordon de soudure pour le soudage laser à un angle de l'acier 301LN avec un effet d'oscillation laser

- La surface est surestimée en moyenne de 39%, néanmoins les deux paramètres influant sont les mêmes pour l'expérimentation et la simulation ; le diamètre focal et l'amplitude. Cependant leur influence est plus polarisée dans le cas de la simulation.
- Également durant l'analyse des résultats, les estimateurs statistiques ne sont pas suffisants et élevés afin de conclure que le modèle est capable de prédire les propriétés géométriques avec précision. Principalement dû à la géométrie utilisée impose une grande influence sur l'écoulement de la phase liquide se trouvant sur la plaque supérieure.

Finalement le modèle présenté permet d'approximer le comportement thermodynamique de la soudure de 301LN dans une mise en position d'angle et permet de mieux comprendre la diffusion de chaleur dans celle-ci. Néanmoins afin d'augmenter en précision il serait nécessaire d'implémenter l'écoulement de la phase liquide.

Bibliographie

- [1] Y. W. Park, H. Park, S. Rhee, and M. Kang, "Real time estimation of CO2 laser weld quality for automotive industry," *Optics & Laser Technology*, vol. 34, pp. 135–142, Mar. 2002.
- [2] S. Dehghan, M. I. S. B. Ismail, and E. Souri, "A thermo-mechanical finite element simulation model to analyze bushing formation and drilling tool for friction drilling of difficult-to-machine materials," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 57, pp. 1004–1018, Sept. 2020.
- [3] Oussaid, Kamel, "Prédiction des attributs géométriques du joint de soudure dans le cas de soudage au laser par recouvrement de tôles en acier galvanisé : modèle 3D et réseaux de neurones,"
- [4] Balasubramanian, "Numerical and experimental investigation of laser beam welding of AISI 304 Stainless steel sheet,"
- [5] Y. Robert, "Simulation numérique du soudage du TA6V par laser YAG impulsionnel : caractérisation expérimentale et modélisation des aspects thermomécaniques associés à ce procédé,"
- [6] X. Li, W. Liu, X. Guo, Z. Zhang, and Z. Song, "Microstructure Evolution of Laser Welded 301LN and AISI 304 Austenitic Stainless Steel," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 54, pp. 1186–1198, Apr. 2023.
- [7] M. Reayat, M. Morales, M. Moradi, and A. Mateo, "Laser wobbling surface texturing of AISI 301LN steel for enhancement of the corrosion resistance at high temperature," *Optics & Laser Technology*, vol. 171, p. 110375, Apr. 2024.
- [8] M. R. Kumar and I. Tomashchuk, "A first approximation to the modeling of vapor plume evolution in laser welding,"
- [9] I. Tomashchuk, I. Bendaoud, J.-M. Jouvard, and P. Sallamand, "The numerical challenges in multiphysical modeling of laser welding with arbitrary Lagrangian-Eulerian method," 2018.
- [10] M. Courtois, M. Carin, P. L. Masson, S. Cadiou, and S. Gaied, "A method to reduce calculation time in multiphysic modelling of welding processes. Application to laser and GMAW welding.,"

