



**MODÉLISATION PRÉDICTIVE PAR RÉSEAUX DE  
NEURONES DE LA FORME ET DES DIMENSIONS DES  
JOINTS DE SOUDURE PAR LASER BASÉE SUR  
L'EXPÉRIMENTATION ET SUR LA SIMULATION 3D**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© LAURENT JACQUES

Novembre 2017

**Composition du jury :**

**Adrian Ilinca, président du jury, Université du Québec À Rimouski**

**Abderrazak El Ouafi, directeur de recherche, Université du Québec À Rimouski**

**Mohamed Bouazara, examinateur externe, Université du Québec À Chicoutimi**

**Ahmed Chebak, professeur, Université du Québec À Rimouski**

Dépôt initial le 5 Septembre 2017

Dépôt final le 20 novembre 2017



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À 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 l'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.



À mes parents



## **REMERCIEMENTS**

Je voudrais remercier le professeur Abderrazak El Ouafi de l'UQAR d'avoir dirigé mon mémoire, pour son support, ses bons conseils et ses suggestions judicieuses pour orienter le développement du projet ainsi que pour le temps investi dans la correction de mes travaux.

Je tiens à remercier toute ma famille pour leur soutien, leur gentillesse, et leur patience qui m'ont permis de mener à bien ce projet dans la sérénité.





## RÉSUMÉ

La soudure au laser devient une des techniques d'assemblage les plus efficaces dans l'industrie en raison de sa productivité élevée et de sa flexibilité. Des soudures étroites, profondes et précises à une cadence élevée, une zone affectée thermiquement très restreinte et des distorsions thermiques relativement faibles dues à la concentration de la puissance dans une très petite zone sont les principaux avantages du soudage au laser par rapport aux procédés de soudage conventionnels. Les caractéristiques mécaniques d'une soudure obtenue par laser dépendent principalement des dimensions du cordon de soudure qui dépendent elles-mêmes des paramètres du procédé. Pour exploiter de manière appropriée les avantages offerts par le procédé, il est nécessaire de contrôler ces paramètres afin de produire des cordons de soudure avec les dimensions et les caractéristiques désirées. L'objectif du projet consiste à analyser les relations de dépendance entre la forme et les dimensions du cordon de soudure et les paramètres du procédé dans le but d'établir des modèles permettant la prédiction des caractéristiques de la soudure dans le cas de soudage bout à bout d'acier galvanisé sans avoir recours au long et coûteux processus essai-erreur. Pour obtenir des modèles prédictifs précis et robustes, une approche structurée en trois étapes a été adoptée. La première étape consiste à conduire une investigation expérimentale pour évaluer les effets thermiques et métallurgiques induites par les paramètres du procédé sur la qualité de la soudure. Les expériences sont basées sur une planification utilisant la méthode de Taguchi et réalisées à l'aide d'une source laser Nd: YAG de 3 kW en considérant tous les facteurs connus pour avoir le plus d'influence sur la qualité des soudures (puissance du laser, vitesse de soudure, diamètre de la fibre laser, épaisseurs des tôles et écart entre les tôles) afin d'estimer les variations de quatre attributs de la qualité de la soudure (largeur du cordon, profondeur de pénétration, sous-remplissage et dureté). Les effets des facteurs considérés et leurs contributions à la variation des différentes caractéristiques de la soudure sont analysés à l'aide d'ANOVA. La deuxième étape consiste à développer et à valider expérimentalement un modèle numérique 3D afin de simuler le comportement du procédé sous des conditions difficiles à réaliser expérimentalement. L'approche de modélisation adoptée est basée sur des transformations métallurgiques utilisant les relations de dépendance entre température et propriétés des matériaux et la méthode de l'enthalpie. Les soudages en mode conduction et en mode trou de serrure ont été investigués en utilisant des sources surfacique et volumétrique respectivement. Les résultats des simulations, validés à l'aide de données expérimentales produites dans la phase précédente, ont révélé que le modèle 3D permet de fournir non seulement une prédiction cohérente et précise des caractéristiques des soudures dans des conditions de soudage variées, mais permet également une analyse qualitative et quantitative du comportement du procédé. Cette analyse a permis d'identifier les variables les plus pertinentes à utiliser dans une modélisation prédictive. Finalement, la troisième étape consiste à exploiter les

avantages qu'offrent les réseaux de neurones pour développer des modèles de prédictifs précis et robustes. La procédure de développement des modèles est basée sur des données structurées provenant à la fois des expérimentations et des simulations. Les relations entre les paramètres du procédé et les caractéristiques de la soudure ont été analysées et leur sensibilité aux conditions de soudage évaluées à l'aide d'outils statistiques pertinents. Sur la base de ces résultats, plusieurs options de modèle de prédiction ont été établies et évaluées à l'aide de critères précis. Les résultats montrent que les modèles développés présentent d'excellentes performances prédisant les dimensions de la soudure avec une erreur moyenne inférieures à 10% et que l'approche de modélisation par réseaux de neurones peut conduire à des modèles prédictifs consistants capables de fournir des prédictions précises et fiables des caractéristiques de la soudure dans une large gamme de conditions.

Mots clés : Soudage laser, joint bout à bout, acier galvanisé, méthode des éléments finis, simulation 3D, réseaux de neurones, design d'expérience, ANOVA.



## ABSTRACT

Laser welding becomes one of the most effective joining method in the modern industrial production because of its flexibility and high productivity. The very limited heat-affected zone and low thermal distortion due to the highly concentrated heat source are its major advantages compared to the conventional welding processes. In laser welding, the material physicochemical properties and the welding process parameters have significant effects on the weld joint quality attributes. To appropriately exploit the benefits offered by laser welding, it is necessary to develop a comprehensive strategy to control the variables of the process in order to produce desired weld joint characteristics without being forced to use the traditional and fastidious trial and error procedures. This study focuses on the development of an efficient and robust model for predicting the weld bead geometry and shape in laser welding of galvanized steel in butt joint configurations. Experimental and modelling investigations on thermal and metallurgical effects induced by parts specifications and laser welding system parameters on the weld quality is conducted to develop an integrated approach for predictive modelling. To reach accurate and robust weld bead geometry and shape predictive models, a three-step approach is adopted. The first step consists to conduct an experimental investigation focusing on the effects of various laser welding parameters on weld quality. These investigations are based on a structured experimental design using the Taguchi method and conducted using a 3 kW Nd:YAG laser source using factors known to have the most influence on weld quality (laser power, welding speed, laser fiber diameter, gap between sheets and sheet thickness) in order to estimate the variation of four weld quality attributes (bead width, penetration depth, underfill and hardness). The effects of the considered experimental factors and their contributions to the variation of different weld characteristics are studied using ANOVA. The second step consists to develop and validate experimentally a numerical 3D model for simulating the process behaviour under welding conditions difficult to realize experimentally. The adopted modelling approach is based on metallurgical transformations using temperature dependent material properties and the enthalpy method. Conduction and keyhole modes welding are investigated using surface and volumetric heat sources, respectively. Transition between the heat sources is carried out according to the power density and interaction time. Simulations are achieved using 3D finite element model implemented on commercial software. The simulation results, validated using experimental data produced in the previous phase, reveals that the 3D model can provide not only a consistent and accurate prediction of the weld characteristics under variable welding parameters and conditions but also a comprehensive and quantitative analysis of process. This analysis allowed the identification of the most relevant variables to use in the predictive modelling procedure. Then, the third step consists of developing an artificial neural network based prediction models. The models building procedure is based on experimental and simulation fused data. The relationships between

welding parameters and geometric characteristics of the welds specifically depth of penetration and bead width are analysed and their sensitivity to the welding conditions evaluated using relevant statistical tools. Based on these results, various options for the prediction model are established and evaluated using improved criteria. The achieved results demonstrate that the resulting models present excellent performances and can effectively predict the weld shape and dimensions in laser welding with an average predicting errors less than 10%. These results demonstrate that the proposed ANN based prediction approach can effectively lead to consistent models able to accurately and reliably provide an appropriate prediction of weld bead geometry and shape under variable welding parameters and conditions.

*Keywords:* Laser welding, butt joint, galvanised steel, finite element model, 3D simulation, artificial neural network, design of experiment, ANOVA.



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	viii
RÉSUMÉ.....	x
ABSTRACT .....	xiii
TABLE DES MATIÈRES .....	xvi
LISTE DES TABLEAUX.....	xix
LISTE DES FIGURES.....	xxi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
0.1 LE SOUDAGE LASER.....	2
0.1.1 FONCTIONNEMENT D’UN LASER.....	2
0.1.2 MÉCANISME DU SOUDAGE LASER.....	3
0.1.3 PARAMÈTRE DU SOUDAGE LASER .....	6
0.2 LE SOUDAGE DANS L’INDUSTRIE AUTOMOBILE.....	10
0.2.1 SOUDAGE DES TÔLES .....	10
0.2.2 LES PROCÉDÉS DE SOUDAGE .....	12
0.2.3 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU SOUDAGE LASER PAR RAPPORT AUX AUTRES PROCÉDÉS DE SOUDAGE.....	14
0.3 PROBLÉMATIQUES RELATIVES AU SOUDAGE DE L’ACIER GALVANISÉ .....	15
0.3.1 SOUDURES BOUT À BOUT POUR L’ACIER GALVANISÉ .....	15
0.3.2 EFFETS DE L’ÉCARTEMENT SUR LA QUALITÉ DE LA SOUDURE .....	17
0.3.3 MODÉLISATION DU SOUDAGE LASER .....	19
0.3.4 PROBLÉMATIQUE SPÉCIFIQUE.....	23
0.4 OBJECTIFS.....	24



0.5	MÉTHODOLOGIE.....	25
0.6	ORGANISATION DU MÉMOIRE .....	27
CHAPITRE 1 ETUDE EXPERIMENTALE DES EFFETS DES PARAMETRES DE		
SOUDAGE SUR LA QUALITE DES SOUDURES DANS LE CAS DU SOUDAGE		
LASER EN CONFIGURATION BOUT A BOUT .....		
		29
1.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE .....	29
1.2	EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LASER WELDING IN BUTT-	
	JOINT CONFIGURATIONS.....	31
1.2.1	ABSTRACT.....	31
1.2.2	INTRODUCTION .....	31
1.2.3	MATERIALS AND EXPERIMENTAL PROCEDURE.....	33
1.2.4	RESULTS AND DISCUSSION .....	37
1.2.5	CONCLUSION .....	46
CHAPITRE 2 PREDICTION DE LA FORME ET DES DIMENSIONS DU		
CORDON DE SOUDURE DANS LE SOUDAGE LASER – MODELISATION 3D		
ET VALIDATION EXPERIMENTALE.....		
		47
2.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE.....	47
2.2	PREDICTION OF WELD JOINT SHAPE AND DIMENSIONS IN LASER	
	WELDING USING A 3D MODELING AND EXPERIMENTAL	
	VALIDATION.....	49
2.2.1	ABSTRACT.....	49
2.2.2	INTRODUCTION .....	49
2.2.3	HEAT TRANSFER FORMULATION .....	52
2.2.4	MODEL DESCRIPTION .....	55
2.2.5	FINITE ELEMENT MODEL .....	58
2.2.6	RESULTS AND DISCUSSION .....	62
2.2.7	CONCLUSION .....	69

CHAPITRE 3 RESEAUX DE NEURONES POUR UNE MODELISATION DE LA FORME ET DES DIMENSIONS DU CORDON DE SOUDURE DANS LE SOUDAGE LASER DE L'ACIER GALVANISE EN CONFIGURATION BOUT A BOUT .....	70
3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE.....	70
3.2 ANN BASED PREDICTIVE MODELLING OF WELD SHAPE AND DIMENSIONS IN LASER WELDING OF GALVANIZED STEEL IN BUTT JOINT CONFIGURATIONS .....	72
3.2.1 ABSTRACT .....	72
3.2.2 INTRODUCTION .....	72
3.2.3 PROPOSED MODELLING STRATEGY .....	75
3.2.4 APPLICATION OF THE PROPOSED STRATEGY.....	81
3.4.5 CONCLUSION .....	92
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	93
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	97

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 0.1 : Utilisation de différents procédés de soudage pour l'assemblage de la carrosserie de 5 véhicules [10].....	13
Tableau 0.2 : Comparaison des différents procédés de soudage .....	15
Table 1.1 : Chemical composition of the metal .....	34
Table 1.2 : Factors and levels for experimentations .....	36
Table 1.3 : Results of repeatability test (a) no gap and (b) with gap .....	38
Table 1.4 : ANOVA table for BDW .....	40
Table 1.5 : ANOVA table for DOP .....	40
Table 2.1 Specifications of the used material .....	61
Table 2.2 Welding process parameters .....	61
Table 2.3 Dimensions of the used parts .....	61
Table 2.4 Comparaison of measured and predicted DOP and BDW (no gap tests) .....	64
Table 2.5 Comparaison of measured and predicted DOP and BDW (gap tests) .....	65
Table 3.1 Factors and levels for training and validation data .....	80
Table 3.2 Design of experiments .....	82
Table 3.3 Typical training and testing data randomised sets for prediction model building .....	83
Table 3.4 Typical modelling performances using MSE values .....	83

Table 3.5 % contributions of modelling variables in the performance of the designed models for DOP.....	85
Table 3.6 % contributions of modelling variables in the performance of the designed models for BDW .....	86
Table 3.7 Variables selection for predictive modelling of DOP and BDW .....	87
Table 3.8 Correlation between predicted and measured WSD attributes using various data sets .....	89

## LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 : Représentation schématique du soudage laser en trou de serrure [1] .....	4
Figure 0.2 : Représentation des deux modes de soudage laser [2] .....	5
Figure 0.3 : Effet de la position du point focal sur la forme de la soudure [4] .....	8
Figure 0.4 : Types de configurations de soudures utilisées dans le soudage laser .....	9
Figure 0.5 : Nuances d'acier pour l'industrie automobile [10] .....	11
Figure 0.6 : Résistance des aciers utilisés dans la carrosserie [10] .....	12
Figure 0.7 : Défauts de positionnement pour le soudage bout à bout .....	17
Figure 1.1 : Experimental set-up showing (a) laser and (b) clamping system .....	35
Figure 1.2 : Sheared edge specimens (a) front view, (b) side view .....	39
Figure 1.3 : Micro hardness profile of the welded joint .....	39
Figure 1.4 : Main effect plot for BDW and DOP .....	41
Figure 1.5 : Interaction plot between thickness and gap for BDW .....	42
Figure 1.6 : Interaction plot between speed and thickness for DOP .....	42
Figure 1.7 : Shape of the weld (a) round shape, (b) wide V shape, (c) sharp V shape, (d) parallel edge .....	43
Figure 1.8 : Weld shape according to the DOP and the gap .....	44
Figure 1.9 : Underfill according to the DOP and the gap .....	45
Figure 1.10 : Underfill according to the BDW, the gap and the thickness .....	45
Figure 2.1 Heat transfer condition .....	54

Figure 2.2 Typical 3D conical Gaussian distribution [19] .....	54
Figure 2.3 Welding mode according to power density and interaction time .....	57
Figure 2.4 Schematic model for laser welding.....	59
Figure 2.5 Finite element mesh of the weld specimen.....	59
Figure 2.6 Thermo-physical properties of material - Temperature effects on: (a) Specific heat, (b) Density and (c) Thermal conductivity .....	62
Figure 2.7 Predicted versus measured DOP and DOP (no gap tests) .....	63
Figure 2.8 Predicted versus measured DOP and DOP (gap tests) .....	66
Figure 2.9 Predicted versus measured DOP and DOP (conduction mode).....	67
Figure 2.10 Predicted versus measured DOP and DOP (full penetration).....	68
Figure 2.11 Shape of the bead profile from experimentation and simulation (a) Exp n°3, (b) Exp n°33, (c) Exp n°16 .....	68
Figure 2.12 Shape of the bead profile from experimentation and simulation Exp n°38 with (a) bottom edge lined up, (b) top edge lined up .....	68
Figure 3.1 Simple computational elements of the multiplayer feed-forward neural network.....	79
Figure 3.3 Effects of welding parameters on MSE variations in modelling DOP for training and validation data .....	85
Figure 3.4 Effects of welding parameters on MSE variations in modelling BDW for training and validation data .....	87
Figure 3.5 Interaction plot of the $MSE_v$ for BDW between gap, power and diameter .....	88
Figure 3.6 Comparison of predicted and measured depth of penetration for the 3 selected models .....	90
Figure 3.7 Comparison of predicted and measured bead width for the 3 selected models .....	91







## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le soudage laser est une technique de soudage qui permet d'assembler plusieurs pièces mécaniques à l'aide d'un faisceau laser générant une source de chaleur extrêmement concentrée. Le soudage laser permet des soudages étroits, profonds et précis à une cadence et une finesse que les procédés de soudage traditionnels sont incapables d'atteindre. Cette technique est souvent utilisée dans des secteurs industriels avec de gros volumes de production comme dans l'industrie automobile. Un des avantages majeurs du soudage laser, par rapport aux autres procédés, réside dans la concentration de la puissance dans une très petite zone, permettant ainsi des soudures plus rapides et des zones affectées thermiquement plus restreintes. Les caractéristiques mécaniques d'une soudure obtenue par laser dépendent principalement des propriétés physicochimiques des matériaux à souder et des dimensions du cordon de soudure. Ces dimensions dépendent elles-mêmes des différents paramètres du procédé tels que la puissance, la vitesse, le diamètre du faisceau, etc. L'exploitation adéquate des possibilités qu'offre ce procédé nécessite donc le développement de stratégies permettant de contrôler ces paramètres de manière à produire les dimensions et les caractéristiques désirées sans recourir au traditionnel, long et coûteux processus essais-erreurs. L'objectif du projet consiste à analyser, pour des pièces mécaniques en acier galvanisé, les relations de dépendance entre les dimensions de la soudure et les paramètres du procédé dans le but d'établir des modèles simples permettant la prédiction des caractéristiques de la soudure. Les sections qui vont suivre donnent une perspective élargie de l'intérêt de ce projet et illustre sa pertinence pour l'industrie tout en soulignant ses contributions possibles et ses résultats potentiels. Cela commence par la présentation des principes du procédé de soudage laser et des mécanismes intervenant dans son fonctionnement ainsi que l'identification des paramètres qui le contrôlent et qui peuvent avoir le plus d'influence sur la qualité de la soudure.

## **0.1 LE SOUDAGE LASER**

### **0.1.1 Fonctionnement d'un laser**

Le laser (acronyme de l'anglais « **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation ») se présente généralement sous la forme d'un dispositif qui émet un rayonnement cohérent sur le plan spatial et temporel grâce à l'amplification d'un faisceau lumineux dans un résonateur. Le principe du laser repose sur trois phénomènes physiques décrivant l'interaction entre l'atome et la lumière. Le premier processus est celui de l'absorption durant lequel un atome dans son état « fondamental » passe dans un état d'énergie dit « excité » en absorbant un photon. Le photon doit posséder une longueur d'onde bien définie, dépendante de la nature de l'atome qui l'absorbe. Le deuxième processus est celui de l'émission spontanée, lors de celle-ci un atome initialement dans son état « excité » revient à son état initial en émettant spontanément un photon de même longueur d'onde que celui qu'il avait absorbé. Ce photon est émis dans une direction et avec une phase aléatoire. Le troisième et dernier processus est celui de l'émission stimulée. Durant ce processus, un atome excité qui reçoit un photon, qui aurait permis de l'exciter s'il était dans son état fondamental, peut se désexciter en émettant un photon dans la même direction et avec la même phase que le photon incident. Ce photon émis va alors s'ajouter au rayonnement et l'amplifier. Si l'émission stimulée a pour effet d'amplifier la lumière, dans le même temps l'absorption a pour effet de l'atténuer. Pour que l'émission stimulée l'emporte sur l'absorption, il est nécessaire que le nombre d'atomes excités soit plus important que le nombre d'atomes dans un état fondamental. On appelle ce phénomène l'inversion de la population. L'état fondamental étant un état d'équilibre qui tend à être rejoint via l'émission spontanée, pour obtenir une inversion de la population il faut donc fournir de l'énergie aux atomes pour les passer dans un état excité ; c'est ce qu'on appelle le pompage. A partir de ces connaissances, les éléments nécessaires pour obtenir un laser sont donc : un milieu amplificateur, constitué d'atomes permettant l'émission de lumière par émission stimulée, une source d'énergie assurant le pompage du milieu amplificateur, et une cavité optique qui renvoie la lumière dans le milieu

amplificateur et permet la sortie uniquement d'un faisceau cohérent spatialement et temporellement. Les différents types de laser sont définis par leur milieu amplificateur. Ainsi, il existe le laser à hélium néon, à argon, au krypton, au CO<sub>2</sub>... Ce sont les atomes, constituant ce milieu amplificateur, qui définissent la longueur d'onde du faisceau émis pour chaque laser. La puissance d'un laser dépend de l'ensemble des éléments qui le constituent, mais c'est le choix du milieu amplificateur qui limite les possibilités physiques atteignables par le dispositif. Actuellement, les lasers permettant d'atteindre les plus hautes puissances sont ceux à fibres ou CO<sub>2</sub> avec plusieurs dizaines de kW.

### **0.1.2 Mécanisme du soudage laser**

Lorsqu'un faisceau laser arrive sur une surface, une suite de phénomènes prend place. Une partie considérable du faisceau est initialement réfléchi par la surface et l'autre partie est absorbée par la pièce sous forme d'énergie. Pour éviter que la partie réfléchi soit renvoyée vers la tête du laser et l'endommager, les tirs de laser s'effectuent toujours avec un angle de quelques degrés. La quantité d'énergie absorbée par la pièce dépend de la longueur d'onde du faisceau, de la réflectivité de la surface et du coefficient d'absorption du matériau. L'énergie absorbée chauffe alors la pièce et augmente sa température. Cette chaleur va ensuite se diffuser dans la pièce par conduction. Quand la température de fusion est atteinte, la pièce se met à fondre et créer un bain de fusion. Les mouvements du fluide à l'intérieur du bain de fusion servent également au transfert de la chaleur dans la pièce principalement avec l'effet de Marangoni.

Si l'énergie apportée est suffisante, le métal fondu peut atteindre la température d'évaporation. La vaporisation, lorsqu'elle a lieu, se trouve là où la concentration d'énergie est la plus grande, c'est-à-dire à la zone de contact entre le faisceau laser et la pièce. Dans certaines conditions (équilibre des pressions, stabilité, etc.), la vaporisation peut prendre, à l'intérieur de la pièce, la forme d'un capillaire rempli de vapeur comme représenté dans la **Figure 0.1**. On parle alors de soudage en trou de serrure.

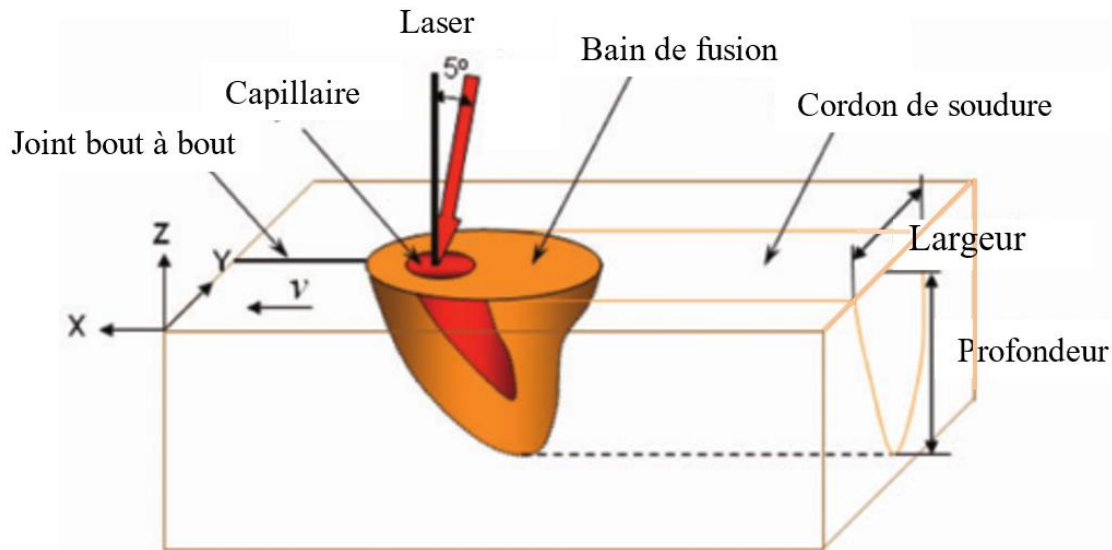


Figure 0.1 : Représentation schématique du soudage laser en trou de serrure [1]

Les parois du capillaire sont alors constituées du métal liquide du bain de fusion. La présence du capillaire permet au faisceau laser d'atteindre directement l'intérieur de la pièce et ainsi de déposer son énergie dans l'épaisseur de la pièce. Le faisceau, en étant réfléchi à l'intérieur du capillaire, entre en contact de nombreuses fois avec les parois de celui-ci, et l'absorption de l'énergie du laser est donc améliorée. L'arrivée du faisceau à l'intérieur de la pièce et la réflexion du faisceau dans le capillaire sont deux phénomènes importants qui permettent d'expliquer la pénétration importante des soudures en trou de serrure. Les vapeurs métalliques ne se limitent pas à l'intérieur du capillaire et se retrouvent également au-dessus de la soudure créant parfois du plasma en interagissant avec l'air ambiant et le gaz de protection. Le panache de vapeur et de plasma, ainsi créé, pose un problème puisqu'il dévie, absorbe et bloque une partie du faisceau laser réduisant ainsi l'énergie reçue par la pièce. L'utilisation d'un jet d'air est donc nécessaire afin d'éviter ce problème. Le bain de fusion (avec le capillaire le cas échéant) est entretenu par le laser et se déplace, au rythme de celui-ci, entre les pièces à assembler. Après le passage du faisceau, le métal se refroidit et se solidifie rapidement en créant le cordon de soudure assurant la liaison entre les pièces.

Ainsi, deux modes de soudage laser peuvent être définis : le soudage par conduction et le soudage en trou de serrure (en anglais keyhole) dit à forte pénétration. Les deux modes de soudage sont représentés sur la **Figure 0.2**.

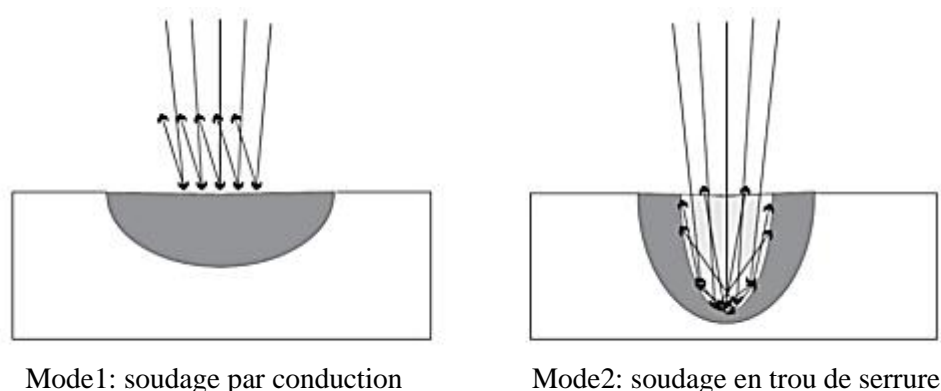


Figure 0.2 : Représentation des deux modes de soudage laser [2]

Les soudures par conduction sont obtenues sans formation d'un capillaire de vapeur et sont définies par une géométrie arrondie avec une largeur au moins deux fois plus grande que la profondeur. Les soudures en trou de serrure sont caractérisées par une géométrie étroite avec une grande profondeur et une faible largeur. Pour atteindre les soudures à forte pénétration, il est généralement admis qu'une densité de puissance d'environ  $10^6 \text{W/cm}^2$  doit être atteinte. En réalité, il existe une zone de transition entre les deux modes de soudage, qui est déterminée par une plage de densités de puissance et qui est dépendante de la vitesse et du diamètre du laser utilisé [3]. Cette zone de transition représente la zone où la pression, créée par l'évaporation du métal, est trop faible pour surpasser la pression de surface du bain de fusion et permettre la création et la stabilité du capillaire de vapeur.

Typiquement, une soudure une fois solidifiée est définie par trois zones : la zone fondue, la zone affectée thermiquement et le matériau de base. La zone fondue est la zone où la température a dépassé la température de fusion, le refroidissement définit la nouvelle microstructure du matériau dans cette zone. La zone affectée thermiquement représente la zone où des changements de microstructures ont eu lieu sans que le métal ne soit fondu. Cette

zone se situe autour de la zone fondue. Les changements de microstructures sont différents en fonction de la distance par rapport à la zone fondue car ils dépendent des températures atteintes et de la durée d'exposition à la chaleur. Pour l'acier, cette zone correspond généralement à une austénitisation, ce qui provoque une augmentation de la dureté. Le matériau de base représente toutes les parties de la pièce où le soudage n'a provoqué aucun changement.

### **0.1.3 Paramètre du soudage laser**

Dans cette section, les effets des principaux paramètres du procédé de soudage laser seront examinés brièvement. Les ouvrages de références [4-6] présentent beaucoup plus de détails sur ces paramètres et sur leurs effets sur la qualité de la soudure.

Les paramètres du soudage laser peuvent être classés en quatre catégories:

- Caractéristiques du faisceau laser: puissance, diamètre, longueur d'onde, mode (pulsé ou continu), ....
- Spécifications des pièces à souder : matériau, propriétés mécaniques, état de surface, dimensions, etc...
- Positionnement : configuration, vitesse, position du point focal, ....
- Conditions environnantes : gaz de protection, pression, ....

Un faisceau pulsé ou continu peut être utilisé pour le soudage, le premier étant plus adapté pour le soudage par point et le deuxième pour les soudures continues. L'utilisation d'un faisceau pulsé ajoute d'autres paramètres comme : la durée, la forme et la fréquence des pulses. Il est toutefois possible de faire des soudures continues avec un faisceau pulsé si les pulses sont choisies de manière à se chevaucher. Le faisceau pulsé permet des soudures plus profondes pour une même puissance moyenne qu'un faisceau continu, mais cette même puissance moyenne implique au départ une puissance des pulses deux fois plus élevée. Cela demande donc un laser avec une puissance maximale deux fois plus importante.

La vitesse et la puissance sont les deux paramètres les plus faciles à utiliser pour contrôler le procédé de soudage laser. La vitesse de soudage (vitesse de déplacement du rayon laser) a un effet important sur l'énergie reçue par la pièce. Plus la vitesse augmente, plus la pénétration et la largeur de la soudure diminuent. La puissance est contrôlable par ordinateur. Le réglage de cette puissance a un impact direct sur la densité de puissance reçue par la pièce et son augmentation améliore donc la pénétration des soudures. Pour une même épaisseur de pièce à souder, il existe généralement plusieurs combinaisons de puissance / vitesse permettant de réaliser la soudure. Mais on choisit souvent la plus grande vitesse possible, elle est déterminée par la puissance maximale disponible.

Le diamètre de la tache focale dépend du diamètre du faisceau. En fonction de l'installation du laser, celui-ci peut être réglable ou non. Une tache focale plus petite permet une plus grande densité de puissance sans augmenter la puissance du laser et ainsi améliorer la pénétration. Cependant, l'utilisation d'une tache focale très petite demande d'être capable de fournir une très bonne précision de positionnement du laser dans le reste du procédé. Cette exigence limite l'utilisation de taches focales trop petites. Outre la dimension de la tache focale, sa position par rapport à la surface de la pièce modifie l'apparence de la soudure comme le montre la **Figure 0.3**. La position optimale, celle qui permet le plus grand rapport pénétration/largeur, est généralement située quelques millimètres en dessous de la surface supérieure de la pièce. Afin de trouver cette position, l'essai le plus répandu est une soudure avec augmentation de la distance entre la pièce et la tête du laser au cours du trajet de la soudure. Ainsi, en observant ensuite la soudure, on détermine cette position optimale.

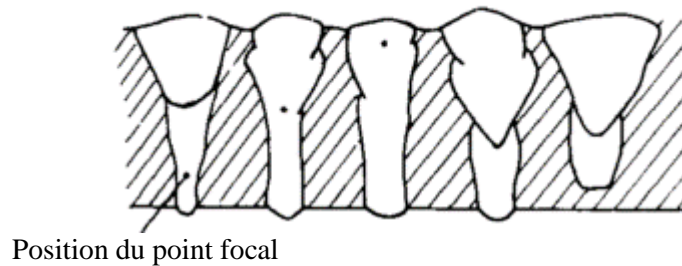


Figure 0.3 : Effet de la position du point focal sur la forme de la soudure [4]

L'efficacité du procédé de soudage laser dépend du pourcentage d'énergie absorbée par la pièce par rapport à l'énergie totale fournie. Trois paramètres interviennent dans cette efficacité. L'état de surface de la pièce, avec notamment sa réflectivité et sa rugosité, conditionne grandement la quantité d'énergie absorbée par la pièce. La réflectivité définit immédiatement le pourcentage du faisceau qui va être réfléchi. La rugosité a un effet plus difficile à déterminer avec un impact sur l'angle de réflexion du faisceau et donc de possible réabsorption de celui-ci. La longueur d'onde utilisée modifie aussi la capacité d'absorption de la puissance par la pièce. Les faisceaux à faible longueur d'onde peuvent être absorbés par un plus grand nombre d'électrons de la pièce, ce qui améliore l'absorptivité de la surface. Ils sont également moins sensibles au plasma qui se crée et peuvent absorber une partie de l'énergie lors du soudage laser. Cependant, c'est uniquement le choix du type de laser utilisé qui définit sa longueur d'onde.

Plusieurs configurations peuvent être retenues pour le soudage laser, mais à cause de la petite taille du faisceau, certaines sont plus utilisées. Les quatre grands types de configurations pour le soudage laser sont : bout à bout, recouvrement, en T et les soudures d'angle. Elles sont représentées dans la **Figure 0.4**.



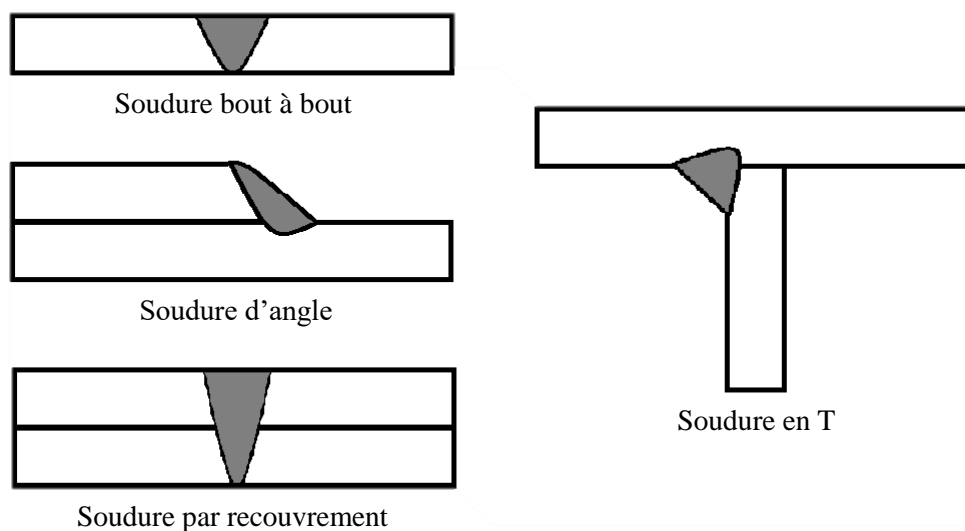


Figure 0.4 : Types de configurations de soudures utilisées dans le soudage laser

Les soudures en T sont utilisées pour joindre deux pièces perpendiculairement. Les trois autres méthodes servent à assembler les pièces parallèlement. Le soudage par recouvrement est choisi principalement quand l'épaisseur de la tôle supérieure est inférieure à 1mm, puisque la soudure doit pouvoir la traverser afin de créer une soudure liant les deux pièces. La soudure bout à bout permet un assemblage presque invisible, mais les difficultés viennent de la mise en contact des deux faces à souder. Le contact doit être le plus précis possible pour éviter un manque de matière. Les soudures d'angles sont un mélange entre les soudures par recouvrement et les soudures bout à bout, elles sont faites à l'extrémité de la pièce supérieure mais à la surface de la deuxième pièce. Cette technique permet de résoudre les problèmes de positionnement et de réduire les problèmes de qualité des soudures par recouvrement.

## 0.2 LE SOUDAGE DANS L'INDUSTRIE AUTOMOBILE

### 0.2.1 Soudage des tôles

Les gros volumes de production dans l'industrie automobile sont des milieux très compétitifs qui visent la rentabilité et la productivité. Le soudage est une technologie importante dans la réalisation du châssis, de la carrosserie et des pièces mécaniques d'une voiture. L'objectif actuellement au cœur de la recherche dans le milieu automobile est la réduction de la consommation d'essence. Pour y arriver, le moyen le plus efficace pour gagner en économie d'essence sans perdre en performance est de réduire le poids du véhicule. Pour ce faire, le choix des matériaux, des épaisseurs et des formes est étudié. La dernière tendance dans cette optique d'optimisation du poids est le « flanc sur mesures ». Ce sont des pièces de carrosserie qui requièrent le soudage de différentes épaisseurs et de différents types ou nuances de matériaux entre eux, avant le procédé de mise en forme, afin d'obtenir les propriétés voulues à l'endroit voulu [7]. Les soudures de « flancs sur mesures » se font toujours en configuration en bout à bout afin de permettre l'utilisation de procédés de mise en forme comme l'emboutissage [8]. Une des grandes dynamiques du marché est également l'utilisation de nouveaux matériaux, même si les aciers sont encore les plus utilisés dans l'industrie automobile grâce à leurs bonnes performances mécaniques et à leur faible coût. Des alliages à base de magnésium ou d'aluminium sont de plus en plus choisis pour leur faible poids. On préfère les alliages de titane pour leurs grandes performances mécaniques et leur faible poids mais leur prix est élevé [9]. L'acier reste très présent car un grand nombre de nuances et de revêtements est développés et lui permet de rester compétitif avec les nouveaux matériaux. La gamme d'aciers utilisés dans l'industrie automobile est présentée dans la **Figure 0.5**.

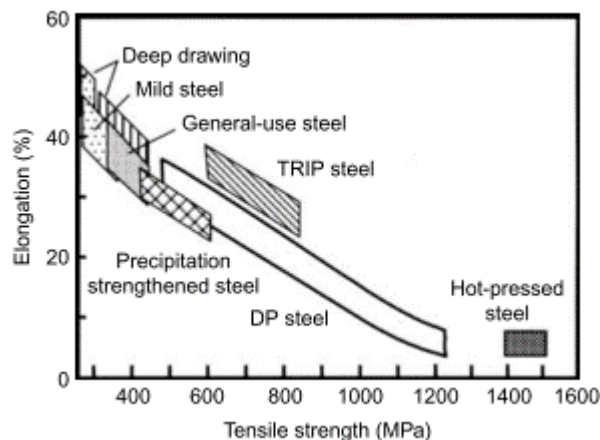


Figure 0.5 : Nuances d'acier pour l'industrie automobile [10]

Pour les pièces de carrosserie, l'élongation est favorisée en vue de la mise en forme par emboutissage avec de l'acier à faible résistance. Ce dernier est également galvanisé afin de pouvoir résister à la corrosion. La galvanisation est un revêtement à base de zinc qui sert à protéger la pièce de la corrosion. Les deux méthodes de galvanisation sont la galvanisation à chaud par immersion pour les grandes pièces et l'électrozingage pour les petites pièces [10].

Pour les pièces de structure, l'intérêt se porte sur la résistance mécanique avec des aciers à haute résistance. Les types d'aciers choisis pour les différentes parties d'une voiture sont présentés dans la **Figure 0.6**.

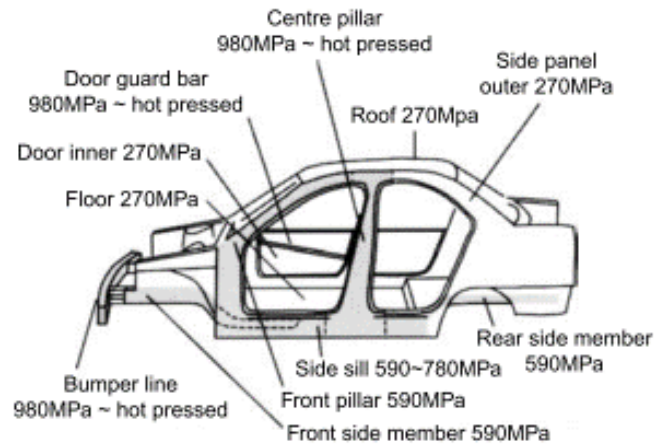


Figure 0.6 : Résistance des aciers utilisés dans la carrosserie [10]

### 0.2.2 Les procédés de soudage

Pour joindre des pièces métalliques de façon permanente tout en assurant une bonne résistance, la soudure est l'une des meilleures solutions. Il existe de nombreuses méthodes de soudage actuellement utilisées dans la fabrication de la carrosserie d'une voiture comme le soudage par résistance, le soudage à l'arc et le soudage laser que l'on retrouve dans le **Tableau 0.1**. Le soudage par résistance est effectué par la mise sous pression des pièces à assembler avant de les faire parcourir par un courant électrique. L'échauffement dû au courant électrique provoque la fusion au point de mise sous pression. Le soudage à l'arc tient dans la création d'un arc électrique entre une électrode et la pièce à souder. L'arc électrique provoque une élévation de la température au point de fusion de la pièce à souder et éventuellement de l'électrode.

Tableau 0.1 : Utilisation en nombre de points ou en mètre de différents procédés de soudage pour l'assemblage de la carrosserie de 5 types de véhicules [10]

Procédé de soudage	Véhicule N°1	Véhicule N°2	Véhicule N°3	Véhicule N°4	Véhicule N°5
<b>Soudures par résistance</b>	4194pts	4698pts	4170pts	4608pts	2206pts
<b>Soudures laser</b>	3m	175pts	7m		18m
<b>Soudures à l'arc</b>	1.5m	1.2m	5.5m	3.1m	1.5m

Le soudage par résistance est le plus répandu et le plus prisé dans l'industrie automobile avec entre 2000 et 5000 soudures par véhicule. Ce grand intérêt pour le soudage par résistance vient de la simplicité, de l'automatisation et de la rapidité du procédé [9]. Avec l'apparition de nouveaux designs et l'utilisation de nouveaux matériaux, de nouveaux besoins se créent. Mais ces besoins ne peuvent pas être comblés par ce procédé avec une soudure faite obligatoirement dans une configuration par recouvrement avec un accès aux deux côtés de l'assemblage et pour des épaisseurs dépassant difficilement plus de 3mm. De plus, il est complexe de souder des matériaux avec une mauvaise soudabilité comme l'aluminium et encore plus difficile de les souder avec d'autres matériaux. On se sert du soudage à l'arc pour réaliser les soudures qui posent des problèmes en soudage par résistance ; c'est-à-dire, les épaisseurs trop importantes ainsi que pour les emplacements et les configurations qui ne peuvent pas être réalisés par le soudage par résistance [10]. Le soudage à l'arc rencontre des problèmes de qualités des soudures et de déformation thermique avec un apport important d'énergie. Le procédé dépend grandement de la maîtrise de la technique par le soudeur, il est donc difficilement automatisable et en plus la vitesse de soudage est assez faible. Le soudage laser est une technologie nouvelle qui possède le potentiel de remplacer le soudage à l'arc et de réaliser une partie des soudures par résistance, notamment celles des flancs sur mesures où il est déjà devenu l'une des principales méthodes de soudage [6]. Une étude a démontré la faisabilité et l'efficacité de l'implantation du soudage laser pour le soudage des carrosseries, il ne représente actuellement que quelques mètres dans les voitures mais des

compagnies regardent pour mettre entre 20 et 30m de soudures au laser dans leurs prochains modèles [11].

### **0.2.3 Avantages et inconvénients du soudage laser par rapport aux autres procédés de soudage**

Le soudage laser est un bon procédé pour l'industrie automobile car il est facilement automatisable, très rapide et simple à contrôler. Un avantage précieux du soudage laser est aussi le faible apport d'énergie à la pièce et à la zone affectée thermiquement qui est réduite. Ainsi, la faible déformation thermique qui en résulte est un grand atout par rapport au soudage à l'arc [12]. Il y a aussi de nombreuses possibilités d'assemblage avec le soudage laser quels que soient les matériaux et leurs épaisseurs. Cet avantage est très bien exploité dans les « flancs sur mesures ». Par rapport au soudage par point, le soudage laser possède également un énorme potentiel avec des soudures de meilleure qualité et une plus grande flexibilité [13]. Des variations existent comme le soudage laser par scanner utilisant un jeu de miroirs. Ce dernier permet d'effectuer des petits déplacements du faisceau afin de créer une courte soudure rapide et précise. Cette technique permet de réduire du tiers le temps de soudage par rapport au soudage par résistance [10]. La grande variabilité du laser est également un atout important, puisqu'un même équipement peut servir à souder, couper, trouser et faire du traitement thermique en ajustant simplement les paramètres de l'appareil. Il est également possible d'utiliser plusieurs lasers à partir d'une seule source de puissance. Le fait d'utiliser des fibres optiques pour transmettre la puissance depuis la source jusqu'à la tête et le fait que le soudage est réalisé sans aucun contact entre l'équipement et la pièce permet au soudage laser d'atteindre des zones inaccessibles autrement. Il est aussi important de prendre en compte plusieurs avantages de l'ordre psychosocial de la technologie laser : la réduction du travail manuel requis pour les opérations, le prestige des nouvelles technologies, le côté écologique et le confort du travailleur [14]. Le défaut majeur du soudage laser est le coût important du matériel, mais ce prix tend à diminuer car cette technologie se démocratise. Comme toute technologie nouvelle, les connaissances sur le procédé doivent encore être approfondies et les meilleurs paramètres doivent encore être recherchés, afin d'éviter des

soudures de mauvaise qualité (fissure, porosité, manque de matière). Pour le soudage par résistance, ces paramètres sont entièrement maîtrisés et les machines déjà achetées et utilisées.

Seuls les matériaux avec une très grande réflectivité posent plus de problèmes pour le soudage laser que pour les autres procédés de soudure. Pour ces matériaux, le soudage laser n'est donc pas une solution. Une comparaison entre les avantages et inconvénients des trois procédés est montrée dans le **Tableau 0.2**.

Tableau 0.2 : Comparaison des différents procédés de soudage

<b>Caractéristique</b>	<b>Laser</b>	<b>Arc</b>	<b>Résistance</b>
<b>Vitesse</b>	V	X	V
<b>Faible apport d'énergie</b>	V	X	V
<b>Facilité d'accès</b>	V	X	X
<b>Haute pénétration</b>	V	V	X
<b>Effet sur l'environnement de travail (bruit, fumé)</b>	V	X	X
<b>Cout de l'équipement</b>	X	V	V
<b>Possibilités d'assemblage</b>	V	V	X
<b>Connaissance du procédé</b>	X	V	V

### **0.3 PROBLÉMATIQUES RELATIVES AU SOUDAGE DE L'ACIER GALVANISÉ**

#### **0.3.1 Soudures bout à bout pour l'acier galvanisé**

La galvanisation est l'action de recouvrir une pièce d'une couche de zinc pour la protéger contre la corrosion. Cependant, le zinc a une faible température d'évaporation (906°C) comparé à la température de fusion d'un acier (plus de 1400°C). Le soudage de l'acier galvanisé pose des problèmes avec le soudage par point avec une augmentation du

coût de la maintenance des électrodes et la tendance du zinc à coller aux électrodes (Hong and Shin 2017). Ainsi, le soudage laser est envisagé pour le remplacer. Dans des configurations de soudage par recouvrement l'évaporation du revêtement de zinc des surfaces inférieures a tendance à remonter par le bain de fusion et provoque des instabilités du capillaire, des projections et des porosités dans la soudure. De nombreuses recherches sont faites sur le sujet pour trouver une solution au problème des soudures de l'acier galvanisé. La solution trouvée est la création d'un espace entre les pièces afin de laisser s'évacuer les vapeurs de zinc. Cependant, un espace trop important laissera s'échapper également le métal fondu et donnera des soudures de mauvaise qualité [15]. La seule présence d'un espace n'est pas suffisante pour avoir des soudures de bonne qualité, il faut également avoir les bons paramètres de soudage [16]. Mais la mise en place d'un espace très précis est difficile à instaurer dans l'industrie. Une solution alternative est la création de trous le long de la soudure, cette technique est plus facile à contrôler mais demande des opérations d'usinage supplémentaires [17]. D'autres méthodes, ne nécessitant aucune opération préalable, sont aussi étudiées par exemple l'utilisation de deux faisceaux. Le premier faisceau crée une coupure à travers les pièces : elle permet d'évaporer le zinc le long de la trajectoire de la soudure et d'ouvrir une sortie pour les vapeurs supplémentaires. Le deuxième faisceau qui le suit de près soude ensemble les deux pièces en plus de reboucher la coupure [18]. Des configurations avec le soudage en angle [19] ou le soudage bout à bout ont été étudiées avec l'acier galvanisé [15]. Le soudage en angle est moins affecté que le soudage par recouvrement par le revêtement de zinc qui s'évacue assez facilement. Et pour le soudage bout à bout, aucune influence du revêtement n'a été trouvée. Cependant, la grande sensibilité des soudures au positionnement reste présente. Mais les soudures, dans ces deux cas, sont uniquement possibles aux extrémités des pièces. L'intérêt se portera sur l'utilisation d'une configuration bout à bout comme solution pour le soudage des aciers galvanisés permettant ainsi d'éviter complètement les problèmes du revêtement de zinc. Le soudage bout à bout est par ailleurs la seule configuration utilisée pour le soudage des « flancs sur mesures », son étude a donc un deuxième intérêt. Les problèmes de positionnement dans le soudage laser bout à bout sont présent à trois niveaux, comme représenté dans la **Figure 0.7** : l'alignement



du laser avec la trajectoire, l'alignement des surfaces à souder et surtout l'écartement entre les pièces.

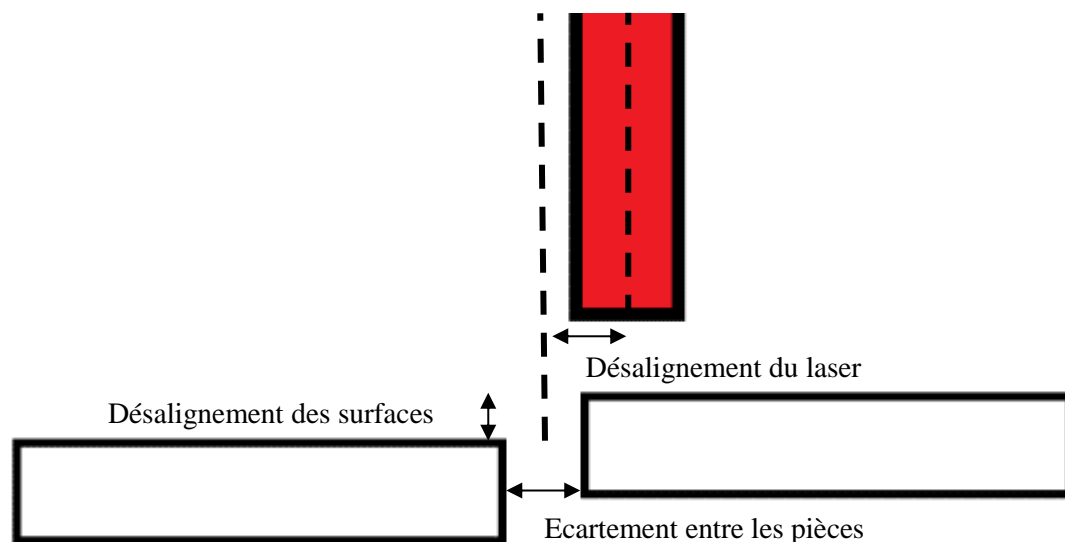


Figure 0.7 : Défauts de positionnement pour le soudage bout à bout

Pour l'alignement du laser avec la soudure, l'utilisation d'un traitement d'image peut permettre de générer une trajectoire alignée avec la soudure automatiquement et avec une précision suffisante pour ne pas avoir d'effet notable sur la qualité de la soudure [20]. L'alignement des surfaces à souder peut être contrôlé par la qualité du système de fixation. La soudure de pièces décalées ressemble au soudage de pièces avec des épaisseurs différentes et ni l'une ni l'autre ne pose de problème particulier. Le problème majeur reste donc l'écartement, qui est plus difficile à maîtriser.