- [11] M. Behúlová and E. Babalová, "Numerical Simulation of Temperature Fields during Laser Welding–Brazing of Al/Ti Plates," *Materials*, vol. 16, p. 2258, Mar. 2023.
- [12] D. Rosenthal, "The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 68, pp. 849–865, Nov. 1946.
- [13] E. Fridman, "Thermomechanical Analysis of the Laser Welding Process Using the Finite Element Method,"
- [14] M. R. Frewin and D. A. Scott, "Finite Element Model of Pulsed Laser Welding,"
- [15] Hook and Gick, "Analytical study indicates that present laser beam welding capabilities may be extended tenfold,"
- [16] J. Goldak, A. Chakravarti, and M. Bibby, "A new finite element model for welding heat sources," *Metallurgical Transactions B*, vol. 15, pp. 299–305, June 1984.
- [17] A. Mackwood and R. Crafer, "Thermal modelling of laser welding and related processes : a literature review," *Optics & Laser Technology*, vol. 37, pp. 99–115, Mar. 2005.
- [18] J. Rahman Chukkan, M. Vasudevan, S. Muthukumaran, R. Ravi Kumar, and N. Chandrasekhar, "Simulation of laser butt welding of AISI 316L stainless steel sheet using various heat sources and experimental validation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 219, pp. 48–59, May 2015.
- [19] J. Wang, J. Han, J. P. Domblesky, Z. Yang, Y. Zhao, and Q. Zhang, "Development of a new combined heat source model for welding based on a polynomial curve fit of the experimental fusion line," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, pp. 1985–1997, Nov. 2016.
- [20] K. Kim, J. Lee, and H. Cho, "Analysis of pulsed Nd :YAG laser welding of AISI 304 steel," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24, pp. 2253–2259, Nov. 2010.
- [21] N. Shanmugam, G. Buvanashakaran, K. Sankaranarayananasamy, and S. Ramesh Kumar, "A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of T-joint laser welds," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 4528–4542, Oct. 2010.
- [22] Z. Saternus, W. Piekarska, M. Kubiak, and T. Domański, "The Influence of Welding Heat Source Inclination on the Melted Zone Shape, Deformations and Stress State of Laser Welded T-Joints," *Materials*, vol. 14, p. 5303, Sept. 2021.
- [23] V. V. Semak, B. Damkroger, and S. Kempka, "Temporal evolution of the temperature field in the beam interaction zone during laser material processing," *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 32, pp. 1819–1825, Aug. 1999.
- [24] S. Bannour, K. Abderrazak, H. Mhiri, and G. Le Palec, "Effects of temperature-dependent material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy," *Optics & Laser Technology*, vol. 44, pp. 2459–2468, Nov. 2012.
- [25] Kim, C S, *Thermophysical properties of stainless steels*. 1975.

- [26] R. Hultgren, R. Orr, P. Anderson, and K. Kelley, *Selected Values of Thermodynamic Properties of Metals and Alloys*. Wiley series on the science and technology of materials, Wiley, 1963.
- [27] S. Gnanasekaran, S. Senthil Kumar, N. Venugopal, M. Upadhyaya, T. Manjunath, S. J. S. Chelladurai, and G. Padmanaban, "Effect of laser power on microstructure and tensile properties of pulsed Nd :YAG laser beam welded AISI 301 austenitic stainless steel joints," *Materials Today : Proceedings*, vol. 37, pp. 934–939, 2021.
- [28] M. Dal and R. Fabbro, "An overview of the state of art in laser welding simulation," *Optics & Laser Technology*, vol. 78, pp. 2–14, Apr. 2016.

Conclusion générale

Le projet porté sur le soudage laser en position angulaire de l'acier inoxydable austénitique AISI 301LN. L'objectif principal est de déterminer les meilleurs paramètres opératoires du laser afin d'obtenir une soudure ayant les meilleures propriétés mécanique et morphologique possibles. Pour cela une démarche en trois étapes a été adoptée.