### 0.3.2 Effets de l'écartement sur la qualité de la soudure

Le soudage laser bout à bout est une méthode de soudage autogène (sans apport de matière), le remplissage du petit écart entre les pièces à souder est possible grâce aux contraintes développées durant le refroidissement qui rapprochent les pièces entre elles [6]. Il est convenu que l'écartement ne doit pas dépasser 10% de l'épaisseur de la pièce la plus fine afin d'assurer un bon remplissage. Un écart trop important entre les pièces provoque un

défaut de manque de matière qui réduit la résistance de la soudure. Il est toutefois possible d'utiliser un métal d'apport sous forme de fil ou de poudre afin de remplir un écart plus grand. Des écarts de 1mm avec des pièces de 2mm d'épaisseur ont ainsi pu être soudés avec cette méthode [21]. Cependant, l'utilisation d'un métal d'apport enlève une grande partie de la simplicité de mise en place du soudage laser, ce qui réduit l'intérêt du procédé. L'écart doit aussi être inférieur au rayon du faisceau pour assurer une bonne absorption de l'énergie par les 2 pièces et éviter que la majeure partie du faisceau ne passe entre les pièces [10]. Ainsi un écart maximal acceptable est défini permettant une perte d'énergie et un manque de matière suffisamment faible pour obtenir une soudure avec une résistance acceptable. Le choix de la méthode de découpe permet de maîtriser la qualité des surfaces des pièces et donc leur mise en contact. Les méthodes donnant les meilleurs surfaces de contact sans l'utilisation d'opérations d'usinage supplémentaires sont la découpe à la cisaille de précision et la découpe au laser [22].

Dans la littérature, un modèle a été développé permettant d'obtenir les paramètres de soudage (notamment la vitesse et la puissance) afin de réussir à souder une épaisseur voulue avec un écartement voulu [23]. Ainsi, il est possible de savoir si un écartement peut être soudé et si oui quelle est la bonne combinaison de paramètres à utiliser. Malheureusement, ce modèle fournit uniquement des résultats sans présenter l'étude des effets de l'écartement sur la taille du cordon de soudure. Il a été vu récemment que l'écart permet, à la manière du soudage par capillaire, de transmettre la puissance directement dans l'épaisseur de la pièce et ainsi de faciliter l'amorçage du soudage en trou de serrure et d'atteindre des pénétrations plus importante [24]. Des recherches sur les paramètres optimaux pour la soudure laser d'acier à haute résistance et d'acier galvanisé avec des faibles épaisseurs (inférieure à 2mm) avaient ainsi montré que l'écart était un paramètre important pour les dimensions du cordon de soudure, et trouvaient un écartement optimal entre 0.1mm et 0.15mm [25]. Il peut donc être retenu que l'écartement doit être limité afin de ne pas dépasser l'écart maximal acceptable, mais il n'est pas intéressant qu'il disparaisse complètement. De plus l'écartement n'est pas le seul paramètre à prendre en compte, une corrélation a été trouvée entre les effets de la rugosité de la surface et l'écartement. Ainsi, une rugosité optimale existe et améliore la

qualité de la soudure et la pénétration. Cette rugosité optimale dépend de l'écartement ; plus il est grand, plus la rugosité optimale est élevée. [26]. La présence d'un écart dans le soudage bout à bout peut être problématique, mais cet écart devient positif si sa dimension est bien choisie. Un écart trop important générera des soudures de mauvaise qualité avec un manque de matière important et de la perte d'énergie, mais un écart bien maîtrisé permet un amorçage plus efficace du capillaire et des soudures plus profondes et de meilleure qualité. En général, les études cherchent uniquement à déterminer les paramètres optimaux et peu d'informations sont actuellement disponibles sur la quantification des effets de l'écartement et les corrélations entre celui-ci et d'autres paramètres.

### **0.3.3 Modélisation du soudage laser**

Les caractéristiques mécaniques d'une soudure obtenue par laser dépendent des propriétés mécaniques du matériau et des dimensions du cordon de soudure. Ces dimensions dépendent elles-mêmes de plusieurs paramètres du procédé tels que la puissance, la vitesse, le diamètre de la fibre, etc. L'exploitation des possibilités qu'offre ce procédé nécessite donc le développement de stratégies permettant d'optimiser ces paramètres de manière à produire les dimensions et les caractéristiques désirées pour la soudure. Des stratégies d'optimisation telles que les surfaces de réponse, les plans factoriels, la méthode de Taguchi et les algorithmes génétiques sont utilisés pour étudier les caractéristiques des cordons de soudure et ainsi éviter le traditionnel long et coûteux processus essais-erreurs [27]. Ces méthodes ont besoin d'être alimentées par des résultats qui peuvent être obtenus à l'aide d'expérimentations ou de modèles numériques. Les modèles numériques, lorsqu'ils sont disponibles, offrent l'avantage d'être plus rapides et gratuits, mais ils demandent aussi à être développés et validés avant de pouvoir être utilisés. Une des méthodes de modélisation la plus utilisée est la simulation par éléments finis. Cette méthode nécessite de connaître les phénomènes physiques qui ont eu lieu lors du procédé et de les décrire sous formes d'équations différentielles. Pour avoir un modèle le plus précis possible, un maximum de phénomènes doit être contenu dans le modèle. Cependant, certains phénomènes interagissent entre eux et l'augmentation du nombre de phénomènes augmente considérablement la

complexité du modèle et le temps de calcul. Afin de réduire la complexité du modèle, des hypothèses sont généralement faites dans le but de négliger certains phénomènes et/ou dépendances qui n'ont qu'un faible effet sur les résultats recherchés. Pour tous les procédés de soudage, un grand nombre de phénomènes sont identiques. Dans le cas du soudage laser, de nouvelles problématiques sont présentes avec l'existence d'un capillaire de vapeur qui se déplace. C'est pourquoi certains phénomènes, qui n'étaient pas présents ou pouvaient être ignorés pour d'autres méthodes, doivent alors être considérés pour le soudage laser [28]. Il existe deux grandes catégories de simulation numérique par éléments finis pour le soudage laser. La première représente les simulations pour applications industrielles et expérimentales. Leur objectif est d'obtenir des estimations de résultat afin d'éviter le recours à l'expérimentation. La plupart des études sont dans cette catégorie, elles ont pour but d'obtenir le champ de température à l'intérieur de la pièce afin de connaître les dimensions du cordon de soudure, les déformations thermiques, les contraintes résiduelles ou la microstructure [29-34] et [1]. La deuxième catégorie regroupe les simulations à but scientifique, elles cherchent à reproduire des résultats, difficilement observables et mesurables expérimentalement, grâce à la capacité des simulations par éléments finis à fournir un regard à l'intérieur de la pièce. Ces modèles sont très complexes, ils cherchent par exemple à simuler les déplacements du fluide dans le bain de fusion ou encore la formation et la dynamique des flux dans le capillaire [35-38] et [24]. Ce mémoire s'intéressera aux simulations de la première catégorie.

La première problématique est la modélisation du laser qui est défini comme une source de chaleur. Le choix de la source de chaleur est un paramètre important. Les premiers modèles utilisaient des sources de chaleur ponctuelles. Par la suite, les sources surfaciques, sous forme principalement de fonctions Gaussiennes en deux dimensions, ont permis une meilleure approximation. Avec la découverte du soudage par capillaire, qui dépose la chaleur à l'intérieur de la pièce, l'utilisation de sources volumiques est devenue obligatoire. Les sources surfaciques restent toutefois encore utilisées pour modéliser le soudage par conduction, mais il est également possible d'utiliser des sources volumiques pour ce mode [39]. Les sources volumiques employées sont de trois types : les sources volumiques

gaussiennes (cylindriques ou coniques), les doubles ellipsoïdes et les combinaisons de plusieurs sources [40].

La double ellipsoïde mise au point par Goldak [41] est la première source volumique à avoir été utilisée dans le soudage laser. Les changements de phase du matériau sont généralement négligés pour éviter le calcul exigeant de la frontière mobile entre les phases. Ainsi, les déplacements de fluides et les changements de propriétés du matériau entre ces différentes phases sont également négligés, mais des méthodes ont été mises au point pour prendre en compte ces changements sans simuler directement les changements de phases. Ces techniques résident généralement dans la modification arbitraire de paramètres ou propriétés afin de « modéliser » ces changements. Ainsi, une augmentation contrôlée de la conduction de la chaleur dans la zone fondue permet d'imiter l'augmentation du transfert de chaleur par convection présent dans le bain de fusion, et l'utilisation de la double ellipsoïde, avec une partie arrière plus longue que la partie avant représente le transport de l'énergie de l'avant du bain de fusion vers l'arrière [42]. L'utilisation de propriétés dépendantes de la température permet d'observer les effets du changement de propriétés des phases et une modification de la chaleur spécifique représente l'énergie absorbée par la chaleur latente [2] [43]. La modélisation d'une soudure avec écartement se fait généralement par des modèles complexes utilisant des frontières mobiles entre les phases afin d'avoir le remplissage de l'écart par le métal [38] et [24]. La modélisation de soudure avec écartement sans simuler l'écoulement du métal fondu dans l'écart entre les pièces, doit pouvoir se faire en utilisant la méthode vue précédemment de la modification arbitraire de paramètres afin d'obtenir des résultats cohérents.

Les réseaux de neurones artificiels sont un autre moyen puissant capable de modéliser des relations entrées/sorties complexes [44]. Ils ont été utilisés avec succès pour modéliser de nombreux procédés de soudage dont le soudage laser [27]. Certains phénomènes complexes comme le changement de mode de soudage a été facilement simulable par réseau de neurones artificiels en lui présentant des données adaptées [45, 46]. Le fonctionnement d'un réseau de neurones artificiels est inspiré du fonctionnement d'un cerveau, il est constitué

d'unités de calculs indépendants, appelés des neurones, interconnectées entre elles. Des données contenant des couples entrée/sortie sont présentées au réseau lors de la phase d'apprentissage. En suivant un algorithme d'apprentissage, le réseau de neurones artificiels va alors modifier ses paramètres internes, qui sont le poids des connections entre les neurones, afin de pouvoir approximer les résultats attendus. Une fois la phase d'apprentissage terminée, les entrées seules sont présentées au réseau, qui est alors capable de déterminer les sorties correspondantes. Plus le nombre de données présentées au réseau durant la phase d'apprentissage est grand, meilleure sera la prédiction des résultats pour des données auxquelles il n'a jamais été confronté. Les résultats de ces modèles simples, rapides et peu coûteux dépendent de la construction du réseau (choix des entrées, nombre de neurones, méthode d'apprentissage, etc.) et du nombre de données d'apprentissage. L'inconvénient majeur de ce type de modèle est donc le besoin élevé en données, là où une simulation par éléments finis a juste besoin de quelques résultats pour se valider. Les modèles généralement utilisés pour le soudage laser sont des réseaux de type « feedforward » avec apprentissage par rétropropagation de l'erreur [47]. C'est-à-dire que des entrées sont présentées au réseau et sont propagées dans le réseau, uniquement vers les neurones inférieurs, jusqu'à atteindre la couche de sortie. La sortie est alors comparée au résultat attendu et une valeur de l'erreur est calculée. L'erreur est alors remontée à travers le réseau, depuis la sortie vers l'entrée, et le poids des connections est modifié en fonction. La structure optimale d'un réseau fait encore l'objet d'études et aucune solution idéale n'a été trouvée, le choix se fait alors par la méthode essais-erreurs [48, 49]. Il est toutefois reconnu que l'utilisation d'un grand nombre de neurones permet au réseau de mieux identifier des relations complexes entre les entrées et les sorties. Cependant, un trop grand nombre de neurones a tendance à faire mémoriser au réseau les couples entrées/sorties durant l'apprentissage sans identifier de relation, ce qui réduit grandement les capacités du réseau à prédire les résultats pour de nouvelles entrées. La construction d'un réseau de neurones artificiels reste donc un travail de recherche considérable.

### 0.3.4 Problématique spécifique

La réduction du poids des véhicules et le soudage des pièces en acier galvanisé sont parmi les grandes problématiques de l'industrie automobile actuelle. Le soudage en configuration bout à bout permet d'éviter les problèmes de soudage de l'acier galvanisé et est également utilisé pour le soudage des flancs sur mesures, une innovation permettant des économies de poids sur la carrosserie. Cependant, les contraintes de positionnement dans cette configuration limitent son usage dans l'industrie. Notamment l'écartement qui doit être suffisamment petit afin d'assurer la qualité des soudures. Les dimensions acceptables pour l'écartement sont connues, mais l'impact des écarts inférieurs ou supérieurs aux dimensions acceptables ne sont que peu regardés. La présence d'un écartement peut pourtant avoir un effet positif sur la soudure, notamment en augmentant sa pénétration et en facilitant l'amorçage de la soudure en trou de serrure. Il serait intéressant de quantifier les effets de l'écartement sur les dimensions du cordon de soudure et ses interactions avec d'autres paramètres standards du soudage laser.

La prédiction des résultats en temps réel est une étape importante dans l'implantation d'un nouveau procédé dans l'industrie car elle permet d'éviter les expérimentations sur place. Pour répondre à ces exigences, les modèles par réseaux de neurones artificiels sont les plus adaptés, puisqu'ils sont capables de modéliser le soudage laser et de fournir des résultats instantanément. Une étude du choix de la structure et des paramètres du réseau est nécessaire pour obtenir un réseau fournissant des résultats satisfaisants. Il faut aussi posséder un grand nombre de données pour l'apprentissage d'un tel réseau. La simulation par éléments finis peut fournir ces résultats plus efficacement que l'expérimentation. La simulation de soudure avec des écarts est faite avec des modèles complexes qui sont très exigeants en temps de calcul. Dans le but d'avoir une simulation avec un temps de calcul convenable pour la création d'une grande base de données, il serait nécessaire de faire une simulation simplifiée du soudage avec un écart.

#### 0.4 OBJECTIFS

L'identification du type de corrélations entre les paramètres du procédé de soudage laser et la géométrie de la soudure est fondamentale pour comprendre et maîtriser le procédé. Ce projet a pour premier objectif d'identifier et d'analyser les relations entre les paramètres du procédé de soudage laser et la forme et les dimensions du cordon de soudures dans le cas de soudage de pièces en acier galvanisé en configuration bout à bout. Une des originalités du projet de recherche porte sur l'étude de soudage de l'acier galvanisé en configuration bout à bout ainsi que la prise en compte de l'écartement entre pièces comme paramètre à part entière. Le projet propose également d'étudier les effets du diamètre du faisceau et de l'épaisseur de la pièce, comme autres paramètres intervenant dans la détermination de l'écartement maximale acceptable. Étant les paramètres les plus influents sur la qualité des soudures au laser, la puissance du laser et la vitesse de soudure sont considérées comme base des investigations projetées. La largeur du cordon, la profondeur de pénétration, le sous-remplissage et la dureté sont les attributs de la soudure à évaluer. La détermination des effets entre les paramètres et la qualité de la soudure a également pour but de fournir de précieuses informations pour l'identification des variables les importantes afin de construire des modèles prédictifs précis et robuste. Le second objectif consiste à développer des modèles permettant la prédiction des caractéristiques de la soudure sans avoir recours au long et coûteux processus essai-erreur. Dans un premier temps, un modèle numérique 3D par éléments finis est réalisé pour permettre d'évaluer efficacement et de façon économique un grand nombre de combinaisons de paramètres. Pour s'assurer de la justesse du modèle, une validation à l'aide de données expérimentales sera nécessaire. La simulation par éléments finis permettra alors une analyse qualitative et quantitative du comportement du procédé. La combinaison des données expérimentales et des résultats de simulation permettront ensuite de constituer une base de données riche et abondante donnant accès à une modélisation par réseaux de neurones artificiels. Les modèles prédictifs par réseaux de neurones artificiels offrent l'avantage de répondre aux exigences de l'industrie en étant capable de faire des estimations précises, en temps réel, de la qualité de la soudure. Les relations entre les



paramètres de soudage et les caractéristiques géométriques de la soudure sont analysées et leurs sensibilités aux conditions de soudage sont évaluées à l'aide d'outils statistiques pertinents dans le but de déterminer les paramètres d'entrée des modèles. Sur la base de ces résultats, plusieurs options de modèle de prédiction sont établies et évaluées à l'aide de critères précis avec pour but d'obtenir le modèle prédictif le plus précis et le plus robuste possible.

En résumé, les principaux objectifs du projet sont :

- Étude expérimentale des effets des paramètres de contrôle du procédé sur la qualité de la soudure et leurs contributions à la variation de ces différentes caractéristiques.
- Développement et validation d'un modèle numérique 3D par éléments finis capable de simuler le comportement du procédé sous des conditions difficiles à réaliser expérimentalement.
- Exploitation des données expérimentales et des résultats des simulations pour la réalisation d'un modèle prédictif optimal en tirant avantage des possibilités des réseaux de neurones artificiels.

## **0.5 MÉTHODOLOGIE**

L'objectif de cette recherche consiste à développer des modèles prédictifs des dimensions du cordon de soudure de l'acier galvanisé en fonction des paramètres du procédé. Pour aboutir à des modèles fiables, une étude de la sensibilité de la forme et des dimensions du cordon de soudure aux paramètres du soudage est considérée comme une étape indispensable et doit précéder la modélisation et la prédiction. Cette étape permet d'analyser et de quantifier les effets des paramètres du procédé sur la qualité de la soudure à partir d'outils statistiques. La démarche adoptée pour atteindre les objectifs de ce projet est divisée en trois phases. L'objet de la première phase consiste à conduire un plan d'expérience structuré combiné à des techniques éprouvées d'analyse statistique dans le but d'analyser les effets des différents paramètres du procédé sur les caractéristiques de la soudure. La seconde

phase consiste à développer un modèle numérique de simulation 3D utilisant la méthode des éléments finis et à le valider expérimentalement afin d'avoir accès à d'avantages de combinaisons de paramètres. Les résultats des simulations permettent d'enrichir la base de données en les combinant avec les données expérimentales dans le but d'élaborer un modèle de réseau de neurones artificiels le plus précis possible. Finalement dans la troisième étape, des modèles prédictifs par réseaux de neurones artificiels sont construits en se basant sur les variables importantes identifiées dans les étapes précédentes et en se servant de l'ensemble des données obtenues pour l'apprentissage et la validation.

Les essais expérimentaux sont réalisés sur des plaques en acier ASTM A635CS avec un revêtement galvanisé A40. Les échantillons sont découpés à la cisaille aux dimensions de 30mm par 50mm. Un laser Nd:YAG est utilisé pour l'étude, il émet un faisceau avec une longueur d'onde de 1070nm et une puissance maximale de 3000W. Un plan d'expérience, basé sur la méthode de Taguchi, est choisi pour obtenir le maximum de résultats avec le minimum d'essais. Les facteurs considérés sont la puissance du laser, la vitesse de soudage, le diamètre du faisceau, l'épaisseur de la pièce et l'écart entre les tôles. Les attributs de qualité de la soudure relevés sont la largeur et la profondeur du cordon de soudure, la dureté et le manque de matière. Les échantillons, une fois soudés, sont traités en suivant une procédure standard de métallographie comprenant la découpe, le polissage, l'attaque chimique et l'observation au microscope. Une analyse statistique ANOVA est effectuée sur les résultats afin de pouvoir en tirer les effets des paramètres considérés et leurs contributions à la variation des différentes caractéristiques.

Le modèle par éléments finis est effectué sur le logiciel COMSOL. Le modèle est construit sur la base des équations du transfert de chaleur qui permettent d'obtenir le champ de température dans la pièce et ainsi les dimensions du bain de fusion. Afin d'avoir un modèle le plus précis possible, il faut prendre en compte un maximum de paramètres sans le rendre trop complexe pour autant. Le but étant d'avoir un modèle simple, les frontières mobiles ne sont pas utilisées. La chaleur latente et le changement de propriétés entre les phases seront modélisés avec des modifications arbitraires de certains paramètres spécifiques. Les deux

modes de soudage au laser, par conduction et en trou de serrure, sont simulés avec des sources de chaleurs surfaciques et volumiques respectivement. La transition entre les deux sources de chaleurs a été assurée en fonction de la densité de puissance et du temps d'interaction. Une méthode pour prendre en compte l'écartement est étudié en modifiant arbitrairement le diamètre. Un modèle mathématique est également développé afin de prédire le manque de matière. Les résultats, donnés par le modèle, sont validés par les résultats expérimentaux structurés de la première partie.

La dernière étape consiste à développer un modèle pouvant générer instantanément et précisément la prédiction de la forme et des dimensions de la soudure. Les modèles par réseaux de neurones artificiels présentent des avantages permettant de remplir ces conditions. Les réseaux de neurones artificiels choisis sont des réseaux « feedforward » avec rétropropagation de l'erreur, ils sont réalisés sur le logiciel MATLAB. Les attributs regardés sont la largeur du cordon de soudure et la profondeur de pénétration. Les données structurées nécessaire à l'apprentissage et la validation des modèles proviennent à la fois des expérimentations et des résultats de simulations réalisés dans les étapes précédentes. On s'intéresse, lors du développement des modèles, à l'optimisation des entrées du réseau. La méthode d'essais et erreurs est utilisée pour définir la configuration optimale du réseau. Les relations entre les paramètres de soudage et les caractéristiques géométriques de la soudure sont analysées et leur sensibilité aux conditions de soudage est évaluée à l'aide d'outils statistiques pertinents pour aider dans le choix des variables d'entrées des modèles. Sur la base de ces résultats, plusieurs options de modèle de prédiction sont établies et leurs performances sont évaluées à l'aide de critères de performance précis.

## **0.6 ORGANISATION DU MÉMOIRE**

Le présent mémoire est rédigé sous forme d'articles. Il commence par une introduction générale suivie de trois chapitres, correspondant aux trois articles reprenant les trois grandes étapes de la méthodologie, et il finit par une conclusion générale. L'introduction présente le soudage laser et son utilisation dans l'industrie automobile. Elle présente également la

problématique, les objectifs et la méthodologie du projet de recherche. Le premier chapitre présente un article consacré à la réalisation de l'étude expérimentalement du soudage bout à bout de pièces mécaniques en acier galvanisé avec un laser Nd:YAG de 3kW. Le deuxième chapitre est également présenté sous forme d'un article introduisant le modèle de simulation en trois dimensions par éléments finis du procédé de soudage laser dans le cas de soudure de pièce en acier en configuration bout à bout. Le troisième chapitre présente le troisième article consacré au développement du modèle prédictif par réseau de neurones artificiels. Une conclusion générale clos le mémoire en soulignant les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce projet et formule des pistes et recommandations pour des travaux futurs.

# CHAPITRE 1

## ETUDE EXPERIMENTALE DES EFFETS DES PARAMETRES DE SOUDAGE SUR LA QUALITE DES SOUDURES DANS LE CAS DU SOUDAGE LASER EN CONFIGURATION BOUT A BOUT

### 1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

L'article présente une étude expérimentale du soudage au laser des pièces en acier galvanisé en configuration bout à bout. Le but de l'étude est d'évaluer les effets des paramètres du procédé et de leurs interactions sur les dimensions et la dureté du cordon de soudure. L'étude est basée sur un plan d'expérience suivant la méthode de Taguchi. Les dimensions relevées sont la largeur, la pénétration et le manque de matière, tandis que les paramètres sélectionnés sont la puissance, la vitesse, le diamètre, l'épaisseur et l'écartement. Les effets de ces paramètres sont étudiés à travers une analyse de la variance afin de trouver leur contribution à la variation des différentes propriétés de la soudure. Les graphiques des effets principaux et des interactions sont également utilisés pour comprendre l'influence des paramètres du procédé. Les résultats dévoilent que tous les paramètres influencent la largeur et la pénétration de la soudure avec une prédominance de la puissance du laser et de la vitesse de soudage. L'impact du diamètre du laser sur la pénétration est négligeable. La présence d'un écartement montre des soudures plus profondes et plus fines que les soudures faites sans écartement. À cause de l'utilisation des pièces découpées à la cisaille, sans usinage supplémentaire, un manque de matière de 5% et 10% est obtenu pour les soudures sans écartement. Les tests de dureté présentent des résultats similaires pour tous les essais, avec des valeurs en accord avec la littérature.

Ce premier article, intitulé «*Experimental investigation of laser welding process in butt-joint configurations*», fut corédigé par moi-même ainsi que par le professeur Abderrazak El Ouafi. Il fut accepté pour publication dans sa version définitive en 2016 par le *World Journal of Engineering and Technology (WJET)*. En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail fut l'essentiel de la recherche sur l'état de l'art, le développement de

la méthode, l'exécution des tests de performance et la rédaction de l'article. Le professeur El Ouafi, second auteur, a fourni l'idée originale. Il a également aidé à la recherche sur l'état de l'art, au développement de la méthode ainsi qu'à la révision de l'article.

## **1.2 EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LASER WELDING IN BUTT-JOINT CONFIGURATIONS**

### **1.2.1 Abstract**

This paper presents an experimental investigation of laser welding low carbon galvanized steel in butt-joint configurations. The experimental work is focused on the effects of various laser welding parameters on the weld quality. The investigations are based on a structured experimental design using the Taguchi method. Welding experiments are conducted using a 3 kW Nd:YAG laser source. The selected laser welding parameters (laser power, welding speed, laser fiber diameter, gap between sheets and sheet thickness) are combined and used to evaluate the variation of four weld quality attributes (bead width, penetration depth, underfill and hardness) and to identify the possible relationship between welding parameters and weld physical and geometrical attributes. The effects of these parameters are studied using ANOVA to find their contributions to the variation of different weld characteristics. Plots of the main effects and the interaction effects are also used to understand the influence of the welding parameters. The results reveal that all welding parameters are relevant to bead width (BDW) and depth of penetration (DOP) with a relative predominance of laser power and welding speed. The effect of laser fiber diameter on penetration depth is insignificant. Typical gap-dependent weld shapes show that a small gap results in a narrower and deeper weld. Due to the standard sheared edge, an underfill between 5% and 10% occurs for no-gap experiments. The resulting hardness values are relatively similar for all the experimental tests.

### **1.2.2 Introduction**

Laser welding is used in the automotive industry for welding bodies with up to 30 m of welds length per vehicle. In order to design lighter cars for reduced fuel consumption, the most recent developments use tailor-welded blank, requiring various metals types and thicknesses to be welded together before the forming process. Such blank can have the right

properties located precisely where they are needed, minimizing the use of materials and reducing the weight and cost [11, 13]. Laser welding currently used to assemble this new kind of blank performs very well than other welding methods in terms of speed, cost and welding quality. In automotive bodies, no other process has shown an equivalent versatility with steel grades developed to meet the specific requirements of these applications.

The welding of thin steel sheets is mainly done with overlap welding or butt-joint welding. Galvanized sheets are used for corrosion prevention, but the zinc vaporizes at a lower temperature (1180 K) than that at which the steel fuses (1730 K). Due to this discrepancy, problems occur during overlap laser welding of galvanized sheets: vaporization of the zinc might displace liquid steel, and vapour can get trapped in the weld and create porosities [10, 50]. Several studies have dealt with this problem by creating a gap between sheets to enable off-gassing of the vapour without disturbing the weld pool, or by adjusting other parameters to reduce the size and the number of defects [15, 16].

Butt-joint welding is commonly used to avoid these kinds of problems, but this configuration requires very precise positioning. A vertical gap of only 15% of the thickness and a horizontal gap of 10% of the thickness can be tolerated to ensure quality and filling of the weld. For sheets thinner than 3 mm, this means less than a 0.5 mm gap on along more than 10 cm of weld. Since laser welding is an autogenous process, the residual stress developed during cooling is used to fill the gap up to at least 80% of the thickness, which is generally required in the automotive industry. Another requirement is that the laser diameter (about 0.4 mm) be two times larger than the gap to avoid defects. To reach positioning requirements, laser cutting, precision die blanking, or edge preparation are commonly used for linear welding [22]. To avoid the filling problem in butt-joint configurations, filler metal in the form of wire or powder can be used in conjunction with laser welding. Such methods can fill up to 1 mm gaps for 2 mm thickness sheets, but reduce the advantage of the laser welding process [21].

Neural networks have been used to determine the maximum gap that can be welded depending on the welding speed, the laser power and the sheet thickness [23]. Another study



has been conducted on the impact of the gap and edge roughness on penetration for high power laser welding (10 kW to 14 kW) [26]. Effects on depth of penetration and others welds quality are established for various welding parameters. Works on welding parameters optimization for tailor blank welding reveal that the use of a small gap between 0.1 mm and 0.15 mm gives a relatively accepted weld quality [25, 51]. Many others experimental investigations find the use of a small gap can produce a best weld. However, no relationships can be found to quantify the gap impact on the weld dimension, nor its interaction with the other welding parameters.

Based on all these works and observations, it is clear that positioning and welding parameters need to be controlled precisely to produce the desired welding quality especially in the case of butt joint welding of automotive bodies and tailor blank. A structured experimental investigation is required to understand the effects and the interaction of various parameters in orders to build an efficient weld quality predictive modeling.

The paper presents an experimental investigation of laser welding low carbon galvanized steel in butt-joint configurations. The effects of welding parameters and conditions (laser power, welding speed, laser fiber diameter, gap between sheets and sheet thickness) on the variation of weld quality attributes (bead width, penetration depth, underfill and hardness) are studied. Analysis of variance is executed to quantify the impact of each parameter on the weld quality and assess the parameters interactions. The combination of welding parameters and conditions that can give the best weld quality for various thickness with or without gap are identified.

### **1.2.3 Materials and experimental procedure**

#### **1.2.3.1 Materials**

The experimental investigations were conducted using galvanized steel ASTM A635CS with galvanneal A40 coating. The sheet thickness was chosen to fit within the thickness range usually used for automotive bodies (0.8 - 3.6 mm). Three different thickness

are taken: gauges 11, 14 and 20, respectively 3.132 mm, 1.994 mm and 1.006 mm. The chemical composition of all sheets are shown in **Table 1.1**. Specimens were cut to 30 mm x 50 mm using hydraulic shear. The edge did not receive further treatment. The small differences in chemical composition are neglected.

Table 1.1 : Chemical composition of the metal

<b>Component</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Al</b>	<b>N</b>
<b>Gauge 11 (3 mm)</b>	0.04	0.19	0.005	0.002	0.01	0.01	0.02	0.009	0.038	0.0039
<b>Gauge 14 (2 mm)</b>	0.09	0.35	0.005	0.01	0.02	0.05	0.04	0.06	0.03	0.0029
<b>Gauge 20 (1 mm)</b>	0.05	0.24	0.009	0.013	0.007	0.029	0.012	0.037	0.04	0.004

### 1.2.3.2 Laser experimental procedure

The welding equipment was a six-axis-robotic system FANUC M-710ic equipped with a fiber Laser source IPG YLS-3000-ST2 and a laser head HIGHYAG BIMO. The Nd:YAG laser source emits light with a wavelength of 1070 nm and a maximum power of 3 kW. The power is transferred through an optical fiber, with a diameter of 200  $\mu\text{m}$ , to the laser head, with a focal length of 300 mm. A collimator allows the user to adjust the beam diameter between 340  $\mu\text{m}$  and 520  $\mu\text{m}$ . **Figure 1.1** shows the laser welding setup with the laser and the clamping system. The air gap was created using a 0.1 mm thick steel strip positioned between the samples.

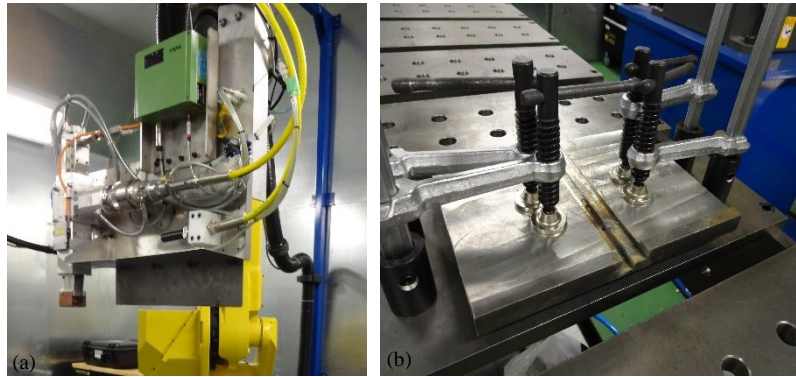


Figure 1.1 : Experimental set-up showing (a) laser and (b) clamping system

### 1.2.3.3 Mechanical characterization

After welding, the welded assemblies were cut perpendicular to the weld surface to obtain the desired cross-sections. The cut specimens were then prepared for microscopic observation using standard procedures including grinding, polishing and etching.

An optical microscope, Clemex MMT Type A, with a CMT program was used for the evaluation of the weld dimensions. For each experiment, three dimensions were measured (penetration, width, and lack); each measurement was taken 3 times and then averaged to obtain the data used in the analysis.

Vickers micro-hardness testing was conducted with the same equipment using a load of 500 g and a dwell time of 15 s. The base material measurements were taken far from the fusion zone. All indentations were adequately spaced so that the strain fields from adjacent indents would not interfere with each other.

### 1.2.3.4 Design of experiments

Laser power, welding speed, sheet thickness, beam diameter and gap are the parameters used in this study. The thickness and laser beam diameter are chosen to fit with the available ranges: 1 mm, 2 mm and 3 mm for the thickness and 340  $\mu\text{m}$  to 520  $\mu\text{m}$  for the diameter.

The results of preliminary studies on the parameter limitations and the results of others similar studies [5], were used to determine upper and lower limits for the parameters.

For the gap, three relevant information emerged from the literature review. The gap has to be less than 10% of the workpiece thickness and less than the diameter of the laser beam. A gap ranging from 0.1 mm to 0.2 mm is generally used and gives good results. Considering these constraints, a gap of 0.1 mm is needed, leaving only the welding speed and laser power to be determined. These two parameters are known to be very influential. Using the results of the preliminary tests, the upper and lower limits are taken to respect the weld penetration constraint. This means that the lowest speed with the highest power can result in full weld penetration for a 3 mm thickness specimen, and the highest speed with lowest power can result in partial weld for a 1 mm thickness specimen. Three levels are chosen to assess the nonlinear components of the parameter effects: speed between 3 and 9 m/min, and power between 2 and 3 kW. The factors and levels chosen can be seen in **Table 1.2**.

Table 1.2 : Factors and levels for experimentations

<b>Factors</b>	<b>Levels</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Gap (mm)</b>	0	0.1	-
<b>Thickness (mm)</b>	1	2	3
<b>Power (kW)</b>	2	2.5	3
<b>Speed (m/min)</b>	3	6	9
<b>Diameter (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	340	450	520

These factors and levels are used to generate an experiment design that will yield the maximum data with the minimum experimentation efforts. The Taguchi method is used to achieve an efficient statistical analysis. An explanation of this method can be found in [52]. An orthogonal array L54 is used allowing the combination of factors with 2 or 3 levels. In this case one factor with 2 levels and four factors with 3 levels are needed. Welding tests are carried out in a random order to avoid any systematic error in the experiment. In addition, repeatability tests are done using the median values from the experiment design, (2500 W

power, 2 mm thickness, 6 m/min speed and 450  $\mu\text{m}$  diameter). Since the positioning of the gap experiment requires different handling, 12 repeatability tests are done with a gap and 12 without gap, for a total of 24 supplementary tests.

## **1.2.4 Results and discussion**

### **1.2.4.1 Repeatability**

During the repeatability tests, the depth of penetration, bead width, and underfill are precisely measured. In order to evaluate the total measurement error resulting from non-studied parameters such as workpiece positioning, parameter stability and change in environment during the experiments, average of quality attributes, standard deviations, and the relative errors are estimated.

The results in **Table 1.3** indicated the good precision for the measurement of the penetration and the width, showing that with a normal distribution, 68% of observations will be within one standard deviation and 95% will be within two standard deviations. This means that the penetration and the width can be estimated with less than 5% error and the underfilling can be estimated with less than 15% error. The underfill dimensions are relatively small generating higher error percentages. The standard deviations are similar for all parameters. The standard deviation is slightly higher for the gap test. That means there is lower repeatability in the gap positioning.

Table 1.3 : Results of repeatability test (a) no gap and (b) with gap

<b>(a) no gap</b>	<b>DOP (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>BDW (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Undercut (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>(b) with gap</b>	<b>DOP (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>BDW (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Undercut (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>Min</b>	1493	971	154	<b>Min</b>	1167	713	360
<b>Max</b>	1612	1080	254	<b>Max</b>	1353	922	507
<b>Mean</b>	1542	1023	212	<b>Mean</b>	1253	822	422
<b>Standard deviation</b>	38	32	30	<b>Standard deviation</b>	43	42	39
<b>Relative error</b>	2%	3%	12%	<b>Relative error</b>	3%	3%	7%

An underfill of 10% of the thickness is present in the case of experimentation without gap. This must be caused by the edge morphology of the sheared edge. Flat or concave welds are produced using laser cutting or precision die blanking. A small gap exists when two sheared specimens are connected, as only the 2 burnished zone are in contact, the rest of the edge are spaced. The underfilling becomes about 20% of the thickness with the gap experiment. **Figure 1.2** shows the morphology of the edge of the specimen used for the experiment. The dimensions of the sheared edge have been measured and are relatively close for the 3 mm thickness. The rollover accounts for about 10% of the thickness, the burnished zone between 40% and 45%, and the fractured zone for 50%. The fracture angle ranges from  $12^\circ$  to  $15^\circ$ .

#### 1.2.4.2 Micro hardness

**Figure 1.3** shows the distribution of micro-hardness across the laser welding zone for the repeatability test. According to the hardness test, the hardness of the substrate (150 Hv) was much lower than that of the welded region (330 Hv), which agreed with the results found for low carbon steel [21]. The increase in hardness is caused by grain refinement, formation of hard phases and generation of residual stress in the weld region due to rapid solidification [51]. The micro hardness is comparable in all tests, with and without gap.

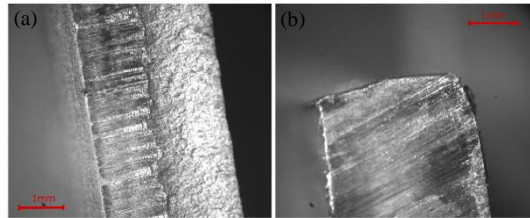


Figure 1.2 : Sheared edge specimens (a) front view, (b) side view

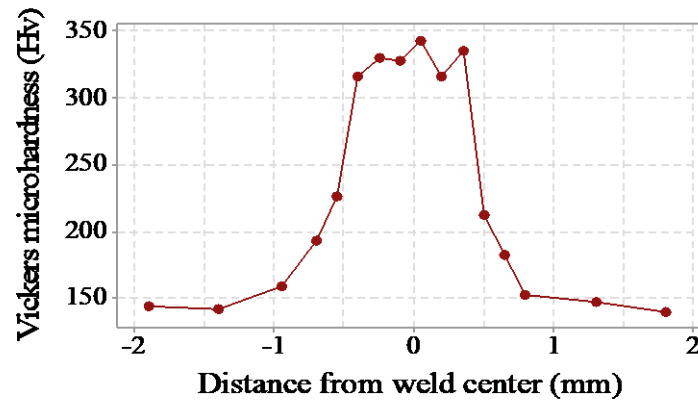


Figure 1.3 : Micro hardness profile of the welded joint

#### 1.2.4.3 Taguchi method

To obtain the effects of each factor on the weld dimensions, ANOVA was carried out based on the measured results as illustrated in **Table 1.4** and **Table 1.5**. The p value is used to determine if the factor has an impact on a given parameter, and the percentage represents the risk of concluding that an influence exists when there is no actual influence. The percentage contribution is the variation caused by an individual factor over the total variation.

Table 1.4 : ANOVA table for BDW

Source	Sum of squares	dof	Mean square	F value	p value Prob > F	Percent contribution
<b>Gap</b>	57537	1	57537	8.07	7%	2%
<b>Thickness</b>	53538	2	26769	3.76	3%	2%
<b>Power</b>	65022	2	32511	4.56	2%	2%
<b>Diameter</b>	237072	2	118536	16.63	0%	13%
<b>Speed</b>	1336393	2	668197	93.74	0%	63%
<b>Error</b>	313653	44	7128	-	-	18%
<b>Total</b>	2313027	53	-	-	-	100%

Any factor whose p-value is under 10% will be considered meaningful. According to the results for the BDW, every factor is found to be meaningful. The gap is the least meaningful factor, with a p-value of 7%. For the DOP, the range of variation in diameter is found to not be an impacting factor, while all the other factors are meaningful. The percentage contribution for the BDW attributes 18% of variation to non-studied factors, with the two main factors being speed (63%) and diameter (13%). The major factors for the DOP are speed (24%) and thickness (39%), while non-studied factors represent 24% of variation.

Table 1.5 : ANOVA table for DOP

Source	Sum of squares	dof	Mean square	F value	p value Prob > F	Percent contribution
<b>Gap</b>	227587	1	227587	3.32	8%	2%
<b>Thickness</b>	4009900	2	2004950	29.26	0%	39%
<b>Power</b>	922458	2	461229	6.73	0%	8%
<b>Diameter</b>	239568	2	119784	1.75	19%	1%
<b>Speed</b>	2522684	2	1261342	18.41	0%	24%
<b>Error</b>	2014932	44	45794	-	-	24%
<b>Total</b>	9937129	53	-	-	-	100%

#### 1.2.4.4 Effects and interactions

Figure 1.4 shows the effects of each of the 5 factors. The direction and steepness of the slope are used to determine the impact. We can see that the use of a gap reduces the width



and increases the penetration. The diameter, contrary to the gap, increases the width and reduces the penetration. Thickness and power have a positive impact on the width and the penetration, while speed has an opposite impact, reducing the penetration and the width. Every line is roughly straight, so the effect of the parameter does not change as it increases. The speed seems to have a stronger effect because it has a wide range of variation. In conclusion, three factors have a similar impact on penetration and width, while two factors have the opposite. The results for power, diameter and speed fit with [53].

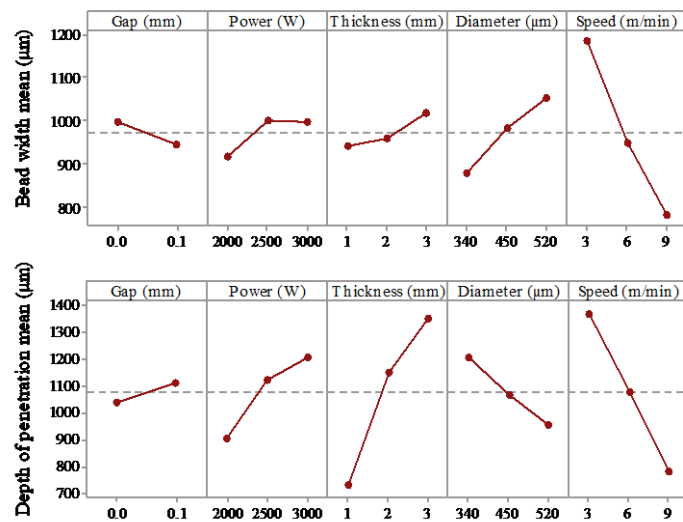


Figure 1.4 : Main effect plot for BDW and DOP

To visualize whether the effect of one factor depends on the level of another factor, we used an interaction plot. Parallel lines in an interaction plot indicate no interaction; otherwise, the greater the difference in slope between the lines, the higher the degree of interaction. Only one significant difference in slope is found for the BDW. As can be seen in **Figure 1.5**, the thickness tends to increase the width without gap, but when using gap, thickness variation has insignificant impact on the bead width. This means that the weld done using a gap would stay thinner for thicknesses greater than 1 mm.

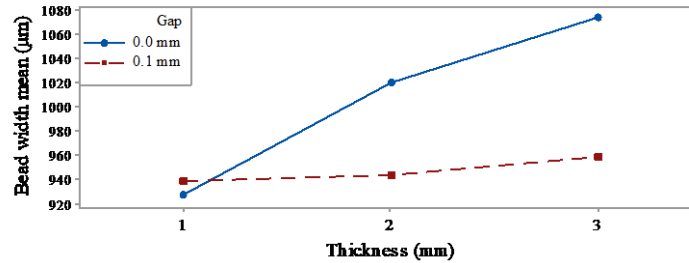


Figure 1.5 : Interaction plot between thickness and gap for BDW

Interaction seems to be found between the thickness and the other factors for the DOP. **Figure 1.6** shows the graph for speed and thickness. The interaction found is that using a greater thickness, with the values of the other factors giving the best penetration, allows a deeper weld, which is a logical interaction. For example, welding a 1 mm thickness sheet at low speed gives a full penetration weld that is about 1 mm, but using a 3 mm sheet gives a 3 mm weld, and when welding at a high speed both thicknesses have the same low penetration. This explains the change in the slope steepness, and is the same for all of the factors.

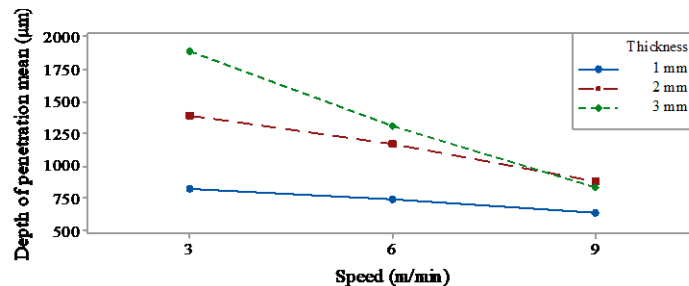


Figure 1.6 : Interaction plot between speed and thickness for DOP

#### 1.2.4.5 Weld shape

The shape of the weld is mainly determined by the welding mode conduction or keyhole. As we can see in Assuncao study [3, 54], there is not a sharp transition between conduction mode and keyhole mode. The mode is dependent on the interaction time and power density. In our experiments, the interaction time varies between 2 ms and 10 ms, and the power density between 0.95 MW/cm<sup>2</sup> and 3.3 MW/cm<sup>2</sup>. Given those values, the experiment's range must be in the transition mode and the keyhole mode. The results give an aspect ratio between 0.5 and 2.2, which fits with these modes.

The weld shape is supposed to be from small and round to thin and deep, which is what we observe. Four weld shapes are considered: (i) round welds are the welds almost in conduction mode (U weld), (ii) wide V welds are the welds in transition mode (HV weld), (iii) sharp V welds are those between transition mode and keyhole mode (V weld), and (iv) parallel edge welds are those with full penetration done in keyhole mode (H weld). **Figure 1.7** gives a picture for each of the four morphologies.

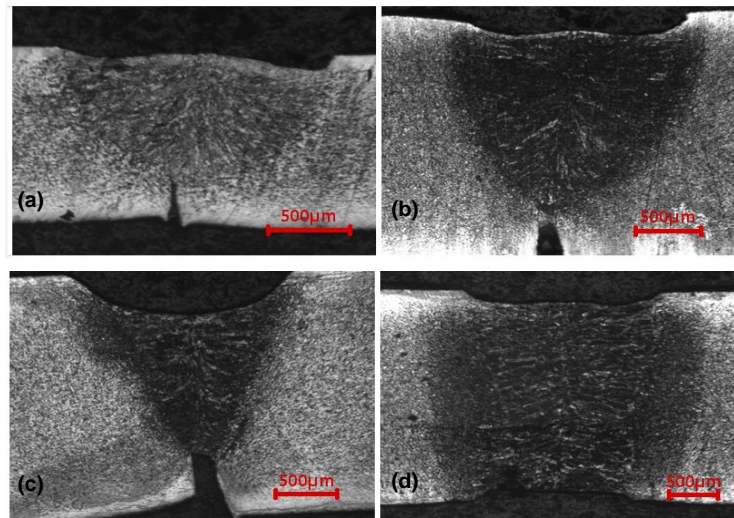


Figure 1.7 : Shape of the weld (a) round shape, (b) wide V shape, (c) sharp V shape, (d) parallel edge

**Figure 1.8** represents the weld shape according to the DOP, the gap and the thickness. We notice that the round and wide V welds are only found in experiments without gap. The shape depends on the penetration of the weld, with the lowest penetration weld being round shaped, then wide V shaped, then sharp V shaped and finally parallel edge with the no-gap experiments. This order can be found for all three thicknesses. The penetration is directly linked to power density and interaction time. The experiments with gap only produce sharp V shaped welds for partial welds, and mainly parallel edge welds for full penetration. However, sometimes there can be a V shaped full penetration weld, which does not appear without gap.

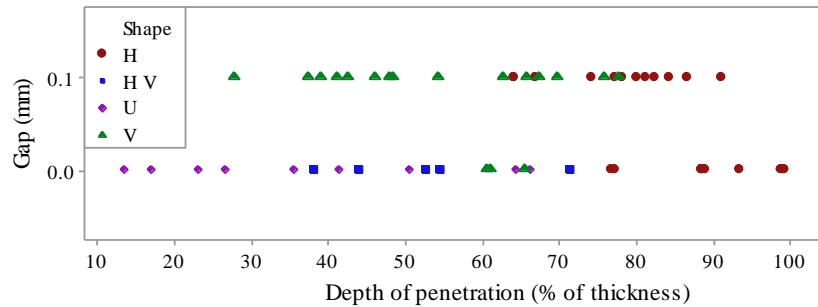


Figure 1.8 : Weld shape according to the DOP and the gap

The use of a gap tends to make only sharp V shaped welds in the case of partial penetration welds. The assumption can be made that the gap allows an easier penetration for the weld because the melted metal can flow into the gap. The deepest penetrations achieved with gap are deeper than penetrations without gap because of this easier penetration. The higher penetrations achieved with gap are shallower than those without gap, because there is more underfilling caused by the gap. We can also remark that all sharp V welds without gap have more than 50% penetration, which is where the burnished zone and the fracture zone begin forming an unintended gap between the pieces.

#### 1.2.4.6 Underfill

The experimental results reveal that tests with gap have more underfill than those with no gap. **Figure 1.9** presents the distribution of the underfill versus the DOP in % of specimens thickness. Excluding the alignment on the right, the figure reveals the presence of an underfill of about 5% for the experiments without gap. The underfill tends to grow slightly after 50% penetration. This is certainly due to the fracture zone. An underfill between 10% and 15% is present when using gap. When looking at the alignment on the right, a trend appears with depth of penetration plus underfill equal 100%. Furthermore, the points on that line were for full penetration welds. Only the underfill on the upper face has been measured. That is why

when underfill exists on the bottom face, the sums are slightly less than 100%. This suggests the question why all the full penetration welds do not have the same underfill.

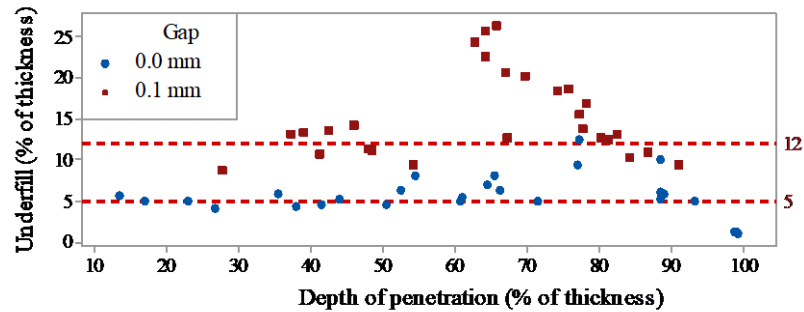


Figure 1.9 : Underfill according to the DOP and the gap

**Figure 1.10** presents the BDW versus the underfill for full penetration weld. This figure shows that the width decrease when the underfill increase. This observation fits with the refillable gap formula:  $g = A \cdot B \cdot \Delta T \cdot w$  proposed in [6], where  $A$  is constant,  $B$  is the coefficient of thermal dilatation,  $\Delta T$  is the temperature differential, and  $w$  is the width. The measurements in the bottom right corner reveal the weld with the least underfill. The use of gap moves this point upward by about 10%, but maintains the same slope, and the underfill is substantially greater for the same width. This means that when using a gap, the underfill is bigger for the same bead width. The largest number of full penetration welds are achieved using 1 mm sheet thickness explains the larger number point in the graph. The underfill also increases slightly with the thickness because of the sheared edge that create more gap with increased thickness. In order to achieve good weld on thicker plate, wider weld have to be done if there's no additional edge preparation.

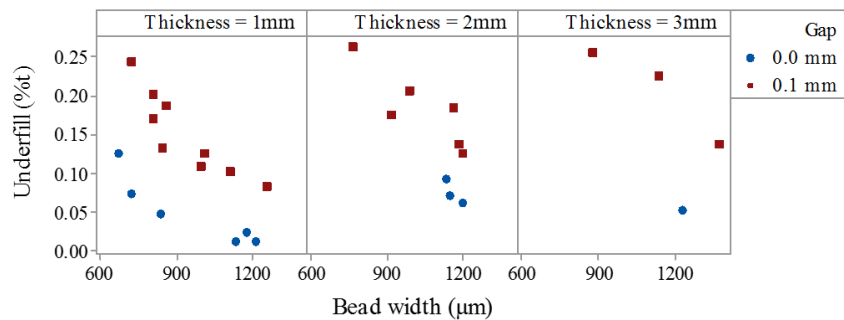


Figure 1.10 : Underfill according to the BDW, the gap and the thickness

### 1.2.5 Conclusion

This paper presents an experimental investigation of laser welding low carbon galvanized steel in butt-joint configurations. The experimental work is focused on bead width, penetration depth, underfill and hardness using various laser welding parameters such as laser power, welding speed, laser fiber diameter, gap between sheets and sheet thickness. There are 54 experimental tests taken all factors known to have an influence on weld quality to conduct a systematic study using Taguchi method. ANOVA analysis and effect plot diagrams are also used to evaluate the effects and the percentage contribution of the laser welding parameters on the characteristics of the weld. The micro hardness measurements show coherent results with an increase in the weld hardness from 150 Hv to 330 Hv. The ANOVA analysis reveals that the welding parameters that have significant effects on the weld quality are laser power, welding speed, laser fiber diameter and sheet thickness. The gap between sheets have a positive effect on the weld dimensions by making the weld thinner and deeper permitting the use of higher speeds for the same penetration. The use of a gap decreases the thickness effect on the bead width and facilitate the formation of V shaped welds. An underfill between 5% and 10% is observed for no-gap experiments and increases by about 10% when using gap. The sheared edges explain several observations on the underfill and the shape of the weld. Finally, the welding parameters that can give the best weld quality for various thickness with or without gap are identified.