Le premier objectif portait sur la détermination de l'influence des paramètres opératoires sur la morphologie du cordon de soudure ainsi que sa dureté. Pour y répondre des soudures ont été effectuées avec un laser Nd YAG d'une puissance maximum de 3000W. C'est un laser fibre ayant un diamètre de $200\mu\text{m}$. Le plan d'expérience a été conçu suivant la méthode de Taguchi. La puissance, la vitesse, le diamètre focal et l'amplitude des oscillations du faisceau sont les paramètres opératoires qui ont été étudiés. Tout d'abord les échantillons ont subi une attaque chimique permettant de révéler la microstructure du cordon de la soudure et de la ZAT. Dans le cordon de soudure la structure cristalline δ -ferrite a été retrouvée ce qui suggère une transformation allotropique de la ferrite en austénite suivant le mode de solidification FA. Également les structures de δ -ferrite semble suivre les lignes de fusion et rétrécies plus elle se rapproche du bord du cordon de soudure, jusqu'à disparaître dans la ZAT. Également les micrographies ont aussi permis de mesurer précisément la pénétration, la largeur et la surface du cordon de soudure. L'analyse ANOVA a permis de montrer que l'amplitude des oscillations du laser a une faible influence sur la pénétration et que le diamètre focal est inversement proportionnelle à celle-ci. Également il semblerait que la puissance et la vitesse du laser interagissent entre eux. Finalement afin de maximiser la pénétration l'étude statistique a montré qu'il faut paramétrer le diamètre focal sur 0.25 mm, prendre une vitesse de 3.5 m/min et une puissance de 2.8 kW. De la même manière, l'analyse ANOVA a démontré que seulement le diamètre focal et l'amplitude avaient un rôle à jouer sur la largeur de la soudure. Également comme il fut possible d'exprimer la largeur comme une fonction de deux variables, A et D, il était facile de représenter celle-ci dans un graphique. Celui-ci montre que pour obtenir une grande valeur de l'épaisseur il fallait prendre des valeurs extrêmes pour A et D. Et pour minimiser la largeur il fallait prendre le point d'inflexion de la courbe $W(A)$ et $W(D)$ qui sont respectivement 1.50mm et 0.28 mm. Pour la surface la soudure a été séparée en trois parties, celle sur la plaque supérieure, celle sur la plaque inférieure et celle sur celui provoqué par l'écoulement du métal solide. Une analyse statistique ANOVA a été effectuée sur la surface totale cependant la valeur de

p était supérieur à 0.05 ce qui rend le modèle non valide, néanmoins comme cette valeur est proche de 0.05, il sera considéré comme valide mais une étude ultérieure permettrait de confirmer les conclusions de celle-ci. La puissance et l'amplitude et le diamètre focal sont les paramètres ayant la plus grande influence sur la surface. La dureté des échantillons a été cartographiée ce qui a permis la mesure de l'épaisseur de la ZAT et de la dureté dans le cordon de soudure. L'analyse ANOVA a montré que le diamètre focal, la puissance ainsi que l'amplitude sont les paramètres opératoires ayant la plus grande influence sur l'épaisseur de la ZAT. Afin de minimiser celle-ci il faut prendre une valeur de puissance entre 2.65 kW et 2.73 kW, une valeur d'amplitude de 1.3mm ainsi qu'un diamètre focal de 0.25mm ou de 0.35mm. Et finalement pour la dureté du cordon de soudure. L'analyse ANOVA a montré que les paramètres les plus influant sur cette propriété sont le diamètre focal et l'amplitude. Et afin de maximiser celle-ci il faut prendre une vitesse entre 3.0 m/min et 3.50 m/min, un diamètre focale de 0.34 mm et 0.35 mm et une amplitude entre 1.3mm et 1.5 mm.

Le second objectif voulait quantifier l'influence de la puissance et de la vitesse sur le comportement mécanique du cordon de soudure a été faite. Chaque échantillon on subit un essai en traction et le courbe $\sigma(\epsilon)$ obtenu a permis de trouver les caractéristiques mécaniques de la soudure comme la pente à l'origine, la limite élastique, l'élongation avant rupture et la résistance maximum et l'énergie d'absorption. Une analyse ANOVA a permis de connaître l'influence des paramètres opératoires. Pour l'ensemble des propriétés analysées, l'augmentation de la puissance fait diminuer cesdites propriétés. Afin d'améliorer la qualité des soudures la puissance doit être proche de 2.6kW et la vitesse entre 3.0 m/min et 3.7m/min. Le modèle de Ramberg-Osgood a permis de modéliser le comportement mécanique des assemblages soudé avec une précision de 99,7%. À partir de ce modèle l'énergie d'absorption théorique a été calculée, sa valeur est en moyenne inférieure à celle de l'expérimentation d'environ 10%. Cet écart s'explique par la limite de définition du modèle.