## **CHAPITRE 2**

### **PREDICTION DE LA FORME ET DES DIMENSIONS DU CORDON DE SOUDURE DANS LE SOUDAGE LASER – MODELISATION 3D ET VALIDATION EXPERIMENTALE**

#### **2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE**

Cet article se concentre sur la mise en place d'une simulation numérique 3D par éléments finis validée expérimentalement du soudage laser d'acier galvanisé en configuration bout à bout en utilisant le logiciel COMSOL. Le modèle a pour objectif de prédire les dimensions et la forme des cordons de soudures. La simulation se base sur les transformations métallurgiques en utilisant des propriétés du matériau dépendantes de la température et avec la méthode de l'enthalpie. Les deux modes de soudage, par conduction et en trou de serrure, sont étudiés avec des sources de chaleurs surfaciques et volumiques respectivement. La transition entre les deux sources de chaleurs est faite en fonction de la densité de puissance et du temps d'interaction. Les dimensions du cordon de soudure produit par la simulation sont validées grâce à des essais expérimentaux. Les essais de validation sont réalisés avec un laser Nd:YAG d'une puissance maximale de 3kW, en suivant une conception structurée d'après la méthode de Taguchi. La simulation numérique en trois dimensions par éléments finis fait preuve de grande performance dans la prédiction de la forme et des dimensions des cordons de soudures avec une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle. La comparaison des soudures en trou de serrure, par conduction, à pénétration totale et avec un écartement montrent toutes une précision similaire dans les résultats. Les erreurs peuvent provenir des erreurs sur les relevés expérimentaux ainsi que sur les hypothèses du modèle, plus particulièrement sur la mécanique des fluides. Globalement, les résultats montrent que la simulation numérique peut efficacement devenir un modèle précis et cohérent et prédire avec justesse la forme et les dimensions des cordons de soudure sous de nombreuses conditions de soudure.

Ce deuxième article, intitulé «*Prediction of weld joint shape and dimensions in laser welding using a 3D modeling and experimental validation* », fut corédigé par moi-même ainsi que par le professeur Abderrazak El Ouafi. Il fut accepté pour publication dans sa version définitive en 2017 par le *Journal of Materials Science and Applications (MSA)*. En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail fut l'essentiel de la recherche sur l'état de l'art, le développement de la méthode, l'exécution des tests de performance et la rédaction de l'article. Le professeur El Ouafi, second auteur, a fourni l'idée originale. Il a également aidé à la recherche sur l'état de l'art, au développement de la méthode ainsi qu'à la révision de l'article.



## **2.2 PREDICTION OF WELD JOINT SHAPE AND DIMENSIONS IN LASER WELDING USING A 3D MODELING AND EXPERIMENTAL VALIDATION**

### **2.2.1 Abstract**

This paper presents an experimentally validated weld joint shape and dimensions predictive 3D modeling for low carbon galvanized steel in butt-joint configurations. The proposed modelling approach is based on metallurgical transformations using temperature dependent material properties and the enthalpy method. Conduction and keyhole modes welding are investigated using surface and volumetric heat sources, respectively. Transition between the heat sources is carried out according to the power density and interaction time. Simulations are carried out using 3D finite element model on commercial software. The simulation results of the weld shape and dimensions are validated using a structured experimental investigation based on Taguchi method. Experimental validation conducted on a 3 kW Nd:YAG laser source reveals that the modelling approach can provide not only a consistent and accurate prediction of the weld characteristics under variable welding parameters and conditions but also a comprehensive and quantitative analysis of process parameters effects. The results show great concordance between predicted and measured values for the weld joint shape and dimensions.

### **2.2.2 Introduction**

The laser welding process has gained importance in fabrication industries due to its ability to produce precise welds with small heat affected zones [1]. It is a complex process using thermodynamic, fluid flow, phase transition and heat transfer phenomena. Since laser welding experiments are rather long and expensive, finite element simulations are widely used to predict optimal parameters in various industrial applications. Simulation efforts can also be used to understand the process by facilitating the investigation inside of the welding zone. Because of the welding process simulation is difficult to be completed using only one

model, two types of models are considered. The multi-physic based model is used to acquire reliable and accurate predictions of the thermal field and the weld shape. The thermo-mechanical based model is used to evaluate the mechanical stress and strain due to the welding process.

Conduction mode and keyhole mode are the two basic modes for laser welding. Conduction mode is defined by low energy concentration and shallow penetration. Keyhole mode is defined by high energy concentration and deep penetration achieved when the metal vaporizes and forms a deep and narrow vapour cavity. However, there is no sharp transition between the two modes; a transition zone exists and can be defined by a constant aspect ratio. It has been found that the value of the transition zone ratio varies with laser beam diameter and speed [3]. For a model to be able to simulate both modes, the formation of the keyhole has to be simulated, or different heat sources have to be used for conduction and keyhole mode [33]. In this study, two heat sources are used. One for the conduction mode and the other for the transition and the keyhole modes.

The multi-physical aspect of the laser process is the main difficulty in their modelling, as phenomena are coupled and different scales of physics interact [37]. Laser welding models are becoming very sophisticated using a free surface tracking method. A brief literature review of laser welding simulation is outlined here, and more details can be found in the review produced by Mackwood [28]. The first attempts to simulate laser welding were mostly based on Rosenthal's [55] analytical solution of heat conduction equations with a point heat source moving on the surface of a semi-infinite plate. Then, Eagar and Tsai [56] improved Rosenthal's solution using a 2D Gaussian heat source. Later, Goldak was the first to come with a 3D heat source (double ellipsoidal) in finite element simulation, which was well adapted for high penetration laser welding [41]. The most recent simulations for scientific purposes have fluid flow, simulate plasma and vapour, and give precise predictions of the temperature inside the keyhole and its shape [31, 35, 57]. Models used to predict optimal parameters are simpler using methods to minimize the number of parameters and the calculation time. Those kind of models use different heat source distributions, parameters

and methods to account for different phenomena. A 3D finite element simulation with a high density heat source has been performed with ANSYS to predict the temperature field [1]. The heat source is a combination of a 3D conical Gaussian heat source and a surface Gaussian heat source, with the surface heat source representing 25% of the power absorbed and the volumetric heat source 75%. Another study has been conducted looking at the effect of the fluid flow on the melt pool shape [2]. The study investigates the nonlinear material properties and the effects of three laser heat sources.

In butt joint laser welding, the presence of a gap between sheets has an impact on the weld pool. However, gap is hard to add to a simulation without making it very complex. A study has been conducted on the deformation caused by thermally induced stresses that can result in a change of the gap width between the welded parts [58]. These displacements are studied through both experiments and simulations. The numerical simulation only represents the displacements; no gap bridging is done in the simulation. An investigation on gap bridging of pulsed laser welding reveals an advanced finite element model with fluid motion and free surface physics [38]. The effect of many parameters on the ability of gap bridging is examined. The 2D finite element model is able to model the joining of a butt joint and overlap joint with gap. However, no experimental validations have been done on the weld dimensions and underfill.

This paper presents a simple heat transfer model based on a moving heat source on a finite medium. The weld pool shape and dimensions are studied in continuous wave butt joint laser welding. The particularity of this simulation is the addition of the gap as a parameter of the simulation, and the prediction of the underfill for a full penetration weld. Conduction mode and keyhole mode are also covered in this model, using different heat sources according to the power density and interaction time. A 3kW Nd:YAG laser for welding low carbon galvanized steel is used for the experimental investigation.

### 2.2.3 Heat transfer formulation

Heat transfer is the main phenomenon explaining the thermal field in laser welding. The fundamental modes of heat transfer are conduction, convection and radiation. Conduction occurs inside the parts. Convection and radiation occur between the parts and its environment.

#### 2.2.3.1 Heat transfer equation

The law of heat conduction states that the time rate of heat transfer through a material is proportional to the negative gradient in temperature and to the area. As an equation, it can be written as:

$$\varphi = -k\nabla T \quad (1)$$

Where  $k$  is the thermal conductivity,  $\Delta T$  is the temperature gradient and  $\varphi$  is the heat flux.

According to the law of conservation of energy, the internal heat transfer equation is:

$$\rho C_p \dot{T} - \nabla(k\nabla T) = Q(x, y, z) \quad (2)$$

Where  $\rho$  is the mass density,  $C_p$  the specific heat and  $Q(x,y,z)$  a distributed volume heat source.

#### 2.2.3.2 Boundary and initial conditions

In order to solve the differential equations, initial conditions and boundary conditions must be specified. Initial conditions are the ambient temperature and parts temperature. Both are fixed at a temperature  $T_0$  equal to 20°C. Boundary conditions are prescribed, thermal flux coming from radiation and convection. Convection is the thermal exchange resulting from the temperature difference between a body and its environment. The convective heat transfer can be defined by:

$$Q_{conv} = h(T - T_0) \quad (3)$$

Where  $h$  defined as the convective heat transfer coefficient and  $T_0$  the room temperature.

The convective heat transfer coefficient highly depends on the fluid flow around the parts. Since ventilation is used during welding, a forced convection coefficient is used. Radiation occurs in the form of electromagnetic waves. According to the Stefan-Boltzmann law, when a hot object is radiating energy to its cooler surroundings, the radiation heat loss can be expressed as:

$$Q_{ray} = \sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4) \quad (4)$$

Where  $\sigma$  is the Stefan-Boltzmann constant and  $\varepsilon$  the emissivity. These boundary conditions are applied to the model by specifying the value of the heat flux at the outward boundary of the model. The heat transfer modes through the parts are represented in **Figure 2.1**.

### 2.2.3.3 Heat source model

The heat source distribution is an influential parameter in laser welding models. Two kinds of heat source models exist for simulating laser welding: surface heat source and volumetric heat source. The surface heat source model is more accurate for conduction welding since in this mode the energy is applied to the component surface, while the volumetric heat source is more adapted for keyhole welding, with the energy being directed inside the medium through the keyhole [33]. The volumetric heat sources are the most studied distribution for the simulation of laser welding, and many different kinds have been developed over the years [42]. Recent volumetric heat source models are combinations of double ellipsoidal, cylindrical and conical models [40]. A simple efficient model is a 3D conical Gaussian heat source [12]. It is defined by a 2D Gaussian distribution for every height. **Figure 2.2** represents a 3D conical Gaussian heat source. It can be seen that the power density is maximum at the top surface and decreases through the penetration zone. The

energy is distributed throughout the thickness. The most of the energy is absorbed at the top surface, then the received energy decreases with the dimension of the keyhole. That is why volumetric heat sources are necessary to model keyhole mode laser welding. The 3D conical Gaussian heat source can be written as:

$$Q(x, y, z) = \frac{Q_0(1-R_c)A_c}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} - A_c|z|\right)\right) \quad (5)$$

where  $Q_0$  is the power,  $R_c$  is the reflection coefficient,  $A_c$  is the absorption coefficient,  $\sigma_x$  and  $\sigma_y$  are the radius of the heat source along x and y.

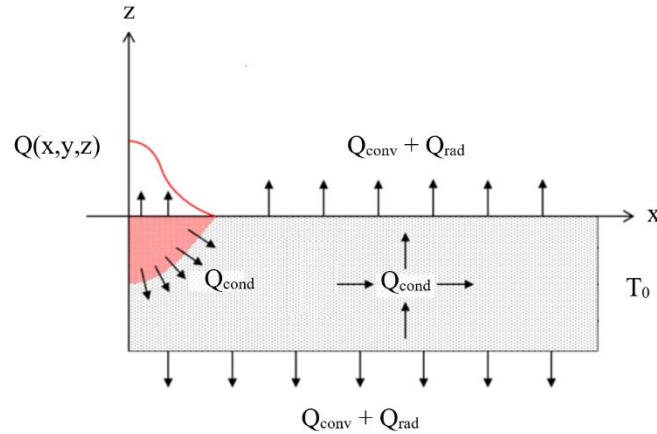


Figure 2.1 Heat transfer condition

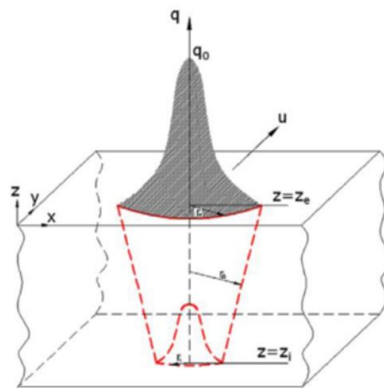


Figure 2.2 Typical 3D conical Gaussian distribution [32]

Complex models exist for the conduction mode, such as an adaptive volumetric heat source [39]. But a 2D Gaussian heat source is a decent compromise between accuracy and simplicity. It is defined by:

$$Q(x, y, z) = \frac{Q_0(1-R_c)}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)\right) \quad (6)$$

### 2.2.4 Model description

The model is based on a moving heat source over a steel plate. The heat transfer equations are used to determine the thermal field using the finite element method. In building the model, the following assumptions were considered: (i) the surfaces of the parts are assumed to be flat permitting perfect contacts, (ii) the areas with temperatures higher than liquidus are considered molten, (iii) the vaporisation of elements is not simulated and laser interaction with vapour plumes is not studied, (iv) the fluid dynamics are not considered, and (v) the temperature field is supposed to be symmetrical in the welding line.

#### 2.2.4.1 Symmetry simplification

Since there is geometrical symmetry along the weld line, only one sheet can be modelled using a symmetry boundary condition if the thermal field is also symmetrical. Three stages are present during the laser heating process: a starting stage at which the initiation of the weld begins with the heat source reaching the parts; a quasi-stationary stage at which the heat source is moving along a straight line and the temperature distribution is stationary; and finally an ending stage when the heat source leaves the parts [19]. Since the heat source is symmetrical and both sheets are supposed to be identical with perfect contact between them, it is assumed that the temperature field reached in the quasi-stationary state has symmetry along the weld direction line. Even though the temperature field might not be symmetrical during the initial and final stages, the assumption is made that the use of

symmetry does not change the quasi-stationary stage reached. This assumption neglects misalignment of the laser and contact inaccuracy between sheets.

#### **2.2.4.2 Phase transition**

During phase transitions, energy is absorbed or released by the body proportionally to its latent heat, with material properties varying according to the new phase. Different methods can be used to develop a finite element model of laser welding that considers phase change [16]. The most accurate way that avoids multi-physical phenomena is to consider temperature-dependent thermo-physical material properties (density, specific heat, and thermal conductivity). With this method, variations of thermal properties due to phase transitions are considered, but the effect of latent heat is neglected. Since latent heat has a significant effect on the melt pool, methods have been created to account for it [21]. With the enthalpy method, the energy absorbed by latent heat is added to the specific heat with modifications calculated from the enthalpy [3]. The use of a non-multi-physical simulation drastically reduces the solving time, but ignores the fluid dynamics of the liquid and vapor phases.

#### **2.2.4.3 Welding mode**

The main difference between conduction mode and keyhole mode is the power density applied to the welding area. The power density is determined by two laser parameters, laser beam diameter and power. Those parameters are inputs of the simulation. A transition mode exists between the two modes, during which the aspect ratio (depth to width ratio) stays nearly constant with increasing power density. The beginning of the transition mode is called the upper limit of conduction mode. The upper limit of conduction mode depends on the interaction time, which is the laser beam diameter divided by the speed [43]. **Figure 2.3** represents the welding mode according to previous experimentation. The upper limit for conduction mode has been found to be  $0.94\text{MW}/\text{cm}^2$  power density for a 9ms interaction time, and  $1.26\text{MW}/\text{cm}^2$  for a 3.4ms interaction time. The limit is supposed to vary linearly



with the interaction time. In the model, the power density and interaction time are calculated and compared to this limit in order to choose the heat source to be used. The conduction heat source is selected below this limit, while the keyhole heat source is selected above it.

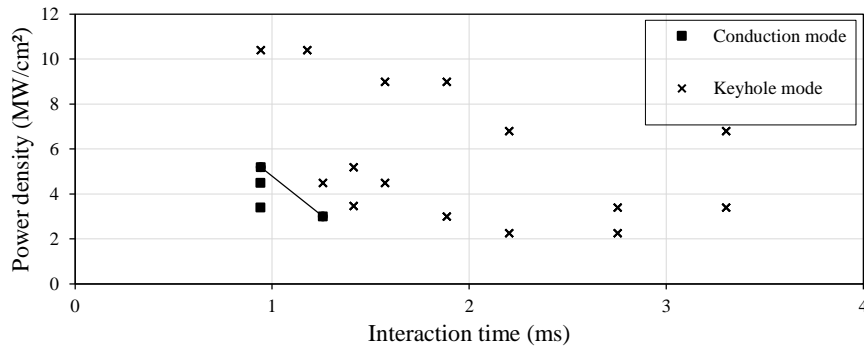


Figure 2.3 Welding mode according to power density and interaction time

#### 2.2.4.4 Gap effects

A purpose of this simulation is to predict the dimensions of a weld with a gap. Since the melted metal (liquid phase) and the fluid flow are not simulated, a gap cannot simply be placed between the sheets in the model. According to a previous analysis of variance conducted through experimentation, gap effects increase the depth and reduce the width, which are opposite of the effects of diameter. Other parameters used in this study increase or decrease both the penetration and the width. To simulate the effect of the gap, a multiplier coefficient  $G$  is added to the laser beam diameter in the heat source formula. A heat source with modified diameter can be written as:

$$Q_{gap}(x, y, z) = \frac{Q_0(1-R_c)A_c}{2\pi\sigma_x\sigma_y G^2} \exp\left(-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2(\sigma_x G)^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2(\sigma_y G)^2} - A_c|z|\right)\right) \quad (7)$$

Since the effect of the gap is the opposite of the diameter, the coefficient has to be less than 1. After some tests, a value of 0.75 has been found to be relevant, which represents a decrease of about 0.1mm in diameter.

### 2.2.4.5 Impact of the underfill

In butt joint laser welding, the two main factors that create a lack of material in the weld are edge straightness and sheet positioning. The main factor that generates an excess of material is the stress created during cooling. For partial penetration welds, the underfill has no direct impact on the dimensions of the weld. The presence of an underfill simply moves the weld deeper into the parts. For full penetration welds, the underfill reduces the depth of the weld, causing it to be less than the thickness. Since the underfill is not evaluated in this simulation, results will always indicate a depth of penetration equal to the thickness of the sheets. Therefore, another method is used to obtain the dimensions of the underfill in order to estimate the correct dimensions of the full penetration weld. It has been seen in a previous study that the underfill is linked to the thickness, the edge straightness, the gap, and the width of the weld for full penetration welds. Using this information, an estimation of the underfill can be made from those parameters. The empirical formula giving the underfill as a percentage of the thickness for a full penetration weld, inspired from the gap bridging formula [5], can be written as:

$$Underfill = (0.05 + g + t * E) + 10 * \exp(-0.0065 * BDW) \quad (8)$$

Where  $g$  is the gap size,  $t$  is the thickness,  $E$  is the edge preparation coefficient (5% is used here), and  $BDW$  is the bead width. Simulated full penetration welds calculate the underfill using this formula. The underfill is then subtracted from the penetration in order to determine the effective penetration.

### 2.2.5 Finite element model

The laser welding simulation can be simplified as a sheet with a laser moving along its length, as represented in **Figure 2.4**. The finite element model is created with the “heat transfer in solid” module of COMSOL Multiphysics 4.4, a software for numerical simulation.

Tetrahedron elements are chosen for the mesh because of their fast, easy meshing and refining. In order to have an accurate temperature field in the region of high temperature gradients, a dense mesh is used close to the weld line, while in the more distant regions a coarser mesh is used, as can be seen in **Figure 2.5**. The thinnest elements are found along the weld line, with a width under  $20\mu\text{m}$  to minimize temperature error and provide good precision. The simulation time is calculated according to the welding speed and the length of the specimen. The time steps are chosen according to the welding speed and the diameter. So that for each new time step, the laser beam diameter covers  $1/3$  of the beam's coverage during the previous time step.

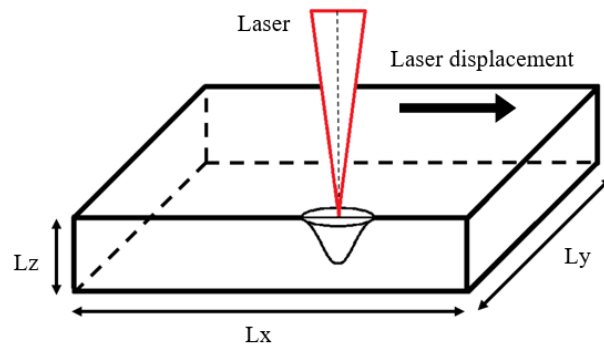


Figure 2.4 Schematic model for laser welding

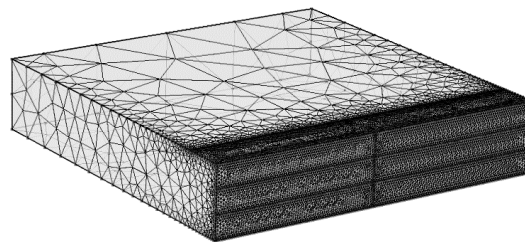


Figure 2.5 Finite element mesh of the weld specimen

Many parameters are required to simulate laser welding: materials and optic properties, laser parameters and parts dimensions [59]. Experimentation used for modelling validation needs the selection of the parameters that have most influence. The used specimens are galvanized steel A635CS cut to  $30\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  using hydraulic shear. The edge did not receive further treatment. Laser power, welding speed, sheet thickness, beam diameter and

gap were the parameters used in this study. These factors were used to generate an experimental design of 54 tests.

### **2.2.5.1 Material properties**

Material properties have a strong influence on heat transfer. Some material properties are taken dependant of the temperature. During laser welding, the temperature varies between 20°C and over 5000°C. Since there is no easy theoretical formula to interpolate properties over such a temperature range, experimental data is the main way to access to those values. But experimentation is expensive and difficult. The temperature dependant properties are often not available for a precise grade. The properties of another grade of steel can provide a good approximation. The used properties are supplied by Abhilash for 904L steel [34], which is a low carbon stainless steel. **Table 2.1** shows the temperature independent properties, which include standard metal properties and two optical properties. The optical properties depend on the material surface and the type of laser. In this study, galvanized steel and an Nd:YAG laser are used [60]. The absorption coefficient represents the power density attenuation per length unit and the reflection coefficient represents the percentage of the reflected laser beam. **Figure 2.6** shows the temperature effects on specific material thermo-physical properties. The increase in specific heat at liquidus temperature is caused by the enthalpy method used to model the heat absorbed by the latent heat of fusion.

### **2.2.5.2 Process parameters**

The process parameters such as power, diameter and speed are easily adjustable. The same process parameters are used for the simulation and for the validation. Each parameters have 3 levels, which can be seen in **Table 2.2**. For the sheet dimensions, three different thicknesses are used according to the experiment. Since measurements are taken in the quasi stationary state, length and width are chosen to reach this state minimizing the size of the solid. The dimensions selected are shown in **Table 2.3**.

Table 2.1 Specifications of the used material

Property	Symbol	Value
Liquidus temperature	$T_{liquidus}$	1727 [K]
Solidus temperature	$T_{solidus}$	1672 [K]
Latent heat of fusion	$L_{fusion}$	$2.72 \cdot 10^5$ [J/kg]
Reflectivity	$R_e$	0.3
Absorption coefficient	$A_c$	800 [1/m]
Emissivity	$\varepsilon$	0.6

Table 2.2 Welding process parameters

Parameters	Symbol	Levels		
Laser beam diameter [mm]	$\sigma_x$	0.34	0.43	0.52
Laser beam power [W]	$Q_0$	2000	2500	3000
Welding speed [m/min]	$v$	3	6	9

Table 2.3 Dimensions of the used parts

Dimension	Symbol	Value
Length	$L_x$	20 [mm]
Width	$L_y$	10 [mm]
Thickness	$L_z$	1-2-3 [mm]

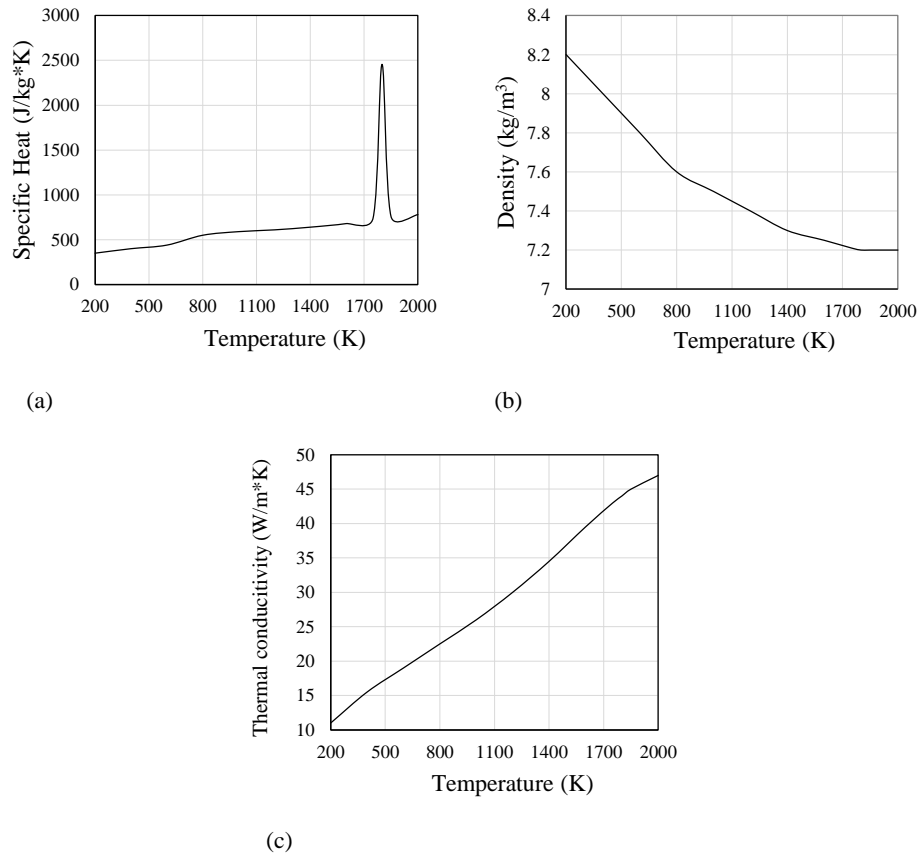


Figure 2.6 Thermo-physical properties of material - Temperature effects on: (a) Specific heat, (b) Density and (c) Thermal conductivity

## 2.2.6 Results and discussion

The values of bead width (BDW) and depth of penetration (DOP) of the weld are measured on the thermal fields using the concept that the limit of the melted pool is the liquidus temperature. Since modifications have been added to the simulation for gap, conduction mode, and full penetration weld, each condition is looked at individually.

### 2.2.6.1 Comparison of predicted and measured weld dimensions

#### Predicted and measured weld dimensions with no gap

The predicted and measured BDW and DOP values for tests without gap are presented in **Table 2.4**. The comparison of the measured and predicted DOP and BDW is graphically illustrated in **Figure 2.7**. The results reveal that the predicted DOP and BDW are in good agreement with the experimental observations with small average errors of 6 and 11% for DOP and BDW, respectively.

#### Predicted and measured weld dimensions with gap

The predicted and measured BDW and DOP values for the gap test are presented in **Table 2.5**. The graphs of predicted and measured DOP and BDW are represented in **Figure 2.8**. The results show an average error of 5% for DOP and 14% for BDW indicating that BDW is more difficult to model than DOP. The DOP prediction is excellent, while the BDW prediction of is slightly less accurate. The method used to model the gap appears effective with no difference in errors with and without gap. The additional error in BDW found for all the tests might therefore come from the keyhole heat source model.

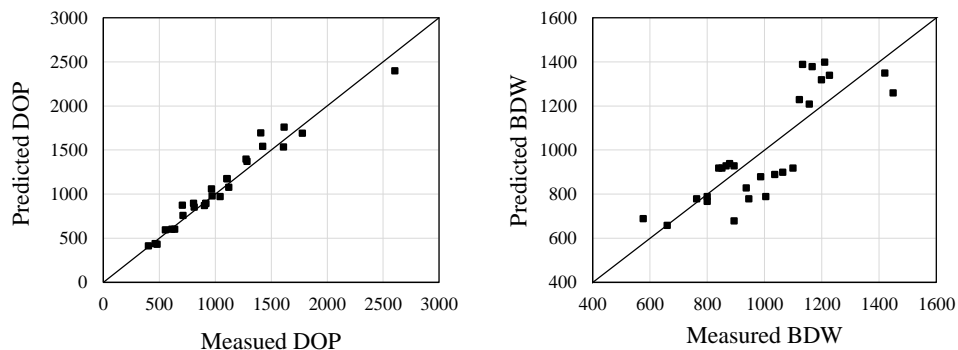


Figure 2.7 Predicted versus measured DOP and DOP (no gap tests)

Table 2.4 Comparison of measured and predicted DOP and BDW (no gap tests)

N°	DOP ( $\mu\text{m}$ )			BDW ( $\mu\text{m}$ )			Conduction mode	Full penetration
	Meas.	Pred.	% Error	Meas.	Pred.	% Error		
1	912	897	-2%	1120	1230	-10%		x
2	1271	1400	9%	1155	1210	5%		
3	1280	1375	7%	1448	1260	13%		
4	608	604	-1%	893	930	-4%	x	
5	634	607	-5%	1034	890	14%	x	
6	552	598	8%	985	880	11%	x	
7	808	855	5%	935	830	11%		x
8	970	983	1%	1003	790	21%		
9	1039	975	-7%	943	780	17%		
10	913	898	-1%	1225	1340	-9%		x
11	1614	1763	8%	1198	1320	-10%		
12	1777	1693	-5%	1419	1350	5%		
13	901	875	-3%	839	920	-10%		x
14	1103	1178	6%	1062	900	15%		
15	1102	1180	7%	1098	920	16%		
16	459	443	-4%	761	780	-2%	x	
17	478	434	-10%	798	790	1%	x	
18	400	418	4%	799	768	4%	x	
19	804	899	9%	1132	1390	-23%		x
20	1405	1697	15%	1165	1380	-18%		x
21	2601	2401	-8%	1208	1400	-16%		
22	703	878	17%	877	940	-7%		x
23	1607	1538	-5%	865	930	-8%		
24	1420	1546	8%	850	920	-8%		
25	709	763	5%	659	660	0%		x
26	1118	1082	-3%	575	690	-20%		
27	964	1061	9%	893	680	24%		



Table 2.5 Comparison of measured and predicted DOP and BDW (gap tests)

N°	DOP ( $\mu\text{m}$ )			BDW ( $\mu\text{m}$ )			Conduction mode	Full penetration
	Meas.	Pred.	% Error	Meas.	Pred.	% Error		
28	810	799	-1%	1256	1460	-16%		x
29	1480	1497	1%	1197	1340	-12%		x
30	2151	2035	-6%	1396	1260	10%		
31	795	765	-3%	1028	870	15%		x
32	1408	1460	4%	1163	1080	7%		
33	1784	1720	-4%	957	920	4%		
34	631	644	1%	825	640	22%		x
35	992	1000	1%	762	580	24%		
36	1105	1200	8%	857	680	21%		
37	761	799	4%	1125	1380	-23%		x
38	1414	1498	4%	1204	1400	-16%		x
39	1969	2000	2%	1138	1360	-19%		
40	711	755	4%	820	830	-1%		x
41	1237	1180	-5%	855	790	8%		
42	1412	1380	-2%	1023	820	20%		
43	702	755	5%	844	830	2%		x
44	1189	1290	8%	740	780	-5%		
45	1275	1420	10%	777	730	6%		
46	725	797	7%	1018	1260	-24%		x
47	1218	1494	14%	1022	1240	-21%		x
48	1951	1850	-5%	879	1040	-18%		
49	734	728	-1%	866	760	12%		x
50	1399	1500	7%	880	880	0%		
51	1673	1650	-1%	1017	800	21%		
52	567	537	-3%	730	560	23%		x
53	928	1020	9%	565	620	-10%		
54	1240	1150	-8%	623	550	12%		

### Conduction mode

Experiment numbers 4, 5, 6, 16, 17 and 18 are in conduction mode in **Table 2.4**. **Figure 2.9** shows predicted versus measured DOP and BDW for conduction mode trials. Slightly better results are found than for the keyhole tests, with an average error of 5% for DOP and

6% for BDW. The use of a conduction heat source turns out to be effective when doing low power density welds. A single heat source cannot be used to generate all the results within a high range of parameters.

### Full penetration weld

Twenty simulations indicated full penetration, with depth equal to the thickness, as shown in **Table 2.4** and **Table 2.5**. For those experiments, underfill has been evaluated and subtracted as explained. This change only impacts the depth. Since the width is used to evaluate the underfill, any error in width translates to error in depth. An average error of 6% for DOP is observed. Results are presented in **Figure 2.10**. This method produces good results for full penetration weld dimensions, for welds with and without gap. It also successfully takes into account the edge preparation to estimate the effective weld dimensions.

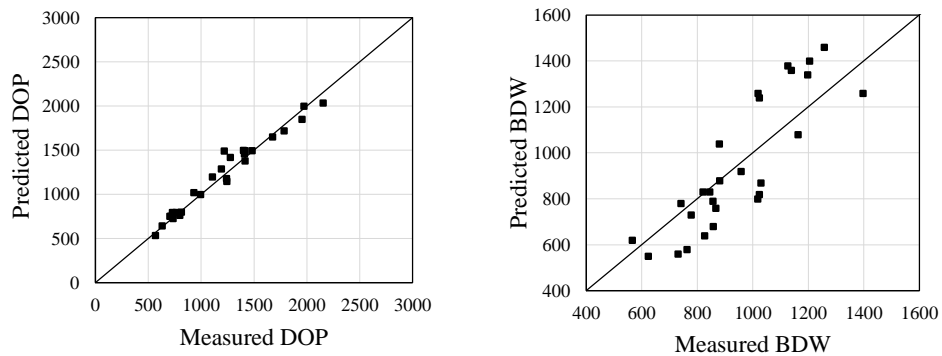


Figure 2.8 Predicted versus measured DOP and BDW (gap tests)

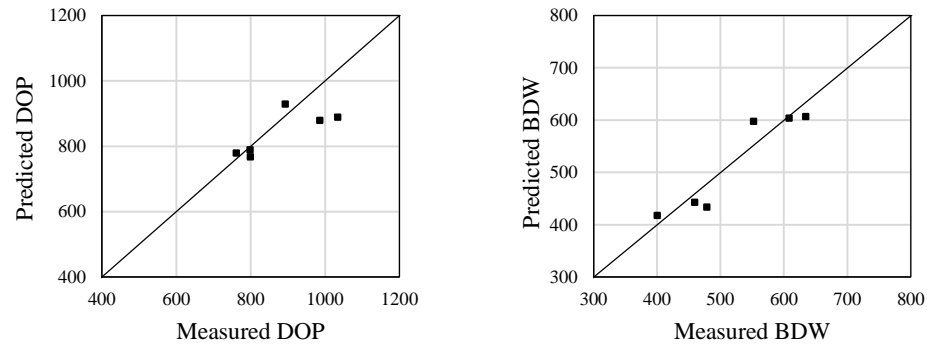


Figure 2.9 Predicted versus measured DOP and BDW (conduction mode)

### 2.2.6.2 Macrograph of the weld

Observation of the weld profile is used to evaluate if the general shape of the weld is in agreement with the experiment. In **Figure 2.11**, the pictures of the experimental welds are on the left, and pictures of the simulated welds are on the right (the weld pool is shown in red). The figure represents macrographs of three welds: (a) a weld without gap in keyhole mode, (b) a weld with gap in keyhole mode, and (c) a weld without gap in conduction mode. Those welds represent the three types of shapes obtained during experimentation. For each shape, the macrograph of the simulated weld is very similar to the one obtained from the experiment. The use of different heat sources enables the approximation of a wide range of weld pool shapes.

**Figure 2.12** presents the shape of the simulated weld for full penetration weld in two configurations, with either the bottom or top edge of the simulated weld lined up with the experimental macrograph. The second configuration fits the shape better. This coincides with the assumption made for partial penetration welds that the underfill only moves the start of the weld deeper into the parts. Using this configuration, the fact that the underfill is not modelled only slightly impacts the weld pool shape.

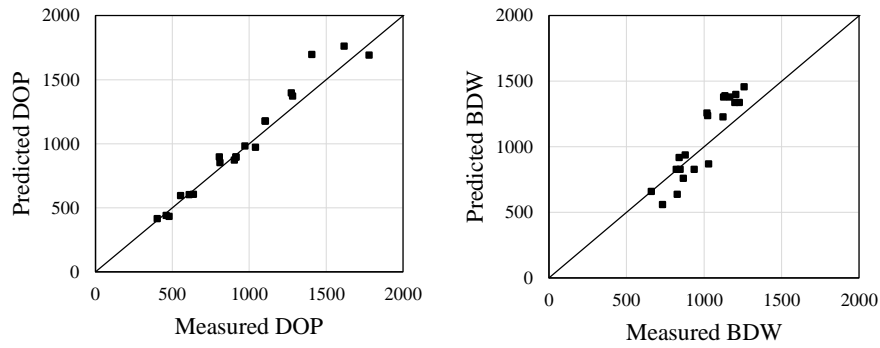


Figure 2.10 Predicted versus measured DOP and DOP (full penetration)

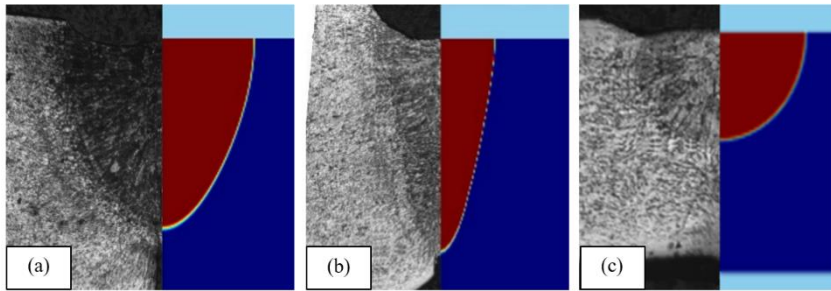


Figure 2.11 Shape of the bead profile from experimentation and simulation (a) Exp n°3, (b) Exp n°33, (c) Exp n°16

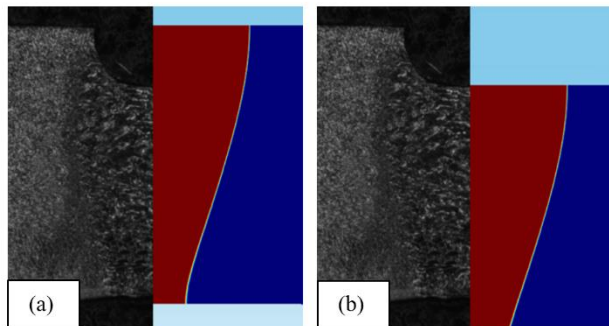


Figure 2.12 Shape of the bead profile from experimentation and simulation Exp n°38 with (a) bottom edge lined up, (b) top edge lined up

### 2.2.7 Conclusion

In this paper, an integrated approach used to build a weld joint shape and dimensions prediction model in laser welding for low carbon galvanized steel in butt-joint configurations is presented. Based on metallurgical transformations using temperature dependent material properties and the enthalpy method, the modelling approach is used to investigate conduction and keyhole modes welding using surface and volumetric heat sources. A commercial 3 kW Nd:Yag laser system, a structured experimental design and confirmed statistical analysis tools are used to evaluate the modelling approach accuracy and to confirm the prediction model accuracy. Numerical simulations carried out through 3D FEM reveal great weld shapes and dimensions concordance between modelling and experimental results. The comparison of predicted and measured weld dimensions reveals similar accuracy for keyhole, conduction, full penetration and for gap welds. The prediction errors may have as sources the experimental errors as well as the adopted assumptions in the model formulation, particularly for the fluid flow in the melt pool. The BDW presents a larger relative prediction error than DOP, probably because of the underfill (deeper experimental than simulation measurements). Globally, the results demonstrate that the numerical simulation can effectively lead to a consistent and accurate model and provide an appropriate prediction of the weld joint shape and dimensions under variable welding parameters and conditions.

### CHAPITRE 3

## RESEAUX DE NEURONES POUR UNE MODELISATION DE LA FORME ET DES DIMENSIONS DU CORDON DE SOUDURE DANS LE SOUDAGE LASER DE L'ACIER GALVANISE EN CONFIGURATION BOUT A BOUT

### 3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE.

Cet article présente une méthode globale et structurée permettant la construction de réseaux de neurones artificiels. La prédiction et l'évaluation de la qualité des soudures réalisées au laser sont des points critiques dans l'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité du procédé de soudage laser. La construction d'un modèle permettant d'estimer précisément et rapidement la qualité des soudures sans essais est une partie essentielle de la recherche. L'objectif de cette étude est la prédiction de la géométrie et de la forme du cordon de soudure dans le cas du soudage laser d'acier galvanisé en configuration bout à bout. La méthode proposée est basée sur une évaluation des paramètres influençant les caractéristiques géométriques de la soudure et la construction étape par étape d'un modèle prédictif de la géométrie de la soudure. La méthode commence par l'analyse, au travers des mesures expérimentales et des résultats de simulations par éléments finis, de la relation entre les paramètres du soudage laser, tels que l'écartement, la vitesse, la puissance, le diamètre du faisceau et la géométrie de la soudure (la profondeur et la largeur). En se basant sur ces résultats et en utilisant divers outils statistiques, différents modèles de prédiction par réseaux de neurones artificiels sont développés et leurs performances sont évaluées. Les résultats obtenus démontrent que les modèles réalisés font preuve d'excellentes performances et peuvent prévoir efficacement la forme et les dimensions des soudures lasers avec une erreur moyenne inférieure à 10%. Ce qui prouve également que la méthode proposée pour la construction de ces modèles prédictifs par réseaux de neurones artificiels permet d'aboutir à des modèles cohérents capables de prévoir de manière précise et fiable la géométrie du cordon de soudure pour une large gamme de paramètres et de conditions des soudures.

Ce troisième article, intitulé «*ANN based predictive modelling of weld shape and dimensions in laser welding of galvanized steel in butt joint configurations* », fut corédigé par moi-même ainsi que par le professeur Abderrazak El Ouafi. Il sera soumis pour publication en 2017 au Journal of Materials Science and Applications (MSA). En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail fut l'essentiel de la recherche sur l'état de l'art, le développement de la méthode, l'exécution des tests de performance et la rédaction de l'article. Le professeur El Ouafi, second auteur, a fourni l'idée originale. Il a également aidé à la recherche sur l'état de l'art, au développement de la méthode ainsi qu'à la rédaction et la révision de l'article.

### **3.2 ANN BASED PREDICTIVE MODELLING OF WELD SHAPE AND DIMENSIONS IN LASER WELDING OF GALVANIZED STEEL IN BUTT JOINT CONFIGURATIONS**

#### **3.2.1 Abstract**

The quality assessment and prediction becomes one of the most critical requirements for improving reliability, efficiency and safety of laser welding. Accurate and efficient model to perform non-destructive quality estimation is an essential part of the assessment. This paper presents a structured and comprehensive approach developed to design an effective artificial neural network based model for prediction and control of weld bead geometry and shape in laser welding of galvanized steel in butt joint configurations. The proposed approach examines laser welding parameters and conditions known to have an influence on geometric characteristics of the welds and builds a weld quality prediction model step by step. The modelling procedure begins by examining, through a structured experimental investigations and exhaustive 3D finite element method simulation efforts, the relationships between laser welding parameters such as laser power, welding speed, fibre diameter and gap, and weld bead geometry (i.e. depth of penetration and bead width), and their sensitivity to the welding process conditions. Using these results and various statistical tools, various prediction models are developed and evaluated. The results demonstrate that the proposed artificial neural network based prediction approach can effectively lead to a consistent model able to accurately and reliably provide an appropriate prediction of weld bead geometry and shape under variable welding parameters and conditions.

#### **3.2.2 Introduction**

Laser welding (LW) is a joining techniques used to join together two or more parts of metals and alloys through the use of a laser beam. Frequently used in high volume, such as in the automotive industry, LW presents great and multiple benefits such as deep penetration, reduced heat affected zone, high welding rates and good precision. The prediction of the weld pool is important to select the appropriate process parameters. Experiments can be used to



study parameters effect, but it is a time consuming and cost expensive method. It is for this reason that many conducted studies used finite element method (FEM) models to predict the weld pool and to develop a better understanding of the process behaviour by offering the possibility to reveal what is happening inside the part. The multi-physical aspect of laser process is the main difficulty, as many phenomena are coupled and different scales of physics interact [37]. However, LW models become very sophisticated with a lot of phenomena to be considered. This inevitably requires increasing and exorbitant computational times [45]. The most recent simulation models with fluid flow, plasma and vapour simulated have produced a good prediction of the keyhole shape [31, 35, 57]. Nevertheless, despite the fact that LW process becomes more comprehensible with a lot of studies on related phenomena, it remains many phenomena to be studied and uncertainties to be overcome.

The use of artificial neural network (ANN) in modelling LW has been the issue of several studies. Sathiya et al. developed a model based on the ANN to predict weld geometry and tensile strength of the laser welded butt joints of AISI 904L [61]. ANN was used for the establishment of the relationship between power, speed, and focal position as welding parameters, and the weld geometry with three different shielding gases (argon, helium and nitrogen). The proposed model was used for the optimization of the process parameters with genetic algorithm. The modelling results indicated that the model was in good agreement with the experimental results. Olabi used an ANN to predict penetration depth, fused zone width and heat affected zone width for welding medium carbon steel with CO<sub>2</sub> laser [62]. In this study, the ANN is used to provide additional data to complete an L<sub>9</sub> Taguchi design with laser power, speed and focus position as parameters. Then the ANN model is used to simulate the optimal solution established with the Taguchi method. Despite, the proposed network is trained with only 14 data, the predictions are still in good agreements with targeted results. Iskander et al. studied the use of ANN to predict depth and width of weld pool for pulsed Nd:YAG LW of aluminium [45]. Welding speed, welding power, laser pulse energy and laser pulse duration are considered as process parameters. An estimation procedure has also been developed to convert the dimensions of the weld pool into a weld profile based on the actual experimental weld profile. In other studies, the capacity and the adaptability of the ANN

based prediction models were evaluated in conduction mode welds and on keyhole mode welds [46]. However, the reliability of ANN was relatively limited. ANN model can accurately predict significantly change in weld pool profiles like between conduction mode and keyhole mode only if trained with good and appropriate data sets. In his work, Jeng used an ANN with learning vector quantization to try to predict laser power and welding speed according to the thickness and the gap [23]. The results demonstrate that the developed model predict successfully the desired welding parameters giving the intended thickness and gap. The model also provide the weld quality by estimating the width, undercut and distortion. Chang applied a combined model of FEM and neural network to predict the weld bead shape with gap for overlap Nd:YAG LW of 304 stainless steel [48]. The FEM model is used to determine the bead dimensions of the part without gap and used them as inputs in the ANN to predict the bead dimensions with gap. Three different process parameters combinations are considered as inputs for the ANN in order to select the appropriate variables configuration. The type 1 use all the parameters as inputs (focal length, energy, pulse time, sheet thickness, gap size, penetration depth and nugget size without gap), the type 2 use 4 inputs and the type 3 use only 3 inputs among the 4 of type 2. The learning is made with 100 experimental data. The results provide less than 10 % error and show that the mixture of FEM and ANN can be used to predict welds shape accurately. The type 2 and type 3 models achieved slightly better results showing that more parameters is not always the best option. There are no other relevant studies evaluating the impact of each welding parameters on the accuracy and robustness of ANN based predictive modelling.

Thus, when prediction model is needed, ANN allows fast results and therefore offers many advantages especially in the case of computationally intensive predictions and real-time applications where FEM based models are very slow and not adapted [27]. ANN models have been used with success to model many welding process including LW [27]. But the application of ANN for laser process is relatively limited. Producing an accurate ANN model requires very large data to ensure an efficient ANN learning and validation processes [47]. The generation of the needed data using experiment is rather long and expensive. So when

experimentally validated, a 3D FEM based simulation models can be used to generate acceptable and cost effective ANN learning data.

The objective of this paper is to present a structured and comprehensive approach developed to design an effective ANN based model for predicting weld shape and dimensions (WSD) in LW of galvanized steel in butt joint configurations using a 3 kW Nd:YAG LW system. The proposed approach examines LW parameters and conditions known to have an influence on geometric characteristics of the welds and builds a quality prediction model step by step. The modelling procedure is based on a structured experimental investigations and exhaustive 3D FEM simulation efforts in order to identify the possible relationships between LW parameters (laser power, welding speed, fibre diameter and gap) and the weld geometrical characteristics such as depth of penetration (*DOP*) and bead width (*BDW*), and the sensitivity of these relationships to the welding process conditions. Using experimental, 3D simulation and various statistical analysis results, several prediction models are developed and evaluated. In order to carry out the models building procedure, an efficient modelling planning method combining neural networks, a multi-criteria assessment and various statistical analysis tools are adopted.

### **3.2.3 Proposed modelling strategy**

Welding operations are dynamic processes with various nonlinearities and stochastic disturbances. The difficulty of building an effective prediction model lies in the selection of the appropriate modelling technique and the variables to be included in the model. These choices represent the basic and crucial ingredients of any modelling methodology. Selecting the model form and the modelling technique is not sufficient to produce the best model. Since deterministic models are typically valid only for a limited range of welding conditions, ANN present the best modelling alternative. While various neural techniques can be used in this approach, a multilayer network appears to be one of the most appropriate option for this type of application [63, 64]. In order to determine efficiently and economically the best combination of variables to be included in the model, a structured design of experiment is

used as a base for the modelling procedure. The selection of the best combination of variables is centered on comparing a complete model containing all variables and various models with a reduced number of variables. This process can be achieved by: (i) building a sufficient number of models, where each is designed with a subset of specifically selected variables, (ii) evaluating the modeling and prediction performance of these models according to specific criteria, and finally, (iii) estimating the effect of each modeling variable on the performance of the designed models in terms of variable contributions in reducing the modelling, validation and prediction errors by using appropriate statistical tools.

Many criteria can be used to assess whether a reduced model adequately represents the relationship between WSD and the LW parameters under various welding conditions. Measuring the performance of fitted models is based on the principle of reducing several statistical criteria. These include the residual sum of squared errors ( $SSE$ ), the residual mean square error ( $MSE$ ), the total squared error (*Mallow's*  $C_p$ ), and the coefficient of determination ( $R^2$ ). For the majority of modelling techniques, the model is determined by minimizing the residual sum of squares ( $SSE$ ). All of the criteria,  $MSE$ ,  $C_p$ , and  $R^2$  are a linear function of the  $SSE$ . The combination of variables that minimizes the  $SSE$  creates  $MSE$  and  $C_p$  as the minimum and  $R^2$  as the maximum under a fixed number of variables. Among these criteria,  $R^2$  does not have an extreme value and shows a gradual increasing trend when the number of variables in the model is increased. Thus, the use of  $R^2$  as a criterion for the selection of variables can allow some subjectivity. If  $p$  variables among  $q$  variables are selected, the residual mean square is  $MSE_p = SSE_p / (n-p-1)$ , where  $n$  is the total number of observations. The terms  $SSE_p$  and  $n-p$  both decrease with an increase in the number of independent variables  $p$ . Therefore,  $MSE_p$  have the ability to show an extreme value. In this study, the used criteria to evaluate the models performance consists in minimizing the training residual mean square error ( $MSE_t$ ) and the validation residual mean square error ( $MSE_v$ ) as well as the total residual mean square error ( $MSE_{tot}$ ) for each WSD attributes.

In order to extract rapidly a cost-effective and optimized combination of variables to be included in the WSD prediction model, an efficient experimental design method is used.