Finalement le troisième objectif espérait utiliser une approche numérique afin d'approfondir les connaissances sur le comportement thermique du cordon de soudure. Pour cela un modèle par éléments finis en 2D a été proposé afin de simuler le champ de température et de prédire la morphologie du cordon de soudure. Cependant la mise en position utilisée durant cette simulation apporte une certaine difficulté comme l'apparition d'une singularité au centre de la jointure entre les deux plaques, qu'il est possible de résoudre en affinant le maillage ce qui augmente grandement le temps de calcul. Néanmoins, le modèle a permis de trouver une morphologie du cordon de soudure similaire à celle obtenue par expérimentation. Cependant le modèle n'est pas suffisamment robuste pour prédire avec précision la morphologie du cordon de soudure. En effet pour la pénétration, elle semble être surestimée par le modèle, cela est provoqué par un manque de complexité du modèle, en effet seulement l'équation de chaleur est résolue, cependant le soudage laser est bien trop compliqué pour résumé à cette simple équation. Également le modèle donne une trop grande importance à l'amplitude contrairement à l'expérimentation. Ainsi le modèle utilisé ne réagit pas de la même façon à la modification des paramètres opératoires que l'expérimentation. La surface est surestimée en moyenne de 39%, néanmoins les deux paramètres influents sont les mêmes pour l'expérimentation et la simulation ; le diamètre focal et l'amplitude.

Cependant leur influence est plus polarisée dans le cas de la simulation. Également durant l'analyse des résultats, les estimateurs statistiques ne sont pas suffisants et élevés afin de conclure que le modèle est capable de prédire les propriétés géométriques avec précision. Principalement dû à la géométrie utilisée impose une grande influence sur l'écoulement de la phase liquide se trouvant sur la plaque supérieure. Finalement le modèle présenté permet d'approximer le comportement thermodynamique de la soudure de 301LN dans une mise en position d'angle et permet de mieux comprendre la diffusion de chaleur dans celle-ci. Néanmoins afin d'augmenter en précision il serait nécessaire d'implémenter l'écoulement de la phase liquide.

Ces résultats ouvrent la voie pour de future recherche afin d'approfondir les connaissances sur le soudage laser en angle de l'acier 301LN. Au vu de la mise en position utilisée il serait intéressant de quantifier l'influence de la position initiale sur la morphologie de la soudure mais aussi ses propriétés mécaniques. En effet celle-ci peut avoir une grande influence sur la qualité de la soudure. Il reste également à déterminer l'influence de l'amplitude de l'oscillation et le diamètre focal sur les propriétés mécaniques. Comme la forme des oscillations et la fréquence ont été fixées, il serait intéressant de quantifier l'influence de ces paramètres sur la qualité de la soudure. Comme le modèle simulé n'est pas robuste, il est possible de l'améliorer. Pour cela une comparaison des différentes modélisations des sources de chaleur, pourrait être intéressante afin de sélectionner le meilleur modèle. Une façon de rendre le modèle plus robuste serait de modéliser les autres phénomènes physiques présents durant la soudure. Finalement une modélisation 3D du phénomène pourrait être effectuée.

Annexe

Dans cette section se trouve le matériel d'étude utilisé c'est à dire les cartographie et les courbes de moyenne de la dureté