Using full factorial design, an appropriate model can be designed by selecting the most sensitive group of variables that show high correlation with WSD. The model building procedure can be summarized in the following steps: (i) Collect data to train and verify the models. All parameters and conditions that may influence the process must be identified and considered; (ii) Select the modeling technique and the performance criteria; (iii) Select the appropriate matrix design for the required number of models. Rows of the matrix correspond to models and columns represent the variables to be included in each model. Every entry in the matrix is a value of 1 or 0 indicating whether the variable is included or not in the model; (iv) Train and test the generated models and evaluate their performances according to the selected criteria; (v) Determine the effect of each variable on every performance index. These effects can be considered as rates of reduction of *MSE* values when a variable is input to the fitted model or not. Using these results, variables that contribute significantly to the models improvement according to the errors reduction are selected otherwise they are rejected; (vi) Determine the final model configuration. When the variables providing the best information on the WSD are determined, the prediction models can be built.

### 3.2.3.1 Artificial neural network modeling

While various ANN models can be used in this approach, a multilayer feed-forward neural network seems to be one of the most appropriate choices because of its simplicity and flexibility. As shown in **Figure 3.1**, a neural network consists of  $N$  neurons, which are each connected to the neurons of the adjacent layers. A threshold value  $\theta_{j,l}$  is associated with each neuron. The output of each neuron is determined by the level of the input signal in relation to the threshold value. These signals are modified by the connection weights  $W_{i,j,c}$  (also called synaptic strengths) between the neurons.

Let  $I_{j,l}$  be the input to the  $j^{th}$  neuron on layer  $l$ , then the output of this neuron is given by:

$$O_{j,l} = \frac{1}{1 + \exp(-I_{j,l} + \theta_{j,l})} \quad (8)$$

Where,

$$I_{j,l} = \sum_{i=1}^{n_{l-1}} W_{i,j,l} O_{i,l-1} \quad (9)$$

Where  $O_{i,l-1}$  is the output of the  $i^{th}$  processing neuron of layer  $l-1$ ,  $n_{l-1}$  is the number of neurons on layer  $l-1$ , and  $W_{i,j,l}$  is the weight of the connection between neuron  $i$  on layer  $l-1$  and neuron  $j$  on layer  $l$ .

The ANN structure shown in **Figure 3.1** provides a typical and useful example to illustrate the mechanism of the supervised learning process. In response to a pattern presented to the input layer, the ANN attempts to produce an associated pattern by its output layer. The hidden layers are employed to reject noises that are present in the input signals, so that the task of feature extraction can be performed effectively. The exemplar values input in the network are linearly mapped between 0 and 1 range. The network outputs will allow values between 0 and 1 which can be mapped back to full range.

So far as the training of the multilayer feed-forward neural network is concerned, the algorithm most widely used is known as error back-propagation. The ANN training by back propagation involves three stages: the feed forward of input training pattern, the calculation and back propagation of the associated error, and the adjustments of the weights. After training, application of the net involves only the computations of the feed forward phase. The performance of the network is determined by the mean squared error. Lower *MSE* corresponds to better learnability and predictability. In this study, the Levenberg-Marquardt algorithm is used as a training function for the back propagation. This method involves an iterative improvement to weight values in order to minimize the *MSE* of the training data. The Levenberg-Marquardt algorithm is presented as a combination of two minimization methods: the gradient descent method and the Gauss-Newton method. This algorithm method acts more like a gradient-descent method when the parameters are far from their optimal value, and acts more like the Gauss-Newton method when the parameters are close to their optimal value.

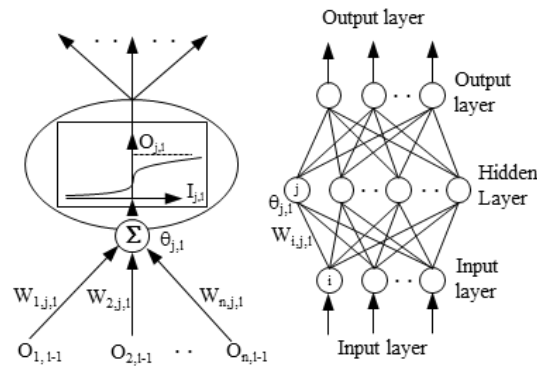


Figure 3.1 Simple computational elements of the multilayer feed-forward neural network

### 3.2.3.2 Training and validation data

In any empirical modelling method, the quality of the resulting model depends mainly on the quality, the abundance and the richness of data used in the modelling process. The best data are generally those obtained by experimentation and reflecting as much as possible the real attributes of the physical phenomenon to be modeled. However, in many cases, experimentations can require prohibitive efforts and excessive costs. The use of a mixture of data from 3D modelling, 3D simulation and experimentations can be considered as economical and reliable alternative. In the proposed approach, the used data is a mixture provided by experimentation and 3D simulation. The used welding process 3D modelling is based on heat transfer equations and metallurgical transformations using temperature dependent material properties and the enthalpy method to investigate the conduction and key-hole modes using surface and volumetric heat sources, respectively. Transition between the heat sources is carried out according to the power density and interaction time. The simulations are carried out using 3D finite element model implemented on commercial software. Experimental validation performed using low carbon galvanized steel in butt-joint configurations on a 3 kW Nd:YAG laser source reveals that the 3D modelling approach can provide not only a consistent and accurate estimation of the weld characteristics under variable welding parameters and conditions but also a comprehensive and quantitative analysis of process parameters effects.

Beside the exhaustive simulations, intensive experiments are conducted to generate the necessary data for 3D model validation and for providing the required data for the predictive modelling. LW experiments are conducted using orthogonal arrays model, developed by Taguchi, leading to an efficient, cost-effective and robust fractional factorial design of experiments that can collect all of the statistically significant data with the minimum possible number of repetitions [65]. An L54 is selected to fit the problem using laser power, welding speed, fibre diameter, gap, and sheet thickness as experimental factors. A portion of experimental data is used for the 3D model validation. The results shown good agreements between the model estimations and the measurements. With an average errors of 6% for *DOP* and 10% *BDW*, the quality of the estimation is excellent, suggesting a good confidence level in the quality of the produced data. The 3D model can therefore be used to generate additional data in order to enrich the experimental data for the ANN learning and validation process.

Data for ANN learning and validation are produced in two stages. In the first stage, a set of 90 tests is produced by simulation using a full factorial design to obtain the input data for training the ANN. In the second stage, an additional set of 32 tests is produced to obtain the input data for evaluating and confirming the capacity of the resulting ANN models. Among these 32 tests, 18 tests come from the experimental data, the other tests come from simulation data. Data sets for validation are chosen so as to be different from training data and to be within the range of the learning design. Factor and levels used in both first and second stage are summarized in **Table 3.1**.

Table 3.1 Factors and levels for training and validation data

<b>Modelling variables</b>	<b>Levels for training</b>					<b>Levels for validation</b>			
<b>Speed (mm/min)</b>	3	4.5	6	7	9	3.75	5.25	6.75	7.25
<b>Power (kW)</b>	2	2.5	3	-	-	2.25	2.75	-	-
<b>Diameter (mm)</b>	0.34	0.43	0.52	-	-	0.385	0.475	-	-
<b>Gap (mm)</b>	0	0.10	-	-	-	0	0.10	-	-



### 3.2.4 Application of the proposed strategy

To appropriately exploit the benefits offered by LW, it is necessary to develop a comprehensive strategy to control the process variables in order to produce desired WSD without being forced to use the traditional and fastidious trial and error procedures. The development of a strategy to predict the WSD is indispensable. The success of building an effective prediction model is based on the careful choice of the appropriate modelling technique and the variables to be included in the model.

To illustrate the proposed modelling approach, laser power, welding speed, fibre diameter and gap are considered as variables and potential candidate to be included in the model to predict depth of penetration and bead width of the weld. Before training the ANN models and executing the variables selection procedure, it is important to establish the size of the hidden layer and to optimize the training performances especially as the number of variables varies from one model to another. The idea is to approximate the relationship between the size of the hidden layer, the number of input variables and the complexity of the output to be estimated. For all trained models, an average error of less than 1% is used, irrespective of the hidden layer size. Consequently, to avoid long training and overfitting that could affect the models accuracy, the  $[(i)x(2i+1)x(o)]$  network structure is selected where  $(i)$  and  $(o)$  are the number of inputs and outputs, respectively. On the other hand, the starting weights have an influence on the optimal configuration found by the ANN. Multiple random starting weights are used to avoid getting stuck in a local minimum. The selection of the best three among ten networks with random sets of starting weights and then the average performances of the three is used for further analysis in this study.

The procedure used for designing the required models is illustrated in **Table 3.2**. The (1) and (0) numbers indicate whether the variables are used as input to the model or not, respectively. A total of 16 networks with different inputs combination are to be designed following the full factorial design. The data structure used to produce the designed models is

showed in **Table 3.3**. Typical results representing the performances of the designed models as a function of the seven selection criteria are presented in **Table 3.4**.

Table 3.2 Design of experiments

<b>Models</b>	<b>Gap</b>	<b>Speed</b>	<b>Power</b>	<b>Diameter</b>
<b>1</b>	1	1	1	1
<b>2</b>	1	1	1	0
<b>3</b>	1	1	0	1
<b>4</b>	1	0	1	1
<b>5</b>	0	1	1	1
<b>6</b>	1	1	0	0
<b>7</b>	1	0	1	0
<b>8</b>	0	1	1	0
<b>9</b>	1	0	0	1
<b>10</b>	0	1	0	1
<b>11</b>	0	0	1	1
<b>12</b>	0	0	0	1
<b>13</b>	0	0	1	0
<b>14</b>	0	1	0	0
<b>15</b>	1	0	0	0
<b>16</b>	0	0	0	0

Two statistical indices, derived from analysis of variance (ANOVA), are used to analyze the performance of the models: the percent (%) contributions and the average effects of variables included in each model. The % contribution of a variable reflects the portion of the observed total variation attributed to this variable. Ideally, the total % contribution of all considered variables must add up to 100. The difference from 100 represents the contribution of some other uncontrolled modeling variables and experimental errors. The graph of average effects is an interesting way to visualize and estimate approximately the effects of each variable on the modeling performances. As the modeling procedure is designed using a full factorial design, the estimates of the average effects will not be influenced. Both statistical indices are applied to all modeling performance criteria.

Table 3.3 Typical training and testing data randomised sets for prediction model building.

Test #	Gap	Speed	Power	Diameter	Training sets	
					DOP ( $\mu\text{m}$ )	BDW ( $\mu\text{m}$ )
1	0	3	3000	0.52	1820	1460
2	0	7.5	2500	0.52	930	840
3	0.1	9	2000	0.52	990	750
...			...		...	...
...			...		...	...
...			...		...	...
...			...		...	...
...			...		...	...
89	0.1	7.5	3000	0.43	1620	760
90	0	6	2000	0.52	552	985

Test #	Gap	Speed	Power	Diameter	Validation sets	
					DOP ( $\mu\text{m}$ )	BDW ( $\mu\text{m}$ )
1	0	8.25	2750	0.385	1000	800
2	0.1	3.75	2750	0.385	1960	1150
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	v
31	1	8.25	2750	0.475	1580	660
32	0.0	6.75	2750	0.475	1340	850

Table 3.4 Typical modelling performances using MSE values.

Models					DOP			BDW		
	Gap	Speed	Power	Diameter	MSE <sub>t</sub>	MSE <sub>v</sub>	MSE <sub>tot</sub>	MSE <sub>t</sub>	MSE <sub>v</sub>	MSE <sub>tot</sub>
1	1	1	1	1	0.001	0.013	0.014	0.012	0.034	0.046
2	1	1	1	0	0.021	0.011	0.032	0.038	0.034	0.072
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
16	0	0	0	0	0.158	0.096	0.254	0.215	0.133	0.348

The modeling design reveals that a relatively accurate prediction models for *DOP* and *BDW* can be achieved using the selected ANN model architecture and shows that all models

fitted the training and validation data relatively well as quantified by the mean square error values. For the sake of comparison, all the  $MSE$  values were calculated using normalized data. The results indicate that the  $DOP$  prediction errors are lower than on the  $BDW$  for all models. Remarkable results are achieved using model with gap, speed and power as inputs. Its performance is comparable to the model including the four variable. With only two inputs, the model with gap and speed produce good results. It is also possible to observe that with a power between 2 and 3 kW and diameter between 0.34  $\mu\text{m}$  and 0.52  $\mu\text{m}$ , the  $DOP$  and  $BDW$  estimations can be achieved with an average error less than 4%.

Using the modelling results, the average effects of each variable on the models performance are evaluated. Derived from ANOVA, **Figure 3.2** shows the effects of the four variables on the training and validation  $MSE$  for  $DOP$ . These graphs demonstrate that tree variables have positive effects on the designed models. The most influential factor is the speed, followed by the gap then the power and finally the diameter. Also, no interaction has been found for the  $DOP$ . The effect of diameter is negligible since it increases  $MSE_v$  and at the same time decreases  $MSE_t$ .

These results are confirmed by the average effect of each variable in terms of percent contribution to improving model accuracy. **Table 3.5** reveals that the variable significantly reducing  $MSE$  values is the welding speed with about 75% contribution. Gap and power contribute by about 14 and 9%, respectively. The results show that the error contributions remain relatively low (under 1%). This implies that no important variable are omitted in the procedure. These results suggest that there are many options to consider in building an efficient prediction model for  $DOP$ . The contribution of power in decreasing  $MSE_v$  is relatively low (about 2%). However, given the relationships that link power and speed added to the strong correlation between energy concentration and WSD, it is obviously required to consider power and speed in the proposed prediction model.

**Figure 3.3** presents the effects of the four variables on the training and validation  $MSE$  values for  $BDW$ . These graphs shows that the effects of gap and power are less significant for  $BDW$  than it was for  $DOP$ . The welding speed is the most impacting factor for  $BDW$ . The

gap and diameter have negative effects on  $MSE_v$ , but these effects remain small and insignificant.

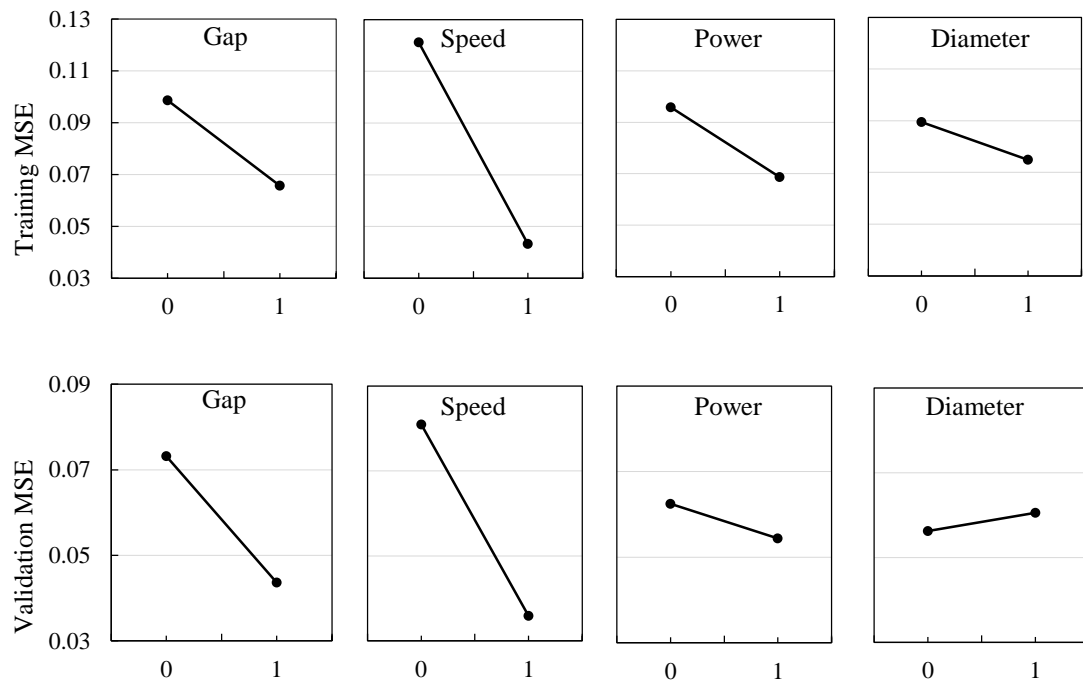


Figure 3.2 Effects of welding parameters on MSE variations in modelling DOP for training and validation data

Table 3.5 % contributions of modelling variables in the performance of the designed models for DOP

Source	$MSE_t$		$MSE_v$		$MSE_{tot}$	
	% C	F-test	% C	F-test	% C	F-test
<b>Gap</b>	13.58%	976.85	29.00%	214.12	19.37%	592.16
<b>Speed</b>	74.95%	5392.76	66.92%	494.16	74.12%	2265.99
<b>Power</b>	8.80%	632.95	1.85%	13.65	5.72%	174.75
<b>Diameter</b>	2.52%	181.13	0.74%	5.48	0.44%	13.47
<b>Error</b>	0.15%		1.49%		0.36%	
<b>Total</b>	100%		100%		100%	

These results are confirmed by the average effect in terms of percent contribution reported in **Table 3.6**. The welding speed is the most dominate contributor in reducing the *MSE* values with about 95%. Together, Gap, power and speed contribute for less than 5%. Here again, the error contribution remain relatively low (does not exceed 1%) indicating that no important variable are omitted in the modelling procedure. Regarding *MSE<sub>tot</sub>*, the contributions of power and diameter are negligible. Speed and gap can be considered as relevant variables for the *BDW* prediction model.

Table 3.6 % contributions of modelling variables in the performance of the designed models for *BDW*

Criteres	MSE <sub>t</sub>		MSE <sub>v</sub>		MSE <sub>tot</sub>	
	%C	F-test	%C	F-test	%C	F-test
<b>Gap</b>	2.25%	230.14	0.50%	11.65	1.43%	196.5
<b>Speed</b>	94.87%	9718.41	98.91%	2312.87	97.69%	13457.13
<b>Power</b>	0.76%	78.19	0.08%	1.95	0.18%	24.15
<b>Diameter</b>	2.01%	206.4	0.03%	0.78	0.63%	86.88
<b>Error</b>	0.11%		0.47%	0.47%	0.08%	
<b>Total</b>	100.00%		100.00%	100.00%	100.00%	

**Figure 3.4** represents interactions found between power, diameter and gap for validation data when modelling *BDW*. The presence of power or diameter reduce the positive effect of the gap and the presence of diameter reduce the positive effect of power. All the interactions of the diameter remain below 0.003, the interaction between gap and power is more significant.

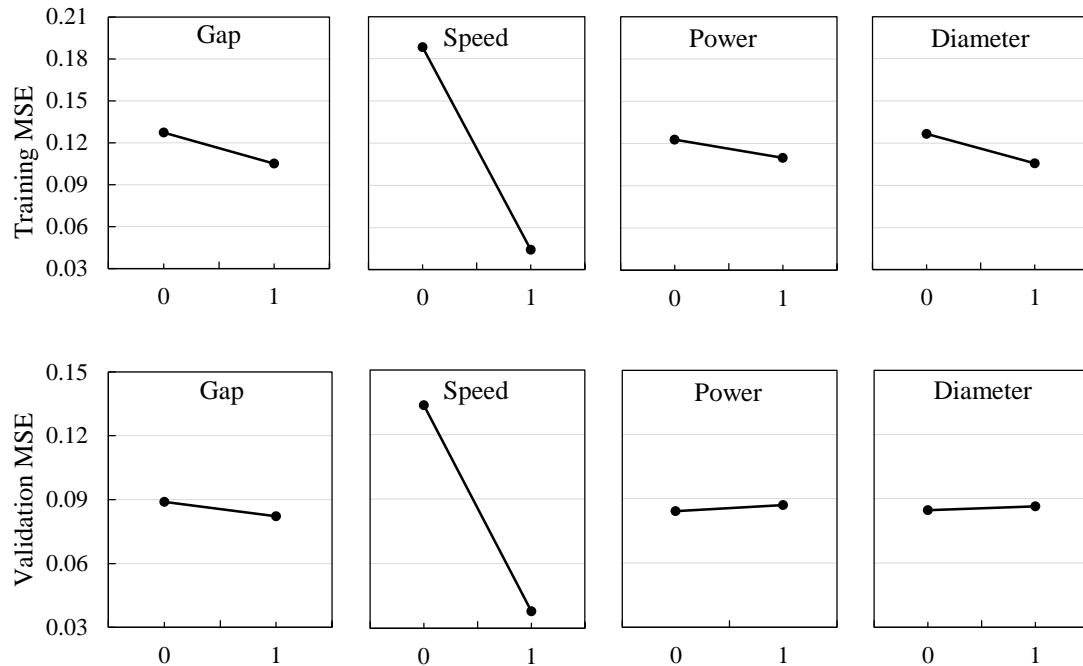


Figure 3.3 Effects of welding parameters on MSE variations in modelling BDW for training and validation data

Assuming 5, 2 and 1% as limit levels for the % contribution coefficients of various variables regarding  $MSE_t$ ,  $MSE_v$  and  $MSE_{tot}$  suggest three various configurations for *DOP* and *BDW* prediction models as presented in **Table 3.7**. These models are achieved by setting the variables at levels that minimizes the *MSE* values. **Figure 3.5 and 3.6** present training and validation results for the selected models.

Table 3.7 Variables selection for predictive modelling of DOP and BDW

Variables	DOP			BDW		
	M <sub>DOP1</sub>	M <sub>DOP2</sub>	M <sub>DOP3</sub>	M <sub>BDW1</sub>	M <sub>BDW2</sub>	M <sub>BDW3</sub>
<b>Gap</b>	√	√	√	√	√	√
<b>Speed</b>	√	√	√	√	√	√
<b>Power</b>	√	√	-	√	-	-
<b>Diameter</b>	√	-	-	√	√	-

**Figure 3.5** shows that the validation and training data are relatively well distributed for the three *DOP* prediction modes.  $M_{DOP1}$  present the best results as expected.  $M_{DOP2}$  show nearly the same performance for training and validation data but less accurate than  $M_{DOP1}$ . The use of only three variables affect slightly the training performance. The prediction error on  $M_{DOP3}$  is comparatively higher for both validation and training than the two other models.  $M_{DOP1}$  is the best model but  $M_{DOP2}$  is clearly a good compromise between number of inputs and prediction performances.

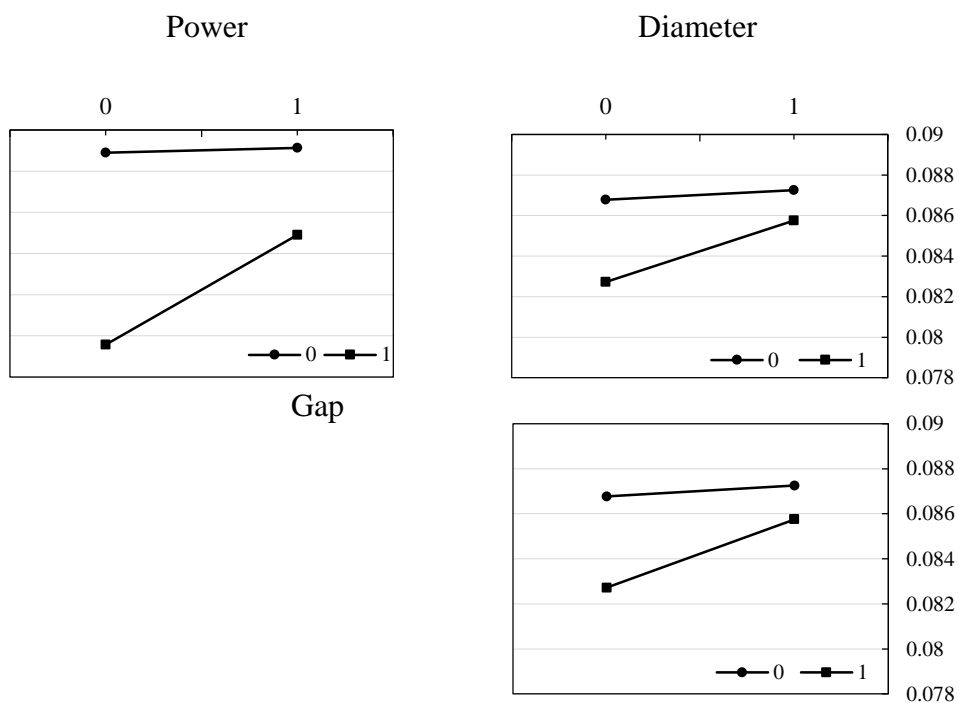


Figure 3.4 Interaction plot of the  $MSE_v$  for BDW between gap, power and diameter

The predicted and measured *BDW* for selected models with different inputs combination is represented in **Figure 3.6**. It can be seen that the validation and training data cover effectively and largely the range of *BDW* variation. The best modelling result is achieved using  $M_{BDW1}$  but it is not as good as for  $M_{DOP1}$ . The three models show similar results for validation data.  $M_{BDW2}$  presents similar error for training and validation. This model is certainly more adapted to predict *BDW*.  $M_{DOP3}$  give an interesting approximation of



*BDW* but having higher prediction error, it is less appropriate than the others models for prediction *BDW* accurately and effectively.

These concluding observations are confirmed by the produced correlation analysis between the predicted and the measured WSD attributes. Correlation analysis results presented in **Table 3.8** demonstrate the superiority of  $M_{DOP1}$  and  $M_{BDW1}$ . Globally, these models present good agreement between measured and predicted *DOP* and *BDW* in training phase with more than 99% and 95% and in validation phases with more than 92% and 86%. When considering all the data, the  $M_{DOP1}$  and  $M_{BDW1}$  models present more than 98% and 93% as correlation coefficient respectively. Accordingly, the achieved results demonstrates that the ANN based prediction models present excellent performances and can effectively predict the weld shape and dimensions in LW of galvanized steel in butt joint configurations with an average errors less than 2% and 7% for *DOP* and *BDW*, respectively. With 7% and 9 % as average errors,  $M_{DOP2}$  and  $M_{BDW2}$  can be used as alternative prediction model. With more than 12 % as average errors,  $M_{DOP3}$  and  $M_{BDW3}$  appear less appropriate as prediction models.

Table 3.8 Correlation between predicted and measured WSD attributes using various data sets

	<b>M<sub>DOP1</sub></b>	<b>M<sub>BDW1</sub></b>	<b>M<sub>DOP2</sub></b>	<b>M<sub>BDW2</sub></b>	<b>M<sub>DOP3</sub></b>	<b>M<sub>BDW3</sub></b>
<b>Training data</b>	99.83%	95.95%	93.30%	93.21%	83.60%	87.30%
<b>Validation data</b>	92.37%	86.14%	94.06%	87.33%	86.42%	88.48%
<b>Complete data</b>	98.25%	93.50%	93.33%	91.64%	84.05%	87.35%

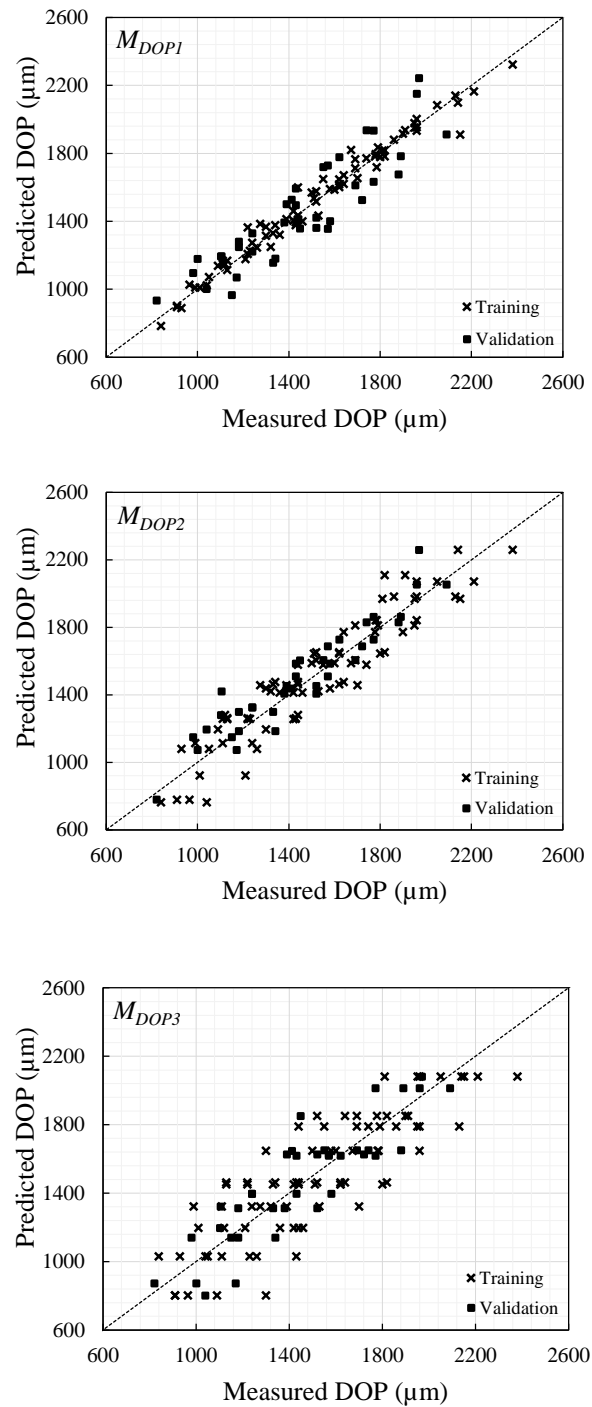


Figure 3.5 Comparison of predicted and measured depth of penetration for the 3 selected models

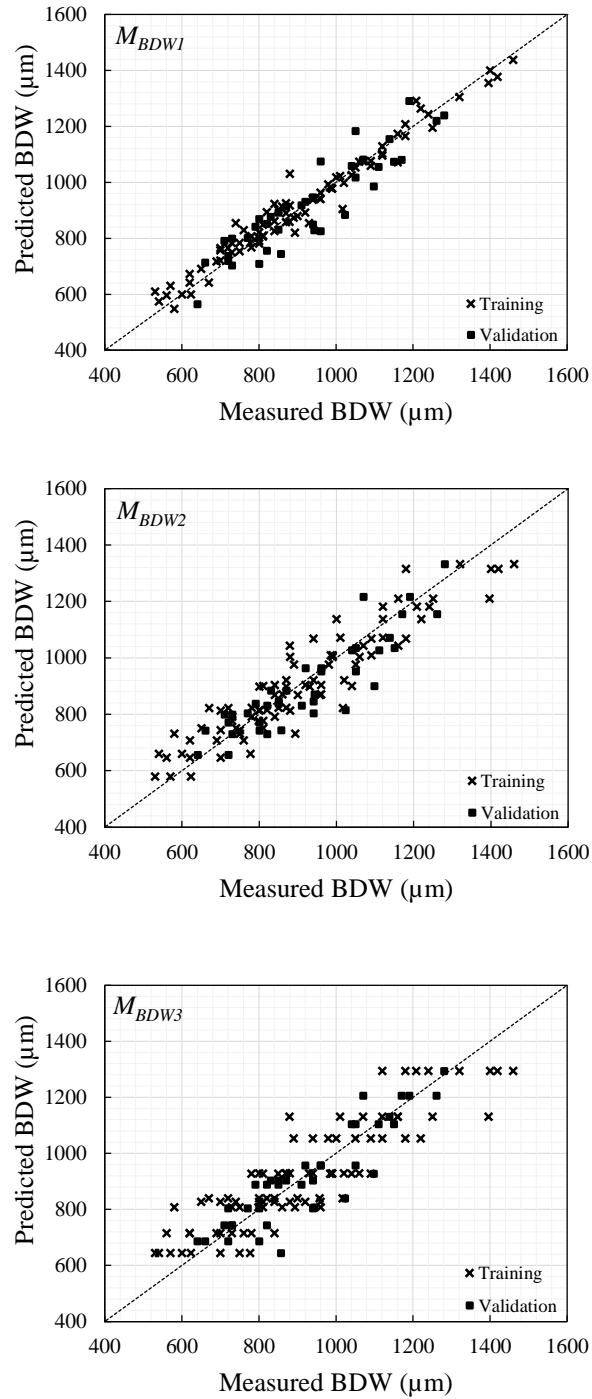


Figure 3.6 Comparison of predicted and measured bead width for the 3 selected models

### **3.4.5 Conclusion**

An artificial neural network based models have been developed to predict the weld shape and dimensions in laser welding of galvanized steel in butt joint configurations. The models building procedure is based on a fused data provided by a structured experimental investigations and exhaustive 3D finite element method simulation. The possible relationships between welding parameters such as laser power, welding speed, fibre diameter and gap, and geometric characteristics of the welds specifically depth of penetration and bead width are analysed and their sensitivity to the welding conditions evaluated using relevant statistical tools. Based on these results, various options for the prediction model building are established and evaluated using seven improved statistical criteria. The achieved results demonstrates that the resulting models present excellent performances and can effectively predict the weld shape and dimensions in laser welding with an average predicting errors less than 10%. These results demonstrate that the proposed ANN based prediction approach can effectively lead to a consistent models able to accurately and reliably provide an appropriate prediction of weld bead geometry and shape under variable welding parameters and conditions.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif du projet consiste à analyser les relations de dépendance entre la forme et les dimensions du cordon de soudure et les paramètres du procédé de soudage par laser dans le but d'établir des modèles permettant la prédiction des caractéristiques de la soudure dans le cas de soudage bout à bout d'acier galvanisé. Une approche structurée en trois étapes a été adoptée pour atteindre cet objectif et aboutir à des modèles prédictifs précis et robustes :

- (i) Réalisation d'une étude expérimentale dans le but d'identifier et d'évaluer les effets des paramètres de contrôle du procédé sur la qualité de la soudure et leurs contributions à la variation de ces différentes caractéristiques.
- (ii) Développement et validation expérimentale d'un modèle numérique 3D afin de simuler le comportement du procédé sous des conditions difficiles à réaliser expérimentalement.
- (iii) Exploitation des données expérimentales et des résultats des simulations pour le développement du modèle prédictif en tirant avantage des possibilités qu'offrent les réseaux de neurones artificiels.

Les investigations expérimentales ont été conduites en se basant sur un design orthogonal proposé par la méthode de Taguchi et réalisées à l'aide d'une source laser Nd: YAG de 3 kW. Un plan d'expérience avec 54 essais a été mis en œuvre en considérant tous les facteurs connus pour avoir une influence sur la qualité des soudures. La puissance du laser, la vitesse de soudure, le diamètre de la fibre laser, les épaisseurs des tôles et les écarts entre les tôles ont été utilisés comme facteurs pour estimer les variations de la largeur du cordon de soudure, la profondeur de pénétration, le remplissage et/ou le sous-remplissage et la dureté du cordon. Les effets des facteurs considérés et leurs contributions à la variation des différentes caractéristiques de la soudure ont été analysés à l'aide de l'analyse de la variance (ANOVA).

Les résultats obtenus montrent que la dureté dans le cordon de soudure connaît une augmentation de 150 Hv passant de 180 à 330 Hv. Similaires à ceux rencontrés généralement dans le soudage, ces mesures sont en accord avec les valeurs relevées dans la littérature.

L'analyse de la variance utilisée pour évaluer les effets des facteurs expérimentaux et leurs contributions à la variation des différentes caractéristiques de la soudure dévoile que la puissance, la vitesse de soudage, le diamètre du faisceau et l'épaisseur de la pièce sont les paramètres qui ont les effets les plus significatifs.

La présence d'écart entre les tôles a un effet positif sur la soudure en la rendant plus fine et plus profonde permettant ainsi l'utilisation des vitesses plus élevées pour obtenir les mêmes pénétrations. L'utilisation d'un écart de 0.1 mm réduit les effets de l'épaisseur sur la largeur du cordon de soudure et facilite la formation de soudure en forme de V. Un manque de matière entre 5% et 10% est observé pour les soudures sans écarts entre tôles. Ce manque augmente d'environ 10% lorsqu'un écart est utilisé. La réalisation d'ANOVA a permis d'identifier les paramètres du procédé qui permettent d'obtenir la meilleure qualité de soudure pour différentes épaisseurs avec ou sans écartement. Ce travail a permis de mettre en évidence les paramètres qui ont le plus d'influence sur les dimensions de la soudure et quantifier leurs impacts. D'autres effets thermiques concernant le profil de dureté et la forme des soudures ont également été observés.

Pour avoir la possibilité de simuler le comportement du procédé et d'évaluer un plus grand nombre de combinaisons de paramètres sans avoir recours aux fastidieuses et coûteuses expérimentations, un modèle numérique 3D a été développé et validé expérimentalement. Le modèle est basé sur des transformations métallurgiques utilisant les relations de dépendance entre température et propriétés des matériaux et la méthode de l'enthalpie. Les soudages en modes par conduction et en trou de serrure ont été investigués en utilisant des sources de chaleur surfacique et volumétrique respectivement. La transition entre les deux sources de chaleurs a été assurée en fonction de la densité de puissance et du temps d'interaction. Les simulations ont été réalisées en utilisant un modèle 3D par éléments finis. L'observation des profils des soudures obtenues expérimentalement et par simulation montrent clairement la

capacité du modèle à couvrir toute les formes de soudures. Le modèle a été validé à l'aide de données expérimentales produites dans la phase précédente. Les simulations ont révélé que le modèle permet de fournir non seulement une prédiction cohérente et précise des caractéristiques des soudures dans des conditions de soudage variées, mais permet également une analyse qualitative et quantitative du comportement du procédé. À noter qu'une erreur de prédiction légèrement plus importante est observée sur la largeur de la soudure comparativement à la pénétration. Cela pourrait s'expliquer par la variation des manques dues aux variations des écarts entre les tôles. Globalement, les profils des soudures réels et simulés présentent de grandes similitudes. Cela a permis d'utiliser le modèle 3D dans des simulations et des analyses intensives permettant d'identifier les variables les plus pertinentes à utiliser dans une procédure de modélisation prédictive.

La combinaison des données expérimentales et des résultats de simulation a permis de constituer une base de données riche et abondante permettant d'aborder la phase de modélisation par réseaux de neurones artificiels avec confiance. Les réseaux de neurones artificiels ont l'avantage de fournir des résultats immédiats, là où la simulation par éléments finis requiert beaucoup de temps de calcul et là où l'expérimentation s'avère encore plus longue et plus coûteuse.

Un total de 122 combinaisons constituées de résultats expérimentaux et de simulations a été utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau. Basé sur un design factoriel, 16 modèles établissant les relations entre les paramètres de soudage et les caractéristiques géométriques de la soudure et plus spécifiquement la profondeur de pénétration et la largeur cordon ont été analysées et leur sensibilité aux conditions de soudage évaluées à l'aide d'outils statistiques pertinents. Parmi les 122 combinaisons, 90 ont été utilisé pour l'apprentissage et 32 pour la validation. Suite à l'entraînement des modèles, une analyse des contributions des paramètres de soudage dans les performances des modèles conçus a été réalisée. Sur la base de ces résultats, trois options de modèles de prédiction ont été établies et évaluées à l'aide de critères précis. Les performances des modèles sélectionnés dépendent de la dimension du cordon de soudure à modéliser et du nombre et de la nature des paramètres d'entrée au

modèle. Au niveau de l'apprentissage, les meilleurs résultats sont obtenus avec le maximum. Cependant, la présence de certains paramètres dégrade les performances des modèles au niveau de la validation. Il a fallu faire des compromis pour obtenir le meilleur modèle. Malgré cela, globalement, les résultats obtenus démontrent que les modèles développés présentent d'excellentes performances et peuvent effectivement prédire les dimensions de la soudure avec une erreur moyenne de prédiction inférieures à 10%. Ces résultats démontrent que l'approche de modélisation utilisant les réseaux de neurone peut effectivement conduire à des modèles prédictifs consistant capable de fournir des prédictions précises et fiables de la géométrie du cordon de soudure et ce dans une large gamme de conditions de soudure.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] SHANMUGAM N.S., BUVANASHEKARAN G. et SANKARANARAYANASAMY K. 2010. "Experimental investigation and finite element simulation of laser beam welding of aisi 304 stainless steel sheet". *Experimental Techniques*, volume 34, pp. 25-36.
- [2] KOO B.S. 2013. "Simulation of melt penetration and fluid flow behavior during laser welding". *Ann Arbor, Lehigh University*, volume 3550248, pp. 141.
- [3] ASSUNCAO E., WILLIAMS S. et YAPP D. 2012. "Interaction time and beam diameter effects on the conduction mode limit". *Optics and Lasers in Engineering*, volume 50, pp. 823-828.
- [4] BHARTI A. 1988. "Laser welding". *Bulletin of Materials Science*, volume 11, pp. 191-212.
- [5] READY J.F. et FARSON D.F. 2001. "Handbook of laser materials processing". *Laser institute of america handbook of laser materials processing*. Orlando, Florida : Laser Institute of America, xxv, 715 p.
- [6] STEEN W.M. et MAZUMDER J. 2010. "Laser material processing". London : Springer.
- [7] ANAND D., CHEN D.L., BHOLE S.D., ANDREYCHUK P. et BOUDREAU G. 2006. "Fatigue behavior of tailor (laser)-welded blanks for automotive applications". *Materials Science and Engineering*, volume 420, pp. 199-207.
- [8] ASSUNÇÃO E., QUINTINO L. et MIRANDA R. 2010. "Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volume 49, pp. 123-131.
- [9] HONG K.-M. et SHIN Y.C. 2017. "Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review". *Journal of Materials Processing Technology*, volume 245, pp. 46-69.
- [10] UCHIHARA M. 2011. "Joining technologies for automotive steel sheets". *Welding International*, volume 25, pp. 249-259.

- [11] RIBOLLA A., DAMOULIS G.L. et BATALHA G.F. 2005. "The use of nd:Yag laser weld for large scale volume assembly of automotive body in white". *Journal of Materials Processing Technology*, volume 164–165, pp. 1120-1127.
- [12] KANNATEY-ASIBU E. 2009. "Principles of laser materials processing". Wiley Hoboken, NJ.
- [13] MEI L., YAN D., CHEN G., XIE D., ZHANG M. et GE X. 2015. "Comparative study on co2 laser overlap welding and resistance spot welding for automotive body in white". *Materials & Design*, volume 78, pp. 107-117.
- [14] MOSKVITIN G.V., POLYAKOV A.N. et BIRGER E.M. 2013. "Application of laser welding methods in industrial production". *Welding International*, volume 27, pp. 572-580.
- [15] AMO J.M., DURÁN J., CHAO J. et FERNÁNDEZ-SÁEZ J. 1996. "Laser welding of al55-zn coated steel sheet". *Journal of Materials Science*, volume 31, pp. 6595-6607.
- [16] ZHAO Y., ZHANG Y., HU W. et LAI X. 2012. "Optimization of laser welding thin-gage galvanized steel via response surface methodology". *Optics and Lasers in Engineering*, volume 50, pp. 1267-1273.
- [17] CHEN W., ACKERSON P. et MOLIAN P. 2009. "Co2 laser welding of galvanized steel sheets using vent holes". *Materials & Design*, volume 30, pp. 245-251.
- [18] IQBAL S., GUALINI M.M.S. et REHMAN A.u. 2010. "Dual beam method for laser welding of galvanized steel: Experimentation and prospects". *Optics & Laser Technology*, volume 42, pp. 93-98.
- [19] PIETERS R., BAKELS J., HERMANS M. et DEN OUDEN G. 2006. "Laser welding of zinc coated steels in an edge lap configuration". *Journal of laser applications*, volume 18, pp. 199-204.
- [20] JENG J.Y., MAU T.F. et LEU S.M. 2000. "Gap inspection and alignment using a vision technique for laser butt joint welding". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volume 16, pp. 212-216.
- [21] SUN Z. et KUO M. 1999. "Bridging the joint gap with wire feed laser welding". *Journal of Materials Processing Technology*, volume 87, pp. 213-222.

- [22] SPÖTTL M. et MOHRBACHER H. 2014. "Laser-based manufacturing concepts for efficient production of tailor welded sheet metals". *Advances in Manufacturing*, volume 2, pp. 193-202.
- [23] JENG J.-Y., MAU T.-F. et LEU S.-M. 2000. "Prediction of laser butt joint welding parameters using back propagation and learning vector quantization networks". *Journal of Materials Processing Technology*, volume 99, pp. 207-218.
- [24] ZHANG Y.-X., HAN S.-W., CHEON J., NA S.-J. et GAO X.-D. "Effect of joint gap on bead formation in laser butt welding of stainless steel". *Journal of Materials Processing Technology*.
- [25] PARK J. et KIM T. 1999. "Tailored blank welding between low carbon steel sheet and sts 304 stainless steel sheet by co 2 laser beam". *Metals and Materials*, volume 5, pp. 55-62.
- [26] SOKOLOV M. et SALMINEN A. 2012. "Experimental investigation of the influence of edge morphology in high power fiber laser welding". *Physics Procedia*, volume 39, pp. 33-42.
- [27] BENYOUNIS K.Y. et OLABI A.G. 2008. "Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches – a reference guide". *Advances in Engineering Software*, volume 39, pp. 483-496.
- [28] MACKWOOD A.P. et CRAFER R.C. 2005. "Thermal modelling of laser welding and related processes: A literature review". *Optics & Laser Technology*, volume 37, pp. 99-115.
- [29] HU Y., HE X., YU G., GE Z., ZHENG C. et NING W. 2012. "Heat and mass transfer in laser dissimilar welding of stainless steel and nickel". *Applied Surface Science*, volume 258, pp. 5914-5922.
- [30] TSIRKAS S.A., PAPANIKOS P. et KERMANIDIS T. 2003. "Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens". *Journal of Materials Processing Technology*, volume 134, pp. 59-69.
- [31] ABDERRAZAK K., BANNOUR S., MHIRI H., LEPALEC G. et AUTRIC M. 2009. "Numerical and experimental study of molten pool formation during continuous laser welding of az91 magnesium alloy". *Computational Materials Science*, volume 44, pp. 858-866.

- [32] SHANMUGAM N.S., BUVANASHEKARAN G., SANKARANARAYANASAMY K. et RAMESH KUMAR S. 2010. "A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of t-joint laser welds". *Materials & Design*, volume 31, pp. 4528-4542.
- [33] KUANG J.-H., HUNG T.-P. et CHEN C.-K. 2012. "A keyhole volumetric model for weld pool analysis in nd:Yag pulsed laser welding". *Optics & Laser Technology*, volume 44, pp. 1521-1528.
- [34] ABHILASH A.P. et SATHIYA P. 2011. "Finite element simulation of laser welding of 904l super austenitic stainless steel". *Transactions of the Indian Institute of Metals*, volume 64, pp. 409-416.
- [35] CHONGBUNWATANA K. 2014. "Simulation of vapour keyhole and weld pool dynamics during laser beam welding". *Production Engineering*, volume 8, pp. 499-511.
- [36] HA E.-J. et KIM W.-S. 2005. "A study of low-power density laser welding process with evolution of free surface". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, volume 26, pp. 613-621.
- [37] OTTO A. et SCHMIDT M. 2010. "Towards a universal numerical simulation model for laser material processing". *Physics Procedia*, volume 5, Part A, pp. 35-46.
- [38] UNITED STATES. DEPARTMENT OF E., ROACH R.A., FUERSCHBACH P.W., BERNAL J.E. et NORRIS J.T. 2006. "Thin plate gap bridging study for nd:Yag pulsed laser lap welds". Sandia National Laboratories.
- [39] BAG S., TRIVEDI A. et DE A. 2009. "Development of a finite element based heat transfer model for conduction mode laser spot welding process using an adaptive volumetric heat source". *International Journal of Thermal Sciences*, volume 48, pp. 1923-1931.
- [40] RAHMAN CHUKKAN J., VASUDEVAN M., MUTHUKUMARAN S., RAVI KUMAR R. et CHANDRASEKHAR N. 2015. "Simulation of laser butt welding of aisi 316l stainless steel sheet using various heat sources and experimental validation". *Journal of Materials Processing Technology*, volume 219, pp. 48-59.
- [41] GOLDAK J., CHAKRAVARTI A. et BIBBY M. 1984. "A new finite element model for welding heat sources". *Metallurgical Transactions B*, volume 15, pp. 299-305.

- [42] DAL M. et FABBRO R. 2016. "An overview of the state of art in laser welding simulation". *Optics & Laser Technology*, volume 78, Part A, pp. 2-14.
- [43] VAN ELSEN M., BAELMANS M., MERCELIS P. et KRUTH J.P. 2007. "Solutions for modelling moving heat sources in a semi-infinite medium and applications to laser material processing". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, volume 50, pp. 4872-4882.
- [44] AKBARI M., SAEDODIN S., PANJEHPOUR A., HASSANI M., AFRAND M. et TORKAMANY M.J. 2016. "Numerical simulation and designing artificial neural network for estimating melt pool geometry and temperature distribution in laser welding of ti6al4v alloy". *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, volume 127, pp. 11161-11172.
- [45] UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY. OFFICE OF ENERGY R., VITEK J.M., ISKANDER Y.S., OBLOW E.M., BABU S.S., DAVID S.A., FUERSCHBACH P.W., SMARTT H.B. et PACE D.P.T.C.R. 1998. "Neural network modeling of weld pool shape in pulsed-laser welding aluminum welds". Oak Ridge National Laboratory.
- [46] UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY. OFFICE OF ENERGY R., VITEK J.M., ISKANDER Y.S., OBLOW E.M., BABU S.S., DAVID S.A., FUERSCHBACH P.W., SMARTT H.B. et PACE D.P.T.C.R. 1998. "Neural network modeling of pulsed-laser weld pool shapes in aluminum alloy welds". Oak Ridge National Laboratory.
- [47] BALASUBRAMANIAN K.R., BUVANASHEKARAN G. et SANKARANARAYANASAMY K. 2010. "Modeling of laser beam welding of stainless steel sheet butt joint using neural networks". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, volume 3, pp. 80-84.
- [48] CHANG W.-S. et NA S.-J. 2001. "Prediction of laser-spot-weld shape by numerical analysis and neural network". *Metallurgical and Materials Transactions B*, volume 32, pp. 723-731.
- [49] SATHIYA P., PANNEERSELVAM K. et ABDUL JALEEL M.Y. 2012. "Optimization of laser welding process parameters for super austenitic stainless steel using artificial neural networks and genetic algorithm". *Materials & Design (1980-2015)*, volume 36, pp. 490-498.
- [50] SCHMIDT M., OTTO A. et KÄGELER C. 2008. "Analysis of yag laser lap-welding of zinc coated steel sheets". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, volume 57, pp. 213-216.

- [51] SUH J., KIM T., YU B. et LEE K. 1998. "A study of tailored blank welding between mild steel sheet and zn-coated steel sheet by co 2 laser beam". *Metals and Materials*, volume 4, pp. 157-163.
- [52] ROSS P.J. 1996. "Taguchi techniques for quality engineering: Loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design". McGraw-Hill.
- [53] KHAN M.M.A., ROMOLI L., FIASCHI M., SARRI F. et DINI G. 2010. "Experimental investigation on laser beam welding of martensitic stainless steels in a constrained overlap joint configuration". *Journal of Materials Processing Technology*, volume 210, pp. 1340-1353.
- [54] ASSUNCAO E. et WILLIAMS S. 2013. "Comparison of continuous wave and pulsed wave laser welding effects". *Optics and Lasers in Engineering*, volume 51, pp. 674-680.
- [55] ROSENTHAL D. 1946. "The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments". Cambridge, ASME.
- [56] EAGAR T. et TSAI N. 1983. "Temperature fields produced by traveling distributed heat sources". *Welding Journal*, volume 62, pp. 346-355.
- [57] PANG S., CHEN X., ZHOU J., SHAO X. et WANG C. 2015. "3d transient multiphase model for keyhole, vapor plume, and weld pool dynamics in laser welding including the ambient pressure effect". *Optics and Lasers in Engineering*, volume 74, pp. 47-58.
- [58] NAGEL F., SIMON F., KÜMMEL B., BERGMANN J.P. et HILDEBRAND J. 2014. "Optimization strategies for laser welding high alloy steel sheets". *Physics Procedia*, volume 56, pp. 1242-1251.
- [59] GUAN Y., YUAN G., SUN S. et ZHAO G. 2013. "Process simulation and optimization of laser tube bending". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volume 65, pp. 333-342.
- [60] KIM J.-D. 1990. "Prediction of the penetration depth in laser beam welding". *KSME Journal*, volume 4, pp. 32-39.
- [61] SATHIYA P., PANNEERSELVAM K. et SOUNDARARAJAN R. 2012. "Optimal design for laser beam butt welding process parameter using artificial neural networks and genetic algorithm for super austenitic stainless steel". *Optics & Laser Technology*, volume 44, pp. 1905-1914.

- [62] OLABI A.G., CASALINO G., BENYOUNIS K.Y. et HASHMI M.S.J. 2006. "An ann and Taguchi algorithms integrated approach to the optimization of co2 laser welding". *Advances in Engineering Software*, volume 37, pp. 643-648.
- [63] YILMAZ I. 2009. "Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison : A case study from kat landslides". *Computers & Geosciences*, volume 35, pp. 1125-1138.
- [64] SAMANTA B. et AL-BALUSHI K. 2003. "Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features". *Mechanical systems and signal processing*, volume 17, pp. 317-328.
- [65] MONTGOMERY D.C. 2008. "Design and analysis of experiments". Wiley, Hoboken, NJ.