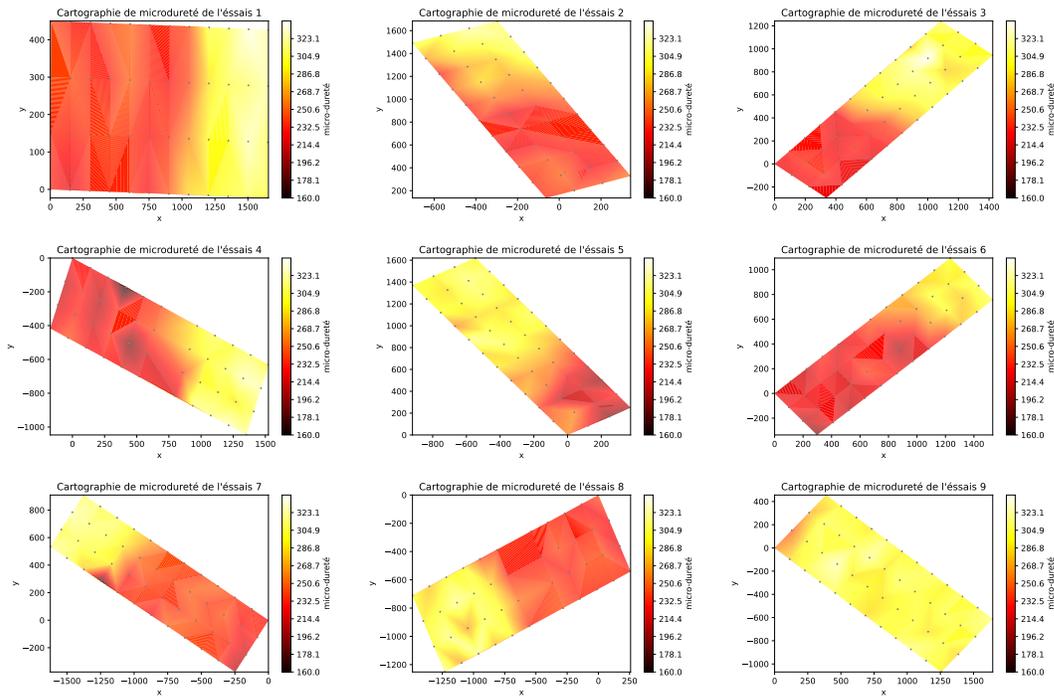


Figure 3.21 – Cartographie de la dureté pour chaque essais

Conclusion générale

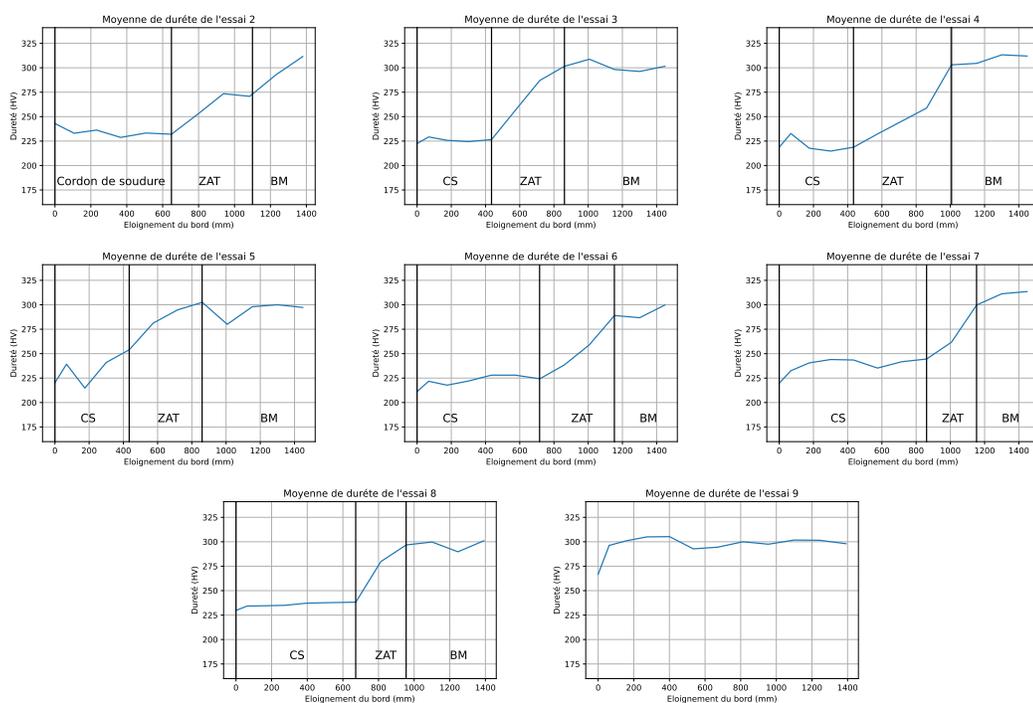


Figure 3.22 – Cartographie de la dureté pour chaque essais